



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Εκτίμηση ποιότητας αέρα και ανίχνευση πηγών πτητικών οργανικών  
ενώσεων σε χώρους γραφείων**

**Air quality assessment and source apportionment of volatile organic  
compounds in office buildings**

**Βασιλική Σκοπελίτη (2667)**

Επιβλέπων καθηγητής: Γ. Πανάρας

ΚΟΖΑΝΗ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2024

## Περίληψη

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής έχει οδηγήσει τον άνθρωπο να καταναλώνει περισσότερο από το 90% της καθημερινότητάς του σε εσωτερικούς χώρους όπως η κατοικία, ο εργασιακός χώρος, τα δημόσια κτίρια κ.α. (WHO, 2010), με αποτέλεσμα η εξασφάλιση ενός υγιεινού και άνετου εσωτερικού περιβάλλοντος να κρίνεται αναγκαία. Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που σχετίζονται άμεσα με την υγεία και την άνεση των χρηστών εντός των κτιρίων. Μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, όσον αφορά την αποτίμηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, συγκεντρώνει η εκτίμηση των παραγόντων που την επηρεάζουν και πιο συγκεκριμένα η συσχέτιση μεταξύ χημικών ουσιών και πηγών προέλευσης αυτών.

Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ποιότητας αέρα σε τρία κτίρια γραφείων στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, με σκοπό τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων διαφορετικών πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) εντός και εκτός αυτών. Το πρώτο και το δεύτερο κτίριο που επιλέχθηκαν να μελετηθούν βρίσκονται εντός του αστικού ιστού της Κοζάνης, ενώ το τρίτο εκτός αυτού. Για το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας σε κάθε κτίριο γινόταν λήψη τεσσάρων δειγμάτων ημερησίως εκ των οποίων τρία λαμβανόντουσαν σε ένα επιλεγμένο γραφείο και ένα στον εξωτερικό χώρο. Αρχικά, με τη χρήση χρωματογράφου μάζας πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των δειγμάτων αυτών για τον υπολογισμό των διαφόρων συγκεντρώσεων των VOCs. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των αναλύσεων εισήχθησαν σε μοντέλο αποδέκτη, με σκοπό την ανίχνευση των πηγών που διαμορφώνουν τις μετρούμενες συγκεντρώσεις (source apportionment). Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε το μοντέλο Positive Matrix Factorization (PMF), το οποίο βασίζεται σε μια εξίσωση ισοζυγίου μάζας και για την εφαρμογή του δεν είναι αναγκαία η εκ των προτέρων γνώση του χημικού προφίλ των πηγών. Τα αποτελέσματα έδειξαν τις κύριες πηγές εκπομπής VOCs (εσωτερικά των κτιρίων αλλά και εξωτερικά αυτών). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τα χαρακτηριστικά των κτιρίων, τις δραστηριότητες των υπαλλήλων, τις συνθήκες εξαερισμού κ.α.

## Abstract

The modern way of life has led humans to consuming more than 90% of their everyday lives in indoor spaces like residences, workplace, public buildings etc. (WHO, 2010), so ensuring a healthy and comfortable environment is crucial. Indoor air quality is one of the most important parameters directly related to the health and comfort of a building's users. The evaluation of indoor air quality, and more precisely the assessment of the factors that affect it, as well as the correlation between chemical substances and their source of origin, gathers great research interest.

In this study, air quality measurements took place in three office buildings in the region of western Macedonia in order to determine the concentrations of different volatile organic compounds (VOCs) inside and outside them. The first and second building chosen to be studied are located within the urban fabric of Kozani, while the third is outside it. For the sampling period, four samples were taken daily in each building, three of which were taken in a selected office and one outside. Initially, with the use of GC – MS method, the analysis of these samples was carried out to calculate the various concentrations of VOCs. Afterwards, the results of the analyses were used as input to a receptor model, in order to detect the sources that cause the measured concentrations (source apportionment). More specifically, the Positive Matrix Factorization (PMF) model was used, which is based on a mass balance equation and for its application, prior knowledge of the chemical profile of the sources, is not necessary. The results pointed the main sources of VOCs emissions (inside the buildings but also outside them). Of particular interest is the correlation of the results with the characteristics of the buildings, the activities of the employees, the ventilation conditions, etc.

## Ευχαριστίες

Για την επιτυχή περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γιώργο Πανάρα, που σύστησε το συγκεκριμένο θέμα, καθώς όχι μόνο αποτελεί ένα πρωτοπόρο και ανεπαρκώς μελετημένο ζήτημα, αλλά κυρίως ταίριαξε στις δεξιότητές μου και το μελέτησα με μεγάλη προσήλωση.

Κατόπιν, οφείλω να ευχαριστήσω βαθιά τον υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος, Γιάννη Παπαδόπουλο, ο οποίος με κατεύθυνε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, μου παρείχε εκπαιδευτικό υλικό και αποκρινόταν πάντοτε άμεσα σε οτιδήποτε χρειαζόμουν.

Ακόμη, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη συνεργάτιδα από το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος και κάτοχο διδακτορικού από το Τμήμα μας, κα. Δικαία Σαραγά, για την πολύπλευρη παροχή πληροφοριών και φυσικά την άψογη επικοινωνία και συνεργασία μας όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους φίλους αλλά και την οικογένειά μου για τις συμβουλές και τη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, όπως επίσης και τους υπεύθυνους των τριών κτιρίων που βοήθησαν στην απρόσκοπτη λήψη δειγμάτων και επέτρεψαν την ενδελεχή μελέτη των χώρων.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	- 1 -
Abstract .....	- 2 -
Ευχαριστίες .....	- 3 -
1. Εισαγωγή .....	- 5 -
2. Βιβλιογραφική διερεύνηση.....	- 8 -
2.1. Τύποι κτιρίων .....	- 8 -
2.2. Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος.....	- 10 -
2.3. Ποιότητα αέρα.....	- 15 -
2.3.1. Ρύποι & όρια.....	- 15 -
2.3.2. Σύνδρομο άρρωστου κτιρίου .....	- 23 -
2.3.3. Μελέτες IAQ.....	- 25 -
2.4. Πτητικές οργανικές ενώσεις.....	- 30 -
2.5. Source Apportionment (Επιμερισμός Πηγών) .....	- 38 -
3. Μεθοδολογία μετρήσεων .....	- 45 -
3.1. Περιγραφή κτιρίων μελέτης.....	- 45 -
3.1.1. Κτίριο I.....	- 45 -
3.1.2. Κτίριο II .....	- 47 -
3.1.3. Κτίριο III.....	- 48 -
3.2. Καμπάνια μετρήσεων.....	- 50 -
4. Εξαγωγή και επεξεργασία αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων.....	- 55 -
4.1. Μοντέλο και πρόγραμμα PMF.....	- 55 -
4.2. Αποτελέσματα.....	- 64 -
4.2.1. Αποτελέσματα Κτιρίου I.....	- 68 -
4.2.2. Αποτελέσματα Κτιρίου II .....	- 70 -
4.2.3. Αποτελέσματα Κτιρίου III.....	- 72 -
5. Συμπεράσματα.....	- 75 -
Βιβλιογραφία .....	- 77 -
Παράρτημα.....	- 83 -

## 1. Εισαγωγή

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization – WHO) έχει υπολογίσει ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση σκοτώνει μέχρι 6 εκατομμύρια άτομα ετησίως, εκ των οποίων οι 2.8 εκατομμύρια πεθαίνουν λόγω της ρύπανσης και μόλυνσης του εσωτερικού αέρα, καθότι οι εσωτερικοί ρυπαντές είναι προσεγγιστικά 1000 φορές περισσότερο πιθανοί να φτάσουν τους πνεύμονες, απ' ό,τι οι εξωτερικοί (WHO, 2010).

Μία από τις σημαντικότερες αιτίες υποβάθμισης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα είναι η αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών, όπως το ξύλο και η πέτρα, με φθηνότερα υλικά μαζικής παραγωγής (π.χ. PVC, συνθετικά υλικά), τα οποία βέβαια εκπέμπουν πολλές ρυπογόνες ουσίες (Σαραγά, 2010).

Άλλη, επίσης σπουδαία αιτία επιδείνωσης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος, είναι η αυξανόμενη μόνωση των κτισμάτων με κύριο σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Όμως, τα περισσότερα μονωτικά υλικά είναι χημικά βασισμένα σε οργανικές ενώσεις και τα υπολειμματικά, επιβλαβή χημικά που δεν πολυμερίζονται κατά τη διαδικασία κατασκευής τους, μπορούν να απελευθερωθούν στον αέρα, γεγονός που μπορεί να επιδεινώσει την ποιότητά του. Βέβαια, μόνο λίγες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί προς στιγμήν όσον αφορά τις επικίνδυνες εκπομπές από τα μονωτικά υλικά. Ενδεικτικά, σε μία από αυτές, που έλαβε χώρα στη Σεούλ της Νότιας Κορέας, αποδείχθηκε η εκπομπή TVOC, φορμαλδεΐδης, ξυλολίου, στυρενίου, αιθυλοβενζολίου και τολουολίου (Wi et al., 2021).

Επιπρόσθετα, δε θα πρέπει να αγνοηθεί η αυξανόμενη ρύπανση της ατμόσφαιρας. Οι εξωτερικοί ρύποι μπορούν να εισέλθουν στα κτίρια μέσω των ανοιγμάτων (πόρτες, παράθυρα), των συστημάτων εξαερισμού και των ρωγμών στα δομικά υλικά. Για παράδειγμα, οι πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως και το ραδόνιο, μπορούν να εισχωρήσουν στα κενά και τις μικρορωγμές στα κτίρια σε περιοχές με μολυσμένο υπέδαφος ή υπόγεια νερά, ακόμη και με το νερό που χρησιμοποιούν οι ένοικοι ή μέσω των επικαθίσεων στο ρουχισμό και τα υποδήματά τους.

Μερικοί ακόμη παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα συμπεριλαμβάνουν το ρυθμό εναλλαγής φρέσκου αέρα (με φυσικό ή μηχανικό τρόπο, εκούσια με χρήση των ανοιγμάτων ή ακούσια μέσω των κενών της τοιχοποιίας και των κουφωμάτων) και το φιλτράρισμά του κατά τη διέλευσή του από το σύστημα

μηχανικού αερισμού. Επίσης, επηρεάζουν τόσο το κλίμα όσο και οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν (π.χ. η ύπαρξη υγρασίας ευνοεί την ανάπτυξη μούχλας), ενώ επιδρούν και στη συμπεριφορά των χρηστών του χώρου, στον τρόπο που διαχειρίζονται το άνοιγμα των παραθύρων, στο αν χρησιμοποιούν αφυγραντήρες, ανεμιστήρες και άλλες συσκευές ρύθμισης του μικροκλίματος.

Συνεπακόλουθα, η επιβάρυνση της ανθρώπινης υγείας που προκαλείται από το ανθυγιεινό εσωτερικό περιβάλλον, ως απόρροια του συνδρόμου άρρωστου κτιρίου, έρχεται ολοένα και περισσότερο στο προσκήνιο λόγω των διαφορετικών επιπέδων της τοξικότητας των εν λόγω ενώσεων, της συγκέντρωσής τους, του χρόνου έκθεσης των ατόμων σε αυτές και άλλων παραγόντων.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία στοχεύει στην εκτίμηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα και την ανίχνευση των πηγών πτητικών οργανικών ενώσεων σε χώρους γραφείων καλύπτοντας τόσο τις εργασίες που έχουν ήδη εκπονηθεί επί του θέματος, όσο και την πραγματικότητα, μέσα από τη μελέτη πειραματικών διερευνήσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο αντικείμενο που θα καλύψει η εργασία, παραθέτοντας πληροφορίες για τη σπουδαιότητά του και το πώς, με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού και της τεχνολογίας, ώθησε τους επιστήμονες στη διερεύνησή του.

Ακολουθεί, στο δεύτερο κεφάλαιο, η βιβλιογραφική διερεύνηση του θέματος ξεκινώντας από τα είδη των κτιρίων, τις κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται και τον τρόπο που αυτές προκύπτουν. Πραγματοποιείται μία σύντομη αναφορά στην ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος όσον αφορά τρεις παραμέτρους της: τη θερμική, οπτική και ακουστική άνεση, ενώ έπεται μία πιο εκτενής παρουσίαση της τέταρτης παραμέτρου, και ακρογωνιαίου λίθου της παρούσας διπλωματικής, που είναι η ποιότητα του αέρα. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται ειδική μνεία στις πτητικές οργανικές ενώσεις και τις τεχνικές source apportionment.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της πειραματικής διερεύνησης. Καταγράφονται όλες οι λεπτομέρειες που σχετίζονται με την περιγραφή των υπό μελέτη κτιρίων, την καμπάνια των μετρήσεων και τον προσήκοντα εξοπλισμό.

Κατόπιν, αποτυπώνονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, σχολιάζονται και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που ήταν αναμενόμενα ενώ δίδονται και επιγραμματικές οδηγίες για τη λειτουργία του προγράμματος source apportionment που χρησιμοποιήθηκε.

Η εργασία ολοκληρώνεται με το πέμπτο κεφάλαιο όπου προκύπτουν τα συμπεράσματα της θεωρητικής και πειραματικής μελέτης του θέματος και δίνεται το έναυσμα για πιθανές μελλοντικές έρευνες με μία πιο εξελιγμένη και εις βάθος ανασκόπηση.



## 2. Βιβλιογραφική διερεύνηση

Το παρόν κεφάλαιο ξεκινά με μία κατηγοριοποίηση των τύπων των κτιρίων βάσει κάποιων διακεκριμένων φορέων και δίνει έμφαση στις ιδιαιτερότητες και τη σημασία των χώρων γραφείων. Ακολούθως, σκιαγραφείται η έννοια της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος με βασικές πληροφορίες για τη θερμική, οπτική και ακουστική άνεση και μεγαλύτερη κάλυψη στο κομμάτι της ποιότητας του αέρα καθώς και μελέτες που έχουν εκπονηθεί επί του ζητήματος. Εν συνεχεία, αφιερώνονται αρκετές σελίδες στις πτητικές οργανικές ενώσεις, που είναι και ο κυριότερος ρύπος όσον αφορά την ποιότητα αέρα στη συγκεκριμένη εργασία. Το κεφάλαιο κλείνει με τις τεχνικές, τα μοντέλα και τα προγράμματα source apportionment που υφίστανται.

### 2.1. Τύποι κτιρίων

Η ταξινόμηση των κτιρίων γίνεται συνήθως σύμφωνα με τη λειτουργία τους, η οποία κατά βάση στηρίζεται στις δραστηριότητες που εκτελούνται στο εσωτερικό τους. Έτσι, η Ευρωπαϊκή Ένωση (BPIE, 2011) χωρίζει τα κτίρια σε οικιακής και μη οικιακής χρήσης:

#### 1) Κτίρια οικιακής χρήσης (residential)

- Μονοκατοικίες
- Πολυκατοικίες

#### 2) Κτίρια μη οικιακής χρήσης (non – residential)

- Εργοστάσια και βιομηχανίες
- Νοσοκομεία, σχολεία, γραφεία
- Ξενοδοχεία, καταστήματα, εμπορικά κέντρα, εστιατόρια
- Αεροδρόμια
- Γυμναστήρια
- Χώροι στάθμευσης
- Αποθήκες

- Θρησκευτικά κτίρια

Ομοίως, η ευρωπαϊκή οδηγία (E.E., 2024) για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων τα ταξινομεί σύμφωνα με την ενεργειακή κατανάλωση ως εξής:

- Μονοκατοικίες
- Πολυκατοικίες
- Γραφεία
- Εκπαιδευτικά κτίρια
- Νοσοκομεία
- Ξενοδοχεία και εστιατόρια
- Αθλητικές εγκαταστάσεις
- Κτίρια υπηρεσιών χονδρικού και λιανικού εμπορίου
- Άλλοι τύποι ενεργοβόρων κτιρίων

Μία άλλη απόπειρα ταξινόμησης των κτιρίων βασίζεται στην ενεργειακή κατανάλωση και τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις, διακρίνοντάς τα σε:

- Κτίρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (zero energy buildings): είναι τα κτίρια με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση, των οποίων η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών, καλύπτεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που παράγεται επιτόπου ή πλησίον του κτιρίου.
- Πράσινα κτίρια (green buildings): Περιβαλλοντικά βιώσιμα κτίρια που ελαχιστοποιούν τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μεγιστοποιούν το θετικό αντίκτυπό τους στο περιβάλλον και τους ενοίκους τους. Παρουσιάζουν περιβαλλοντική ευθύνη και αποτελεσματικότητα από πλευράς πόρων σε όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής τους: από τη χωροθέτηση έως τη μελέτη, την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση, την ανακαίνιση, και την κατεδάφιση.

- Φυσικά κτίρια (natural buildings): Οι τρόποι επίτευξης της αειφορίας μέσω τέτοιων κτιρίων επικεντρώνονται στην ανθεκτικότητα και στη χρήση ελάχιστα επεξεργασμένων, άφθονων ή ανανεώσιμων πόρων καθώς και πόρων που, ενώ ανακυκλώνονται ή διασώζονται, παράγουν υγιή περιβάλλοντα διαβίωσης και διατηρούν την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι η λάσπη, η άμμος, οι πέτρες, τα ξύλα και ο πηλός.

Ακόμη, έχουν προκύψει νέα συστήματα ταξινόμησης, σύμφωνα με την υγεία και την ευεξία όπως αυτό του IWBI (International WELL Building Institute) με τους δέκα καθοριστικούς παράγοντες να είναι ο αέρας, το νερό, η διατροφή, ο φωτισμός, η κίνηση, η θερμική άνεση, οι ήχοι, τα υλικά, ο νους και η κοινότητα (Indairpollnet, 2021).

Τα κτίρια γραφείων είναι κτίρια εμπορικά ή δημόσια τα οποία αποτελούνται από χώρους όπου δε λαμβάνει χώρα κάποια χειρωνακτική εργασία. Χρηζουν περαιτέρω μελέτης λόγω του μεγάλου αριθμού εργαζομένων που φιλοξενούν σε συγκεκριμένες ώρες, της αυτοματοποίησης στη ρύθμιση των εσωτερικών συνθηκών (π.χ. απουσία ανοιγμάτων για την αποφυγή φυσικού αερισμού) και του ελάχιστου ελέγχου που έχουν οι εργαζόμενοι στο μικρόκλιμά τους και την ποιότητα του αέρα. Επίσης, οι εργαζόμενοι δαπανούν το 1/3 της ημέρας τους στα γραφεία, που πολλές φορές χαρακτηρίζονται από το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου (Sick Building Syndrome), που θα αναλυθεί στη συνέχεια, επιδεινώνοντας έτσι την υγεία, την άνεση και την αποδοτικότητά τους (Licina and Yildirim, 2021).

## 2.2. Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος

Η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος (Indoor Environmental Quality – IEQ) περιγράφεται κατά βάση ως «οι συνθήκες που επικρατούν εντός του κτιρίου». Περιλαμβάνει τη θερμική, ακουστική και οπτική άνεση και την ποιότητα του αέρα, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 2.1. Σε έναν ευρύτερο ορισμό συμπεριλαμβάνει ακόμα και λειτουργικές παραμέτρους όπως η εργονομία, η χωρητικότητα, οι αυτοματισμοί και άλλες ανέσεις.



Εικόνα 2.1: Παράμετροι ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος και η επίδρασή τους

Προκειμένου να οριστεί η έννοια της θερμικής άνεσης, υπάρχουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις οι οποίες είναι η φυσιολογική, η θερμοφυσιολογική και αυτή που βασίζεται στο ανθρώπινο ισοζύγιο. Η πρώτη, με βάση τα πρότυπα ISO 7730 (International Organization for Standardization) και ASHRAE 55 – 2020 (American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers), είναι «η κατάσταση στην οποία ο εγκέφαλος κάποιου ατόμου δεν επιθυμεί καμία αλλαγή στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και είναι ικανοποιημένος με τις συνθήκες που επικρατούν». Σύμφωνα με τη θερμοφυσιολογική προσέγγιση, η άνεση στηρίζεται στην ενεργοποίηση των θερμικών αισθητήρων του δέρματος και ορίζεται ως ο ελάχιστος ρυθμός των νευρικών σημάτων από αυτούς. Τέλος, η τρίτη προσέγγιση προσδιορίζει τη θερμική άνεση ως την κατάσταση που επιτυγχάνεται όταν η θερμότητα που ρέει από και προς το ανθρώπινο σώμα είναι ισοσταθμισμένη, καθώς η θερμοκρασία του δέρματος και ο ρυθμός εφίδρωσης κυμαίνονται στα όρια άνεσης που εξαρτώνται από το μεταβολισμό.

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η θερμική άνεση είναι οι εξής:

α) Περιβαλλοντικοί

- Θερμοκρασία του αέρα: Η θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα που περιβάλλει τους χρήστες ενός χώρου (ASHRAE, 2020).

- Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία των επιφανειών: Η ομοιόμορφη επιφανειακή θερμοκρασία ενός φανταστικού μαύρου κελύφους, που θα προκαλέσει την ίδια ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ατόμου και αυτού, με αυτή που συμβαίνει στις εξεταζόμενες συνθήκες.
- Υγρασία: Σχετική υγρασία ονομάζεται το ποσοστό της υγρασίας που περιέχεται σε ένα τμήμα αέρα προς την υγρασία που θα περιείχε το ίδιο τμήμα, αν ήταν κορεσμένο, σε ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης. Πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 30% και 70% σε εσωτερικούς χώρους.
- Ταχύτητα του αέρα: Η κίνησή του γύρω από τον άνθρωπο καθορίζει αφενός την ανταλλαγή θερμότητας, με συναγωγή, αφετέρου την ποσόστωσή του σε υδρατμούς. Το επιτρεπτό όριο είναι 0.8 m/sec (CEN, 2005).

β) Οργανικοί: Το φύλο, η ηλικία και τα φυλετικά χαρακτηριστικά των ενοίκων.

γ) Προσωπικοί:

- Επίπεδο δραστηριότητας: Ο μεταβολισμός είναι το σύνολο των χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο ανθρώπινο σώμα με στόχο να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία του στους  $37 \pm 0.5$  °C (1 met = 58 W/m<sup>2</sup> επιφάνειας σώματος). Οι δραστηριότητες των τελευταίων 15 λεπτών έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα (ASHRAE, 2020).
- Το είδος και ο βαθμός ένδυσης: Η ένδυση αποτελεί ένα είδος θερμικής αντίστασης στην αποβολή θερμότητας από την επιφάνεια του σώματος προς το περιβάλλον (1 clo = 0.155 m<sup>2</sup>K/W). Τυπικός ρουχισμός για τη διάρκεια του χειμώνα μπορεί να θεωρεί το 1 clo, ενώ για το καλοκαίρι το 0.5 clo.

Οι άνθρωποι έχουν διαφορετική αίσθηση της θερμότητας ενώ ενδεικτικά η λειτουργία δροσισμού αρχίζει μόλις η εσωτερική θερμοκρασία του σώματος ξεπεράσει τους 37 °C και η άμυνα κατά της υποθερμίας αρχίζει στους 34 °C. Επομένως, όταν δεν νιώθουν άνετα με τις θερμικές συνθήκες, οι επιδόσεις τους στη δουλειά μειώνονται, έχουν αρνητικά αισθήματα και εντείνεται το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου.

Επιπλέον, μια σταθερή τιμή θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει εσωτερική θερμική δυσανεξία η οποία θα οδηγήσει σε υπερβολική ενεργειακή σπατάλη.

Προς το παρόν, ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα για τον υπολογισμό της θερμικής άνεσης των ανθρώπων είναι το μοντέλο του P.O. Fanger. Βρίσκει εφαρμογή, κατά βάση, σε άτομα που βρίσκονται σε χώρους όπου οι εσωτερικές συνθήκες θερμικής άνεσης είναι οι επιθυμητές και επηρεάζονται από τους περιβαλλοντικούς και προσωπικούς παράγοντες που προαναφέρθηκαν. Συσχετίζει το δείκτη PMV – Predicted Mean Vote (προβλεπόμενος δείκτης δυσφορίας) με έναν νέο δείκτη που ανέπτυξε ο Fanger και ονομάζεται PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied (προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων).

Αξίζει να γίνει μία σύντομη αναφορά και στα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό. Αρχικά, το πρότυπο της θερμικής άνεσης για την Αμερικανική Ένωση Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (ANSI/ASHRAE) έχει τον αριθμό 55 και τίτλο «Θερμικές περιβαλλοντικές συνθήκες για εσωτερικούς χώρους». Συνιστά όρια και επίπεδα θερμικών περιβαλλοντικών συνθηκών για την επίτευξη της άνεσης εσωτερικά σε όλους τους τύπους κτιρίων, με την πιο πρόσφατα αναθεωρημένη εκδοχή του να είναι αυτή του 2023. Εμπεριέχονται τόσο το μοντέλο του Fanger όσο και το προσαρμοστικό μοντέλο (adaptive model). Το πρώτο έχει καλύτερη εφαρμογή σε κτίρια που τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης είναι ενεργά, ενώ το δεύτερο βρίσκει καλύτερη εφαρμογή σε κτίρια που αυτά τα συστήματα είναι ανενεργά (free-running buildings). Το πρότυπο άνεσης για το Διεθνή Οργανισμό Προτύπων (ISO) δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 1984 και τιτλοφορείται ως «Μέτρια θερμικά περιβάλλοντα – καθορισμός PMV και PPD δεικτών και καθορισμός των συνθηκών για θερμική άνεση». Βρίσκει εφαρμογή σχεδόν παγκοσμίως, ενσωματώνει το μοντέλο του Fanger και έχει τον αριθμό 7730. Τέλος, υπάρχει το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 15251 (2012), το οποίο περιλαμβάνει τόσο το μοντέλο PMV/PPD όσο και το μοντέλο προσαρμογής και η αναθεωρημένη εκδοχή του, prEN 16798-2 (2014), συμπεριλαμβάνει δύο αλλαγές στο μοντέλο προσαρμοστικής άνεσης. Τα όρια διαφέρουν λίγο από το πρότυπο της ASHRAE.

Τα κτίρια, πέρα από την κάλυψη της θερμικής άνεσης, πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται με σκοπό την προστασία των ενοίκων από κάθε μορφής εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή να εξασφαλίζουν αποδεκτή ακουστική άνεση

λαμβάνοντας τα απαραίτητα μέτρα κτιριακής ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας ανάλογα με τον τύπο του κτιρίου και το σκοπό του.

Η ακουστική άνεση ενός κτιρίου είναι η ικανότητά του να προστατεύει τους ενοίκους του από εξωγενείς θορύβους και να παρέχει ακουστικό περιβάλλον ιδανικό για διαμονή ή κατάλληλες δραστηριότητες. Η ακουστική άνεση ενός χώρου προσδιορίζεται από ορισμένες ηχητικές παραμέτρους που αφορούν:

- τον αερόφερτο ήχο που παράγεται σε γειτονικούς χώρους
- τον κτυπογενή ήχο που επίσης παράγεται σε γειτονικούς χώρους
- τον αερόφερτο ήχο που προέρχεται από κοινόχρηστες ή ιδιωτικές εγκαταστάσεις του ίδιου κτιρίου
- τον αερόφερτο ήχο που τον παράγουν εξωτερικές πηγές

Ο ήχος ορίζεται ως «μια διακύμανση πίεσης με ένταση και μήκος κύματος» (ISO 3382-1, 2009). Η μονάδα μέτρησης της έντασης της πίεσης του ήχου είναι το ντεσιμπέλ (decibel – dB), η συχνότητά του μετράται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο (Hertz - Hz), η έντασή του σε ρηον ενώ επιπλέον χαρακτηρίζεται από την ηχητική ισχύ και τα επίπεδα ηχητικής πίεσης (SWL και SPL). Ο ήχος που γίνεται αντιληπτός από το ανθρώπινο αφτί κυμαίνεται μεταξύ συχνοτήτων 20 με 20000 Hz, με τα όρια να διαφέρουν από άνθρωπο σε άνθρωπο και για διαφορετικές ηλικίες.

Όλα τα νεόκτιστα κτίρια υπάγονται σε μία από τις επόμενες κατηγορίες ακουστικής άνεσης (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2023):

- Κατηγορία Α: Υψηλή ακουστική άνεση
- Κατηγορία Β: Κανονική ακουστική άνεση
- Κατηγορία Γ: Χαμηλή ακουστική άνεση

Τα γραφεία έχουν υψηλή ακουστική άνεση όταν ο μέσος όρος της έντασης κατά τη λειτουργία τους δεν ξεπερνά τα  $L_{A_{EQ,H}} = 35$  dB, κανονική ακουστική άνεση όταν δεν ξεπερνά τα  $L_{A_{EQ,H}} = 40$  dB, ενώ χαμηλή ακουστική άνεση όταν ξεπερνά τα 50 dB.

Φυσικά, δε θα πρέπει να παραλειφθεί η αναφορά στην οπτική άνεση καθώς ο φωτισμός, με τα σημερινά δεδομένα, έχει επίδραση στην υγεία, την ευεξία και την απόδοση των ανθρώπων. Ακόμη, είναι δυνατή όχι μόνο η αύξηση της εξοικονόμησης ενέργειας μέσω του ορθού φωτισμού, αλλά και η ένταξη πρόσθετων λειτουργιών, όπως η δυνατότητα προσαρμογής του συστήματος φωτισμού σύμφωνα με τις προσδοκίες και τις ανάγκες ενός ανθρωποκεντρικού φωτισμού (Human Centric Lighting – HCL).

Η οπτική άνεση ορίζεται ως «μία υποκειμενική κατάσταση της οπτικής ευεξίας που προκαλείται από το οπτικό περιβάλλον» (CEN, 2018). Αν και ο ορισμός αυτός υποδηλώνει ότι υπάρχει μια υποκειμενική διάσταση της άνεσης, ορισμένες φυσικές ιδιότητες του οπτικού περιβάλλοντος ορίζονται και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητάς του με αντικειμενικό τρόπο. Οι οπτικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από παραμέτρους όπως είναι: α) η κατανομή της φωτεινότητας, β) η φωτεινότητα και η ομοιομορφία της, γ) η αντανάκλαση, δ) το χρώμα του φωτός, ε) η απόδοση χρώματος και στ) η ποσότητα του φωτός ημέρας (CEN, 2011). Οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: i) διεύθυνση φωτός και σκίαση, ii) ένταση φωτός και iii) επάρκεια φυσικού φωτός (Al Horr et al., 2016).

Ενώ ικανοποιητικά επίπεδα οπτικής άνεσης μπορούν να επιτευχθούν με τεχνητό φως, οι περισσότεροι άνθρωποι προτιμούν το φυσικό, το οποίο σαφώς είναι δωρεάν και με σωστές επιλογές ανοιγμάτων ή υαλοπινάκων δίνει λύση σε ένα μεγάλο μέρος της υπερκατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.3. Ποιότητα αέρα

Η ποιότητα του αέρα, τόσο του εξωτερικού όσο και του εσωτερικού περιβάλλοντος, έρχεται ολοένα και περισσότερο στο προσκήνιο καθώς με την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας διεξάγονται έρευνες που αποδεικνύουν τη σημασία της. Μάλιστα, ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία που προέρχεται από εκπομπές ρύπων από πηγές εσωτερικών χώρων είναι περίπου 1000 φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο κίνδυνο λόγω έκθεσης σε εξωτερικούς ρύπους (WHO, 2010). Στα υποκεφάλαια που θα ακολουθήσουν δίδεται ο ορισμός του αέριου ρύπου, γίνεται εκτεταμένη αναφορά στα είδη των ρύπων, στα θεσμοθετημένα και μη, όρια ρύπων, στις πηγές τους, στο σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου καθώς επίσης παρουσιάζονται εν συντομία μελέτες που έχουν γίνει πάνω σε όλα τα προαναφερθέντα.

#### 2.3.1. Ρύποι & όρια

Αέριος ρύπος ονομάζεται κάθε είδος ουσίας, χημικής ένωσης ή ακτινοβολίας, σε ποσότητα ή διάρκεια τέτοια ώστε να δύναται να προκαλέσει άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα (Μπαρμπαρέσος, 2019).



Πρωταρχική κατηγοριοποίηση των ρύπων είναι η προέλευσή τους. Έτσι, διακρίνονται σε πρωτογενείς, όταν εκπέμπονται απευθείας από την πηγή προέλευσής τους, και δευτερογενείς, όταν δημιουργούνται από τους πρωτογενείς στην ατμόσφαιρα κατόπιν χημικών αντιδράσεων. Δεύτερη κατηγορία διαχωρισμού τους αποτελεί η κατάσταση στη οποία βρίσκονται στο περιβάλλον· δηλαδή στερεά, υγρή ή αέρια. Η τρίτη κατηγοριοποίηση αφορά τη χημική τους σύσταση. Κατ' αυτόν τον τρόπο υπάρχουν οι μη οργανικές ενώσεις που περιέχουν άνθρακα, οι πτητικές οργανικές ενώσεις, οι θειούχες και αζωτούχες ενώσεις και τέλος τα σωματίδια της ύλης. Η τέταρτη και τελευταία κατηγορία σχετίζεται με τις πηγές εκπομπής τους, οι οποίες είναι φυσικές (πυρκαγιές, εκρήξεις ηφαιστείων, αποσάθρωση εδάφους κ.α.) ή ανθρωπογενείς (συνεισφέρουν λιγότερο, προκαλούν ατμοσφαιρικά επεισόδια).

Τα χαρακτηριστικά του αέρα των εσωτερικών χώρων παρουσιάζουν ομοιότητες και διαφορές με αυτά του εξωτερικού περιβάλλοντος. Σε μοριακή ή σωματιδιακή κλίμακα, η φυσική και η χημεία των ρύπων είναι η ίδια. Ωστόσο, σε αντίθεση με την αστική ατμόσφαιρα, το εσωτερικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας προς όγκο ενώ κυριαρχούν μηχανισμοί όπως η εναπόθεση σωματιδίων, η διάχυση, η διασπορά και η προσρόφηση ρύπων από τα υλικά των επιφανειών, οι οποίοι απομακρύνονται κυρίως μέσω εξαερισμού.

Το εσωτερικό περιβάλλον ενός κτιρίου επηρεάζεται κατά βάση από παράγοντες όπως η τοποθεσία του, το τοπικό κλίμα, ο προσανατολισμός, τα δομικά του υλικά, η χρήση του, ο αερισμός και οι δραστηριότητες τις οποίες φιλοξενεί. Ταυτοχρόνως, η ποιότητα του αέρα μέσα σε αυτό καθορίζεται από ένα πλήθος φυσικών και βιολογικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, οι οσμές, ο θόρυβος κ.α.

Οι κύριες πηγές ρύπων που συναντώνται σε εσωτερικά περιβάλλοντα προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, εκπομπές του εξοπλισμού και των οικοδομικών υλικών, τα συστήματα HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) και τον ανθρώπινο ή ζωικό μεταβολισμό. Παράλληλα, υπάρχουν και οι πηγές του εξωτερικού περιβάλλοντος, που επηρεάζουν ως ένα βαθμό τον εσωτερικό αέρα, και έχουν χωριστεί σε έξι κατηγορίες που καλύπτουν τις πιο συχνά απαντώμενες σε ατομικές μελέτες: Θαλάσσιο/οδικό άλας, ορυκτή σκόνη, δευτερεύοντα ανόργανα αερολύματα (Secondary Inorganic Aerosols – SIA), οδική κυκλοφορία, σημειακές πηγές και καύση

βιομάζας. Η οικιακή θέρμανση με καύση άνθρακα (ή υποκατάστατα αυτού), αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα ρύπανσης στην Ευρώπη ως πηγή σωματιδιακής ύλης.

Εν συντομία, οι ρύποι που εμφανίζονται στον εσωτερικό αέρα, μερικοί εκ των οποίων παρουσιάζονται και στην Εικόνα 2.2, είναι οι παρακάτω:

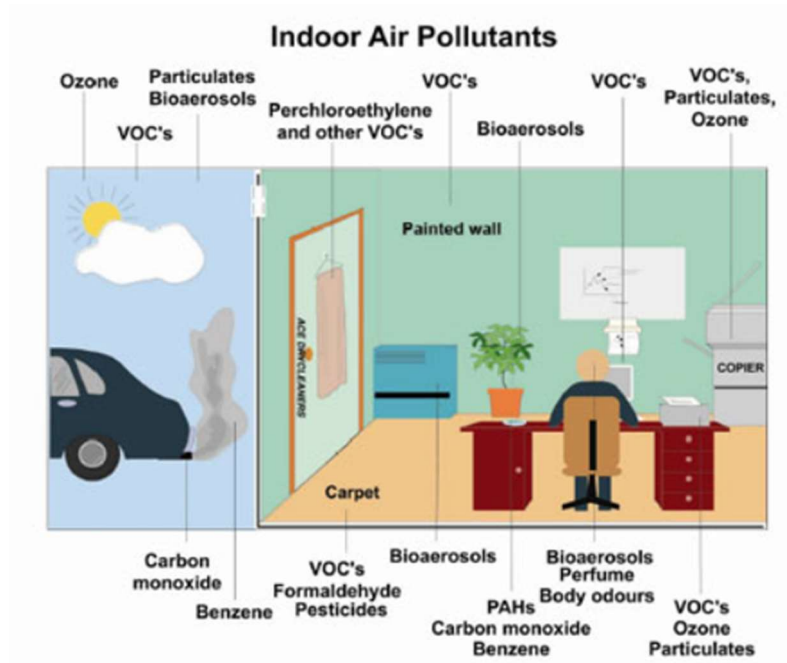
- Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate matter): Με τον όρο αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη (PM) ή αερολύματα (aerosols) χαρακτηρίζονται τα σωματίδια που βρίσκονται σε υγρή ή στερεή κατάσταση, η διάμετρός τους κυμαίνεται από  $10^{-3}$  έως 500  $\mu\text{m}$  και αιωρούνται στον αέρα για μερικά λεπτά ως και μερικές μέρες. Προέρχονται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι εξατμίσεις οχημάτων, οι εκπομπές εργοστασίων και βιομηχανιών, η σκόνη από το έδαφος, αλλά και εσωτερικά από κάθε είδους καύσεις (κάπνισμα, αρωματικά στικς, συσκευές θέρμανσης και φωτισμού), το μαγείρεμα, την επαναιώρηση συσσωρευμένης σκόνης (περπάτημα σε δάπεδο ή χαλί, σκούπισμα συμβατικό ή με ηλεκτρική σκούπα) και άλλες δραστηριότητες. Ταξινομούνται βάσει της προελεύσεώς τους, των φυσικών χαρακτηριστικών τους, των μηχανισμών δημιουργίας και εναπόθεσής τους, της χημικής τους σύστασης καθώς και των επιπτώσεών τους στην υγεία (Σαραγά, 2010).
- Πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds – VOCs): Οργανικές ενώσεις οι οποίες είναι παρούσες στην ατμόσφαιρα σε αέρια κατάσταση αλλά κάτω από ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης θα ήταν υγρές ή στερεές. Σχετίζονται με εκπομπές από οικοδομικά υλικά (εκπομπές υποβάθρου), βαφές και κόλλες, τον καπνό τσιγάρων, καθαριστικά και καλλωπιστικά προϊόντα κ.α. Φυσικές πηγές VOCs αποτελούν τα δάση, τα ηφαίστεια, οι πυρκαγιές κ.λπ. Ανθρωπογενείς εκπομπές (περιοδικές) σχετίζονται με την κίνηση των οχημάτων, τα εργοστάσια, τη χρήση φυσικού αερίου και άλλα.
- Φορμαλδεΰδη (HCHO): Η συγκεκριμένη χημική ένωση είναι μία από τις σπουδαιότερες VOCs και απελευθερώνεται από υλικά που χρησιμοποιούνται στην επιλοποιία, παραδείγματος χάριν το κόντρα πλακέ, οι μογιές, τα υφάσματα. Το εύρος εκπομπής εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού, την παλαιότητά του, τον τρόπο που έχει καλυφθεί κ.α. Για να εκτεθεί κάποιος σε αυτή χρειάζεται να εισέλθει στον εσωτερικό χώρο ενώ οι ανθρωπογενείς

δραστηριότητες και δη το κάπνισμα αποτελούν σημαντική πηγή της (Λαζαρίδης, 2018).

- Διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ): Αυτό το καφεκόκκινο τοξικό αέριο έχει χαρακτηριστική, έντονη οσμή και είναι ένας από τους σημαντικότερους αέριους ρύπους. Εκλύεται από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων, από βιομηχανικές δραστηριότητες αλλά και από συστήματα θέρμανσης ή κουζίνες φυσικού αερίου. Προκαλεί προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα, θολώνει την ατμόσφαιρα ενώ, σε συνδυασμό με άλλα αέρια, αποτελεί την αιτία της όξινης βροχής (US EPA).
- Μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ): Άχρωμο και άοσμο αέριο που είναι επιβλαβές όταν εισπνέεται σε μεγάλες ποσότητες καθώς προξενεί αρχικά ζαλάδα, απώλεια των αισθήσεων και τελικά θάνατο. Εξωτερικές πηγές  $\text{CO}$  αποτελούν, για άλλη μια φορά, τα οχήματα και οι βιομηχανίες, ενώ εσωτερικές πηγές είναι οι κουζίνες φυσικού αερίου, οι ξυλόσομπες, το κάπνισμα και γενικά χημικές αντιδράσεις ατελούς καύσης, καθώς εντοπίζεται στα προϊόντα τους (US EPA).
- Διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ): Είναι αέριο συστατικό της γήινης ατμόσφαιρας, άχρωμο, άοσμο, άγευστο ενώ ανήκει στα αέρια του θερμοκηπίου. Σχετίζεται με την εκπονή των έμβιων οργανισμών και αποτελεί ένδειξη της επαρκούς ή μη ανανέωσης αέρα εντός των χώρων. Εμφανίζεται στην ατμόσφαιρα ως προϊόν των αντιδράσεων καύσης υδρογονανθράκων και απομακρύνεται, λόγω της δέσμευσής του, κατά τη φωτοσύνθεση των φυτικών οργανισμών, πραγματοποιώντας ιδανικά – και όταν είναι σταθερό το ισοζύγιο – τον κύκλο του άνθρακα.
- Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες – ΠΑΥ (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons – PAHs): Είναι μία τάξη χημικών που εμφανίζονται φυσικά στο κάρβουνο, το ακατέργαστο πετρέλαιο, και τη βενζίνη ενώ εκπέμπονται και κατά την καύση ορυκτών καυσίμων, σκουπιδιών, ξύλων, καπνού για τσιγάρα ακόμα και με κάποιες τεχνικές μαγειρέματος. Η ναφθαλίνη είναι ένας από τους γνωστότερους ΠΑΥ, η οποία παράγεται και εμπορικά για την απομάκρυνση υγρασίας και σκόρων ή για την παρασκευή άλλων χημικών.
- Ραδόνιο ( $\text{Rn}$ ): Προέρχεται από τη ραδιενεργό διάσπαση του ραδίου ( $\text{Ra}$ ), το οποίο υπάρχει σε μεταλλεύματα ουρανίου ( $\text{U}$ ), φωσφορούχα πετρώματα και ορυκτά όπως ο γρανίτης, ο σχιστόλιθος και ο ασβεστόλιθος. Εισέρχεται στα

κτίρια από το έδαφος ενώ μπορεί να ανιχνευτεί στα οικοδομικά υλικά. Πρόκειται για άοσμο, άχρωμο και αόρατο αέριο που προκύπτει φυσικά, είναι ραδιενεργό και ισχυρά καρκινογόνο.

- Μόλυβδος (Pb): Η έκθεση στον εν λόγω ρύπο συμβαίνει δια μέσου του αέρα, του πόσιμου νερού, των τροφίμων, της μπογιάς αλλά και της σκόνης, ενώ παλαιότερα και μέσω της βενζίνης. Σε συνάρτηση με το βαθμό έκθεσης μπορεί να επηρεάσει το νευρικό, αναπαραγωγικό, ανοσοποιητικό και νευρικό σύστημα και κυρίως τα μικρά παιδιά.
- Βιολογικοί ρύποι – Βιοαερολύματα (Bioaerosols): Πηγές των συγκεκριμένων ρύπων είναι τα φυτά εσωτερικού χώρου, τα κατοικίδια ζώα, οι άνθρωποι και η σκόνη που εισέρχεται. Πρόκειται για έμβιες και άβιες ύλες όπως βακτήρια, μύκητες, ιοί, μούχλα, γύρη. Προξενούν αναπνευστικά προβλήματα καθώς είναι εισπνεύσιμα ενώ μέσω των αέριων ρευμάτων μπορούν να ταξιδέψουν σε έως και παγκόσμια κλίμακα.
- Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>): Είναι ένα άχρωμο αέριο με έντονη οσμή. Παράγεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, την τήξη θειούχων ορυκτών μεταλλευμάτων και τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Προκαλεί βλάβες στην ανάπτυξη των φυτών, στο αναπνευστικό των ανθρώπων, ελαττώνει την ορατότητα της ατμόσφαιρας και φθείρει πέτρινα και άλλα παρόμοια υλικά.
- Όζον (O<sub>3</sub>): Το όζον που υπάρχει στο επίπεδο της Γης (τροποσφαιρικό) είναι επιβλαβές, σε αντίθεση με το όζον που βρίσκεται στα ανώτερα επίπεδα της ατμόσφαιρας (στρατοσφαιρικό) και δημιουργεί ένα προστατευτικό στρώμα προστασίας από τις υπεριώδεις ακτίνες του ήλιου. Συνήθως σχηματίζεται μετά από χημικές αντιδράσεις NO<sub>x</sub> και VOCs παρουσία ηλιοφάνειας, γι' αυτό και παρατηρούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις το καλοκαίρι (US EPA). Οι κυριότερες πηγές εκπομπής του είναι τα αυτοκίνητα, οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, τα χημικά εργοστάσια και κάποια προϊόντα τους ενώ για το εσωτερικό περιβάλλον είναι συσκευές όπως οι ιονιστές, τα φωτοτυπικά μηχανήματα και οι εκτυπωτές.



Εικόνα 2.2: Κύριες πηγές ρύπανσης εσωτερικού περιβάλλοντος

Οι πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 2.1 – Πίνακας 2.6) περιέχουν πληροφορίες όπως τα αποδεκτά όρια των συνηθέστερων ρύπων με βάση τη διάρκεια έκθεσης σε αυτούς, από ποιους οργανισμούς έχουν προταθεί, την ημερομηνία έναρξης της θεσμοθέτησής τους κ.α.

Οργανισμός	Αποδεκτή συγκέντρωση VOC
WHO	< 0.05 ppm ή 0.25 mg/m <sup>3</sup>
RESET	< 0.25 ppm ή 500 µg/m <sup>3</sup>
LEED	< 0.25 ppm ή 500 µg/m <sup>3</sup>
OSHA	< 0.75 ppm (φορμαλδεΰδη)

Πίνακας 2.1: Κλίμακα έκθεσης σε συγκεντρώσεις συνολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC)  
(Atmotube, 2022)

	Επιτρεπόμενη συγκέντρωση SO <sub>2</sub>
Ωριαία	< 360 µg/m <sup>3</sup> και < 24 φορές/χρόνο
Ημερησίως	< 125 µg/m <sup>3</sup> και < 3 φορές/χρόνο

Πίνακας 2.2: Όρια έκθεσης των ανθρώπων σε διοξείδιο του θείου (European Environment Agency, 2008)

ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΟΡΙΑ
Μονοξειδίο του άνθρακα	CO	15min - 100 mg/m <sup>3</sup> 1h - 35 mg/m <sup>3</sup> 8h - 10 mg/m <sup>3</sup> 24h - 7 mg/m <sup>3</sup>
Βενζόλιο	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Κανένα ασφαλές επίπεδο έκθεσης
Φορμαλδεΰδη	CH <sub>2</sub> O	0,1 mg/m <sup>3</sup> (30min)
Ναφθαλίνη	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	0,01 mg/m <sup>3</sup> (ετησίως)
Διοξείδιο του αζώτου	NO <sub>2</sub>	1h - 200 µg/m <sup>3</sup> 40 µg/m <sup>3</sup> (ετησίως)
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	-	Δεν μπορεί να θεωρηθεί κατώτατο όριο (καρκινογόνο)
Ραδόνιο	Rn	Καρκινογόνο λόγω καπνίσματος (π.χ. 15x10 <sup>-5</sup> Bq/m <sup>3</sup> για καπνιστές 15-20 τσιγάρα/μέρα)
Τριγλωροαιθυλένιο	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	4,3x10 <sup>-7</sup> µg/m <sup>3</sup>
Τετραγλωροαιθυλένιο	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	0,25 mg/m <sup>3</sup> (ετησίως)

Πίνακας 2.3: Όρια έκθεσης ανθρώπων σε ορισμένους εσωτερικούς ρύπους σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO, 2010)

Αιωρούμενα σωματίδια	Θεσμοθετημένο όριο	Περίοδος έκθεσης	Όριο παράβασης	Ημερομηνία επίτευξης
PM <sub>10</sub>	50 μg/m <sup>3</sup>	24 ώρες	35 ημέρες	Σε ισχύ από την 1/1/2005
	40 μg/m <sup>3</sup>	Ένα έτος	-	Σε ισχύ από την 1/1/2005
PM <sub>2.5</sub>	25 μg/m <sup>3</sup>	Ένα έτος	-	Σε ισχύ από την 1/1/2015

Πίνακας 2.4: Οριακές τιμές για τα PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub> (E.E., 2008)

Συγκέντρωση CO <sub>2</sub>	Ποιότητα αέρα
600-800 ppm	Επαρκής αερισμός
>800 ppm	ανεπαρκής αερισμός
1000 ppm	Ανώτατο όριο για συνεχόμενη έκθεση 8 ωρών

Πίνακας 2.5: Χαρακτηρισμός αερισμού εσωτερικών χώρων βάσει της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> (ASHRAE, 2019)

Κατηγορία	Συγκέντρωση O <sub>3</sub> (ppm)
Καλή	0.000-0.054
Μέτρια	0.055-0.070
Ανθυγιεινή για ευπαθείς ομάδες	0.071-0.085
Ανθυγιεινή	0.086-0.105
Πολύ ανθυγιεινή	0.106-0.200

Πίνακας 2.6: Ποιότητα αέρα για οκτάωρη έκθεση σε όζον (EPA, 2015)

### 2.3.2. Σύνδρομο άρρωστου κτιρίου

Ο όρος σύνδρομο άρρωστου κτιρίου (SBS) ή σύνδρομο της ασθένειας των κτιρίων (Building Related Illness – BRI) χρησιμοποιείται για να περιγράψει καταστάσεις κατά τις οποίες οι ένοικοι ενός κτιρίου βιώνουν εξασθένηση της υγείας τους, έλλειψη άνεσης και μειωμένες επιδόσεις που συνδέονται με τις ώρες παραμονής τους στο κτίριο, χωρίς να μπορεί να ταυτοποιηθεί συγκεκριμένη ασθένεια ή αιτία. Είναι όρος που χρησιμοποιείται από το 1980 ενώ οι πρώτες παρατηρήσεις εμφανίστηκαν την περίοδο της ενεργειακής κρίσης το 1970. Έχει παρατηρηθεί κυρίως σε εργαζόμενους σε γραφεία, σχολεία και υπηρεσίες (Subri et al., 2024).

Τα συμπτώματα εκδηλώνονται με ποικίλους τρόπους όπως κούραση, κεφαλαλγίες, ναυτία, μυϊκούς πόνους, πνευματική δυσφορία, αίσθηση γρίπης ή ανεπαρκούς αερισμού, ρινικό και οφθαλμικό ερεθισμό, καταρροή, βραχνάδα και ξηροδερμία. Σημειώνεται πως αυτά τα συμπτώματα αρχίζουν από εργαζομένους που δεν είναι ιδιαίτερα υγιείς και σε βραχύ χρονικό διάστημα επεκτείνονται και σε υγιείς. Περίπου το 40% των συμπτωματικών ατόμων δεν μπορούν να καθορίσουν την ημερομηνία που ξεκίνησε η εξασθένηση της υγείας τους όμως μπορούν να το αποδείξουν εμπειρικά διότι με την αλλαγή περιβάλλοντος οι ενοχλήσεις σταματούν ή και εξαφανίζονται.

Το 1984 ο ΠΟΥ επεσήμανε πως πάνω από το 30% των νέων και ανακαινιζόμενων κτιρίων παγκοσμίως φιλοξενούσαν ενοίκους που έκαναν παράπονα για την εσωτερική ποιότητα του αέρα (EPA, 1991). Ακόμα, σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, χώρα πρωτοπόρο στην εγκατάσταση συστημάτων HVAC, μόλις το 60% των κτιρίων κρίθηκαν υγιή ενώ στο Χονγκ Κονγκ περίπου το 1/3 των κτιρίων θεωρούνται «άρρωστα», τόσο όσον αφορά χώρους εργασίας όσο και εμπορικά κέντρα. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται μέχρι και σήμερα, σχεδόν σε όλες τις μεγάλες πόλεις του κόσμου.

Αυτή η κατάσταση συχνά είναι παροδική, αλλά κάποια κτίρια αντιμετωπίζουν χρόνια προβλήματα, τα οποία ως επί το πλείστον προέρχονται από λειτουργία ή συντήρηση του κτιρίου που παραβαίνει τον αρχικό σχεδιασμό του. Οι συχνότερες αιτίες που οδηγούν σε SBS είναι οι κάτωθι:



- Ανεπαρκής αερισμός: Είτε δεν επαρκεί ο αριθμός των ανανεώσεων του αέρα (2.5 L/sec/άτομο για χώρους γραφείων σύμφωνα με την ASHRAE, 2019), είτε αυτός δε διαμοιράζεται σωστά στους χώρους του κτιρίου.
- Χημικοί ρύποι από εσωτερικές πηγές: Το μεγαλύτερο μέρος της αέριας ρύπανσης προέρχεται από το εσωτερικό περιβάλλον π.χ. κόλλες, κατεργασμένα ξύλινα προϊόντα, φωτοτυπικά μηχανήματα που εκπέμπουν VOCs.
- Χημικοί ρύποι από εξωτερικές πηγές: Μπορούν να εισέλθουν στο κτίριο μέσα από στόμια αεραγωγών τοποθετημένα σε λάθος σημεία, παράθυρα και λοιπά ανοίγματα.
- Βιολογικοί ρύποι: Βακτήρια, μούχλα, γύρη και ιοί μπορούν να δημιουργηθούν και να πολλαπλασιαστούν σε στάσιμα νερά που έχουν συλλεχθεί από αεραγωγούς, υγραντήρες και δοχεία αποστράγγισης ή ακόμα και ανάμεσα στα κεραμίδια της οροφής, τα χαλιά ή τη μόνωση.

Οι λύσεις στο σύνδρομο άρρωστου κτιρίου περιλαμβάνουν συνδυασμούς των ακόλουθων:

- Αφαίρεση ή τροποποίηση των πηγών των ρύπων: Όταν οι πηγές είναι γνωστές και ο έλεγχός τους εφικτός, μπορούν να γίνουν ενέργειες όπως η συχνή συντήρηση των συστημάτων ΘΨΚ (Θέρμανσης – Ψύξης – Κλιματισμού) και η αλλαγή φίλτρων στα χρονικά διαστήματα που προτείνει ο κατασκευαστής ενώ και η αντικατάσταση ή ο καθαρισμός χαλιών (συσσώρευση σκόνης και μούχλας) θα συμβάλει στη μείωση των εσωτερικών ρύπων.
- Αύξηση ρυθμού ανανέωσης αέρα: Τα συστήματα εξαερισμού πρέπει να λειτουργούν τουλάχιστον στα κατώτατα όρια σχεδιασμού και κατά προτίμηση με βάση το πρότυπο που προαναφέρθηκε.
- Καθαρισμός αέρα: Μπορεί να είναι πολυέξοδος αλλά τα σωστά φίλτρα αέρα εγκλωβίζουν την πλειοψηφία των μικρότερων, εισπνεόμενων σωματιδίων.
- Εκπαίδευση και επικοινωνία: Τόσο για την πρόληψη όσο και την αντιμετώπιση του προβλήματος, οι ένοικοι, οι διαχειριστές, τα συνεργεία συντήρησης πρέπει να κατανοούν τις αιτίες και συνέπειες της κακής ποιότητας του αέρα.

Προκειμένου να αποφευχθούν τα προηγούμενα ζητήματα, υπάρχουν πρότυπα και πιστοποιήσεις για την ορθή λειτουργία των κτισμάτων. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η πιστοποίηση WELL ενός κτιρίου περιλαμβάνει 10

παράγοντες, εκ των οποίων οι 4 (φωτισμός, ήχοι, θερμική άνεση, ποιότητα αέρα) σχετίζονται με τη μετρήσιμη ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος των χώρων (Licina et al., 2021). Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τον αέρα, πρέπει να πληρούνται τέσσερις προϋποθέσεις: 1) η ποιότητά του να είναι σύμφωνη με τα όρια για τους ρύπους σωματιδιακής ύλης (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), οργανικών αερίων (βενζόλιο, φορμαλδεΐδη, τολουόλιο και TVOC), ανόργανων αερίων (CO και O<sub>3</sub>), 2) να υπάρχουν χώροι χωρίς καπνό, 3) να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των συμβατικών προτύπων εξαερισμού των κτιρίων και 4) να γίνεται σωστή διαχείριση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κατά τη την κατασκευή και ανακαίνιση του κτιρίου.

### 2.3.3. Μελέτες IAQ

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αξίζει να γίνει αναφορά στη μελέτη των Licina και Langer (2021) που αφορούσε την αποτελεσματικότητα του πιστοποιητικού WELL και την αλλαγή στην IAQ (Indoor Air Quality) κατά τη μετακόμιση τεσσάρων κτιρίων γραφείων (δύο κτίρια A και δύο B) σε τέσσερα νέα με πιστοποίηση WELL. Τα πρώτα δύο (A) είχαν ήδη πιστοποίηση BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) και τα άλλα δύο ήταν συμβατικά (B). Συλλέχθηκαν πληροφορίες για τα επίπεδα των κυριότερων ρύπων που συναντώνται σε χώρους γραφείων και περιλαμβάνουν τις πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOC και μεμονωμένες VOCs), φορμαλδεΐδη (HCHO) και ακεταλδεΐδη (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) και όζον (O<sub>3</sub>), με τους τρεις τελευταίους να εισέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον μέσω του εξαερισμού και των φίλτρων αέρα. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν ήταν τα εξής:

- Τα επίπεδα CO<sub>2</sub> ήταν αρχικά εντός ορίων και στις δύο περιπτώσεις αλλά αυξήθηκαν στη δεύτερη περίπτωση μετά τη μετακόμιση, λόγω καλύτερης στεγανότητας του κτιρίου.
- Η συγκέντρωση PM<sub>2.5</sub> ήταν σύμφωνα με τα όρια όλες τις ώρες, γεγονός που υποδηλώνει την εξάρτησή της από τον εξωτερικό αέρα.
- Η συγκέντρωση PM<sub>10</sub> ήταν επίσης εντός ορίων, ακόμα και κατά τις ώρες εργασίας, που αυξανόταν λόγω των εργαζομένων.
- Οι συγκεντρώσεις O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub> ήταν μέσα στα επιτρεπόμενα όρια.

- Τα επίπεδα των TVOC αυξήθηκαν μετά τις μετακομίσεις καθώς έτσι είθισται να συμβαίνει λόγω των καινούργιων δομικών υλικών και βαφών. Μέσα σε έξι μήνες επανήλθαν σε φυσιολογικά επίπεδα.
- Οι συγκεντρώσεις της φορμαλδεΐδης αυξήθηκαν, φτάνοντας κοντά στο ανώτατο όριο. Ήταν χαμηλότερες τη χειμερινή περίοδο, σε αντίθεση με τις VOCs που ήταν υψηλότερες.
- Τα επίπεδα της ακεταλδεΐδης έμειναν σταθερά καθώς είναι πιο ισχυρά εξαρτώμενα από τις δραστηριότητες των ανθρώπων παρά από τα δομικά υλικά.

Πολύ σημαντικά συμπεράσματα προέκυψαν και από την μελέτη των Sakellaris et al. (2023) η οποία εκπονήθηκε σε 8 κτίρια γραφείων στη Δυτική Μακεδονία. Οι παράμετροι αφορούσαν την τοποθεσία των κτιρίων (κακή ποιότητα αέρα λόγω της παραγωγής ενέργειας από λιγνίτη) αλλά και το γεγονός ότι μελετήθηκαν την περίοδο αμέσως μετά την πανδημία. Ορισμένα από τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα ακόλουθα:

- Τα πιο συχνά συμπτώματα που καταγράφηκαν, λόγω του συνδρόμου του άρρωστου κτιρίου, ήταν ο πονοκέφαλος, η οφθαλμική ξηρότητα και το φτάρνισμα. Ο αριθμός των εργαζομένων που τα εμφάνισε δεν ήταν διόλου αμελητέος.
- Οι μετρήσεις των αέριων ρύπων ανέδειξαν την επίδραση τόσο των εσωτερικών όσο και των εξωτερικών πηγών ρύπανσης ωστόσο σε όλα τα κτίρια η φορμαλδεΐδη, η ακετόνη και η ακεταλδεΐδη ήταν σημαντικά υψηλότερες, καταδεικνύοντας την κυριαρχία των εσωτερικών πηγών.
- Οι τιμές LCR (Lifetime Cancer Risk) που υπολογίστηκαν υποδεικνύουν πως η μακροχρόνια παραμονή στα υπό μελέτη κτίρια εγκυμονεί κινδύνους καρκινογένεσης ακόμη και στην περίπτωση της φορμαλδεΐδης, που ήταν εντός των επιτρεπτών ορίων (US EPA).

Προχωρώντας σε μία ακόμη μελέτη, ο Bari et al. (2015) διερεύνησαν τις πηγές εκπομπής VOCs και τη συνεισφορά τους στις εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις σε κατοικίες στο Edmonton του Καναδά. Συλλέχθηκαν 7 διαδοχικά δείγματα που μετρούσαν για 24 ώρες, εσωτερικά και εξωτερικά σε 50 σπίτια μη καπνιστών το καλοκαίρι και το χειμώνα του 2010. Αναλύθηκαν συνολικά 193 είδη πτητικών οργανικών ενώσεων με τη μέθοδο GC – MS, η οποία επιλέχθηκε και στην

παρούσα διπλωματική. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των κατοικιών, τις δραστηριότητες των σπιτιών και τις καιρικές αλλαγές μεταξύ των δύο εποχών, συμπέραναν πως οι εσωτερικές VOCs ήταν σταθερά υψηλότερες από τις εξωτερικές. Ειδικότερα, εφαρμόζοντας την PMF ως μέθοδο source apportionment, προέκυψαν οι εξής παράγοντες για τους εσωτερικούς χώρους:

- Παράγοντας 1: Μεγάλο κλάσμα μάζας κατείχε η αιθανόλη και στη συνέχεια οι ουσίες ethyl acetate, acetaldehyde, acetone, 1-propanol και DCE (1,2-DiChloroEthane). Η αιθανόλη χρησιμοποιείται ευρέως ως διαλύτης σε οικιακά καθαριστικά όπως το λευκαντικό και το απορρυπαντικό σε απολυμαντικά κ.α. Η ακετόνη και ο οξικός αιθυλεστέρας βρίσκεται σε ασετόν, λαδομπογιές, ταπετσαρίες κ.λπ., η ακεταλδεΐδη σε αποσμητικά χώρου και η 1-προπανόλη σε απορρυπαντικά πιάτων. Επομένως αποδόθηκε σε οικιακά προϊόντα αποτελώντας το 44% των συνολικών παραγόντων.
- Παράγοντας 2: Διακρίνεται από  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene, camphene και σε μικρότερα ποσοστά από styrene, p-cymene και limonene. Αυτές οι ουσίες εντοπίζονται σε αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα (αποσμητικά, κολόνιες, μαλακτικά ρούχων,...) και εκεί αποδόθηκε αυτός ο παράγοντας, με ποσοστό μόλις 2.3%.
- Παράγοντας 3: Οι κυριότερες ουσίες είναι hexanal, butyl acetate, formaldehyde, 2-heptanone, 1-butanol, cyclohexanone και benzaldehyde οι οποίες εκλύονται από ξύλινα και χάρτινα υλικά, βαφές λάτεξ, βερνίκια, καθαριστικά χαλιών κ.α. Αυτός ο παράγοντας αναπαριστά τις εκλύσεις των δομικών υλικών και αποτελεί το 5.9%.
- Παράγοντας 4: Σχετίζεται με τις ταπετσαρίες και τις επενδύσεις των πατωμάτων σε ποσοστό 2.1% με χαρακτηριστικές χημικές ενώσεις τις εξής: decane, nonane, undecane, dodecane, TMB (TriMethylBenzene) isomers, n-butylbenzene, n-propylbenzene, ethyltoluene isomers, octane. Αυτές εκπέμπονται από τα χαλιά, τις ταπετσαρίες, τα κεραμίδια και το μονωτικό αφρό.
- Παράγοντας 5: Εντοπίζονται heptane, methylhexane, methylcyclohexane, dimethylhexane, MEK (Methyl-Ethyl-Ketone) και

MIBK (methyl-isobutyl-ketone) τα οποία συναντώνται ως διαλύτες σε κόλλες και μπογιές και εν προκειμένω απαρτίζουν το 3% του συνόλου.

- Παράγοντας 6: Αποτελείται κυρίως από limonene, β-pinene, ethyl acetate, dodecane, p-DCB (1,4-DiChloroBenzene), naphthalene και 1,1,1-Trichloroethane τα οποία συσχετίζονται με αρωματικά χώρου και σκοροαπωθητικά σε ποσοστό 8.4%.
- Παράγοντας 7: Βρέθηκαν κυρίως αλκένια, όπως το trans-2-pentene, το cis-2-butene, το trans-2-butene, το 1-pentene, το, 2-methyl-2-butene και το 3-methyl-1-butene, τα οποία συνδέθηκαν με εξάτμιση καυσίμων που συνεισφέρει σε ποσοστό 2.2%.
- Παράγοντας 8: Χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα αλογονωμένων VOCs (π.χ. freon, carbon tetrachloride, bromomethane, chloromethane κ.α.) για τα οποία ευθύνεται το λευκαντικό και το νερό βρύσης σε ποσοστό 3.6%.
- Παράγοντας 9: Αποτελεί μίξη εσωτερικών και εξωτερικών συνεισφορών, αφορά το 10.5% και ταυτοποιείται ως «διαδικασίες καύσης και κάπνισμα τσιγάρου». Χαρακτηρίζεται κυρίως από butanal, isobutanal, acetone, acetaldehyde, MVK (Methyl-Vinyl-Ketone) και 2-methyl-2-propenal, τα οποία προέρχονται από διάφορες πηγές εσωτερικής καύσης όπως ηλεκτρικές κουζίνες, κεριά, μπάρμπεκιου και φωτιές στα δάση.
- Παράγοντας 10: Αυτός (όπως και οι επόμενοι παράγοντες) προέρχεται από εξωτερικές πηγές και συγκεκριμένα από βιομηχανίες καυσίμων (π.χ. διυλιστήρια πετρελαίου) συνεισφέροντας στο 10.3%. Ιχνηθέτες του είναι ενώσεις όπως αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο, ισοβουτάνιο, αιθυλένιο, ακετυλένιο, 1,3-βουταδιένιο και προπένιο.
- Παράγοντας 11: Ταυτοποιείται με ουσίες όπως ethyltoluene isomers, TMB isomers, propylbenzene, ethylbenzene, benzene, toluene τα οποία ναί μεν βρίσκονται και εντός της οικίας αλλά αποδίδονται κατά κόρον σε μηχανές εσωτερικής καύσης (κίνηση οχημάτων), σε ποσοστό 2.7%.
- Παράγοντας 12: Είναι πλούσιος σε dimethylcyclohexane, methylheptane, octane, methylcyclohexane, xylene isomers και

ethylbenzene, χημικές ουσίες που εντοπίζονται στη βενζίνη. Συνεισφέρει στο 3.5%.

- Παράγοντας 13: Αποτελεί το 1.5%. Διακρίνεται από αφθονία σε methylpentane, dimethylbutane, hexane, isopentane, methylcyclopentane, cyclopentane και pentane, τα οποία εκπέμπονται από πετροχημικά εργοστάσια και από την εξάτμιση της βενζίνης (κίνηση οχημάτων).

#### Εξωτερικές πηγές VOCs:

- Παράγοντας 1: Βιομηχανία πετρελαίου, σε ποσοστό 21% επί των συνολικά μετρούμενων VOC.
- Παράγοντας 2: Εκπομπές από την κίνηση οχημάτων, αποτελώντας το 15%. Ταυτοποιήθηκε από την παρουσία ethyltoluene isomers, TMB isomers, xylene isomers, ethylbenzene, propylbenzene και butylbenzene.
- Παράγοντας 3: Χαρακτηρίζεται από υψηλή παρουσία αλογωνωμένων VOCs, οι οποίες σχετίζονται με βιομηχανικές εκπομπές και διαχείριση αποβλήτων καθώς επίσης έχουν μεγάλη διάρκεια παραμονής στην ατμόσφαιρα, θεωρώντας τις παγκόσμιους ρυπαντές. Συνεισφέρει στο 13%.
- Παράγοντας 4: Βρέθηκαν ισοπρένιο και μονοτερπένια (α-πινένιο, β-πινένιο) που συσχετίζονται με δέντρα και θάμνους, γι' αυτό και τους καλοκαιρινούς μήνες ήταν μεγαλύτερη η συνεισφορά αυτού του παράγοντα (λόγω εντονότερης ηλιοφάνειας εντείνεται και η φωτοσύνθεση, η οποία συνδέεται με το ισοπρένιο).
- Παράγοντας 5: Σχετίζεται με τον καπνό, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στο εσωτερικό, και ταξινομείται ως «καύση βιομάζας και ETS (Environmental Tobacco Smoke)» καθότι έλαβαν χώρα και αρκετές δασικές πυρκαγιές κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Αποτελεί το 9.7%.
- Παράγοντας 6: Ερμηνεύεται ως «βιομηχανικές εκπομπές και εκπομπές εξατμίσεων οχημάτων» και συνοδεύεται από ισχυρή παρουσία

αλκενίων όπως και isopentane, butane, dimethylbutane, 2-methylpentane. Αφορά στο 8.6% του συνόλου.

- Παράγοντας 7: Αποδόθηκε στην παραγωγή και αποθήκευση της βενζίνης λόγω των dimethylcyclohexane, 2,2-dimethylbutane, methylheptane, methylpentane, pentane, hexane και octane. Αφορά στο 6.4%.
- Παράγοντας 8: Αφορά την ξυλουργία και επηρεάζεται από τις ενώσεις hexanal, butyl acetate, ethanol, naphthalene, 1-butanol και 2-heptanone. Αποτελεί το 7.2%
- Παράγοντας 9: Ήταν έντονα εμπλουτισμένος με isopropyl alcohol η οποία στο Edmonton εκπέμπεται από τα χημικά εργοστάσια και τις φαρμακοβιομηχανίες. Συνεισφέρει στο 5.1%.
- Παράγοντας 10: Τα χαρακτηριστικά είδη που βρέθηκαν σε αυτόν τον παράγοντα, που αποτελείτο 3.3%, ήταν τερπένια, όπως το λιμονένιο, το στυρένιο και τα πινένια, καθώς και κάποια ανώτερα αλκάνια. Αυτά εκλύονται από βιομηχανικούς διαλύτες, χαρτοβιομηχανίες και αυτοκινητοβιομηχανίες.

Κλείνοντας, στη μελέτη των Chatoutsidou et al. (2015) διερευνήθηκε ο λόγος του αριθμού και της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης (PM) στο εσωτερικό περιβάλλον προς το εξωτερικό, για δύο κτίρια γραφείων με μηχανικό εξαερισμό στο Όσλο της Νορβηγίας. Επισημαίνεται πως η παρουσία των εργαζομένων έχει ισχυρό αντίκτυπο στα σύγχρονα περιβάλλοντα, όχι μόνο παράγοντας νέα σωματίδια στο εσωτερικό, αλλά και στην επαναιώρηση των υφιστάμενων σωματιδίων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συγκέντρωση σε PM<sub>10</sub> είναι υψηλότερη κατά τις ώρες εργασίας σε σχέση με τις κενές ώρες ενώ ο λόγος εσωτερικά/εξωτερικά ακολουθεί το ίδιο μοτίβο.

#### 2.4. Πτητικές οργανικές ενώσεις

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) είναι χημικές ενώσεις που έχουν χαμηλή υδατοδιαλυτότητα και υψηλή τάση ατμών, επομένως μπορούν να εξατμίζονται στον αέρα. Αποτελούν μία από τις σημαντικότερες ομάδες ενώσεων που διερευνώνται στο εσωτερικό περιβάλλον των κτιρίων. Σε εσωτερικούς χώρους προέρχονται από

ανθρώπινες δραστηριότητες και εκπομπές κτιριακών υλικών ή διεισδύουν απ' έξω, ενώ οι συγκεντρώσεις πολλών από αυτές είναι αποδεδειγμένα σταθερά υψηλότερες από ότι σε εξωτερικούς χώρους. Στον Πίνακα 2.7 καταγράφονται στην ελληνική και την αγγλική γλώσσα όλες οι πτητικές οργανικές ενώσεις που υπάρχουν, καθώς και ο χημικός τύπος τους.

Ελληνική ονομασία	Αγγλική ονομασία	Χημικός τύπος
Ακεταλδεΐδη/αιθανάλη	Acetaldehyde	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O
Ακετόνη/προπανόνη	Acetone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O
Ακρολεΐνη/προπενάλη	Acrolein/propenal	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O
Βενζαλδεΐδη	Benzaldehyde	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O
Βενζόλιο	Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
Βενζυλοχλωρίδιο/α-χλωροτολουόλιο	Benzylchloride/A-chlorotoluene	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> Cl
1-Βουτανόλη	1-Butanol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O
Βουτανόνη/2-οξοβουτάνιο/β-κετοβουτάνιο/ αιθυλομεθυλοκετόνη/ αιθυλομεθυλοφορμαλδεΐδη	Butanone/Methyl ethyl ketone	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O
2-Βουτοξυαιθανόλη	2-Butoxyethanol	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>
Βουτυλεστέρας	Butyl acetate	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>
n-Βουτυλοβενζόλιο	n-Butylbenzene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>
n-Βουτυραλδεΐδη/βουτανάλη/ βουτυρική αλδεΐδη	n-Butyraldehyde/Butanal	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O
Καμφένιο	Camphene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>
Τετραχλωράνθρακας/τετραχλωρομεθάνιο	Carbon tetrachloride/Tetrachloromethane	CCl <sub>4</sub>
3-Καρένιο	3-Carene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>
Χλωροαιθάνιο	Chloroethane	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl
Κυκλοεξάνιο	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
-	p-Cymene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>
Δεκανάλη	Decanal	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O
Δεκάνιο	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>
1,4-Διχλωροβενζόλιο	1,4-Dichlorobenzene	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>
1,1-Διχλωροαιθάνιο	1,1-Dichloroethane	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>
1,2-Διχλωρομεθάνιο	1,2-Dichloromethane	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
2,6-Διμεθυλ-7-οκτεν-2-όλη	Dihydromyrcenol	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O
Διμεθυλοεξάνιο	Dimethylhexane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
Δωδεκάνιο	Dodecane/dihexyl/bihexyl/ adakane 12/duodecan	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
Αιθανόλη/οινόπνευμα/αλκοόλ	Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O
Αιθανικός αιθυλεστέρας ή οξικός αιθυλεστέρας	Ethyl acetate/ethyl ethanoate	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>



Αιθυλοβενζόλιο/αιθυλοβενζένιο/φαινυλαιθένιο/ αιθυλοκυκλοεξατρίνιο	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
2-Αιθυλεξανόλη	2-Ethylhexanol	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O
-	Ethyltoluene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
Φορμαλδεΐδη/μεθανάλη	Formaldehyde	CH <sub>2</sub> O
Γλυοξάλη/αιθανοδιάλη	Glyoxal	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
n-Επτανάλη	n-Heptanal	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O
n-Επτάνιο	n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2-Επτανόνη	2-Heptanone/Methyl n-amyl ketone	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O
Εξανάλη/εξαναλδεΐδη/καπροαλδεΐδη	Hexanal/Hexanaldehyde/Caproaldehyde	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O
n-Εξάνιο	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
Λιμονένιο	D-Limonene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>
Λιναλοόλη	Linalool	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O
Μεθυλο βουτυλο κετόνη/2-εξανόνη	Methyl butyl ketone	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O
Μεθυλοκυκλοεξάνιο	Methylcyclohexane/Cyclohexylmethane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
Χλωρομεθάνιο	Methylene chloride	CH <sub>2</sub> Cl
Διχλωρομεθάνιο/μεθυλενοδιχλωρίδιο	Methylene dichloride/dichloromethane	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
Μεθυλεξάνιο/ισοεπτάνιο	Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
Μεθυλο-ισοβουτυλο-κετόνη/ 4-μεθυλ 2-πεντανόνη	Methyl isobutyl ketone/ 4-methylpentan-2-one	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O
Ναφθαλίνιο/ναφθαλίνη	Naphthalene	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>
n-Εννεάνιο	n-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
Εννεαλδεΐδη	Nonana	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O
n-Οκτάνιο	n-Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
Οκτανάλη	Octanal	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O
α,β-Πινένιο	α,b-Pinene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>
Προπανάλη/προπιοναλδεΐδη	Propanal/Propionaldehyde	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O
1-Προπανόλη	1-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O
Προπένιο/προπυλένιο	Propylene/propene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
Στυρένιο/στυρόλιο/αιθενυλοβενζόλιο/ βινυλοβενζόλιο/φαινυλοαιθένιο/φαινυλοαιθυλένιο	Styrene/Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>
Τετραχλωροαιθυλένιο	Tetrachloroethylene	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>
Τολουόλιο	Toluene/toluol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>
Τριχλωροαιθυλένιο	Trichloroethylene	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>
Τριχλωροφθορομεθάνιο/Φρέον-11/ Χλωροφθοράνθρακας-11/Ψυκτικό-11	Trichlorofluoromethane/Freon-11/ CFC-11/R-11	CCl <sub>3</sub> F
1,2,4-Τριαθυλοβενζόλιο	1,2,4-Triethylbenzene	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>
Τριμεθυλοβενζόλιο	Trimethylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
Ενδεκάνιο	Undecane/Hendecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
Ξυλόλιο/ξυλόλη/διμεθυλοβενζόλιο	Xylene/xylo/dimethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>

Πίνακας 2.7: Καταγραφή όλων των πτητικών οργανικών ενώσεων (Canada Government, 1999)

Κάποιες από τις συχνότερα εμφανιζόμενες πτητικές οργανικές ενώσεις, οι οποίες θα μελετηθούν και στην παρούσα εργασία εκτενέστερα, είναι οι εξής:

- Βενζόλιο ( $C_6H_6$ ): Είναι οργανική ένωση, άχρωμη και φυσικό συστατικό του αργού πετρελαίου με ιδιαίτερα φωτιστικό αποτέλεσμα (φωταέριο). Έχει χαρακτηριστική οσμή βενζίνης, είναι αρκετά πτητικό, επιβλαβή και καρκινογόνο και τοξικό, καθώς εδώ και πολλά χρόνια υπάρχει μακροχρόνια έκθεση σε αυτό, ιδιαίτερα σε εργασιακούς χώρους. Χρησιμοποιείται ευρύτατα ως βιομηχανικός διαλύτης και για την παραγωγή πλήθους ενώσεων (από πλαστικά και ελαστικά μέχρι χρώματα και φάρμακα). Οι βασικές πηγές βενζολίου στην ατμόσφαιρα είναι ανθρωπογενείς και η έκθεση των ανθρώπων σε αυτό συνήθως οφείλεται στον καπνό τσιγάρου, την έντονη κυκλοφορία οχημάτων, τα μολυσμένα ύδατα ή τρόφιμα αλλά και τις δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων.
- Λιμονένιο ( $C_{10}H_{16}$ ): Το λιμονένιο είναι ένας υδρογονάνθρακας ταξινομημένος ως μονοκυκλικό τερπένιο. Είναι άχρωμο υγρό σε θερμοκρασία δωματίου και έχει δυο μορφές: το l-limonene και το d-limonene. Το πρώτο έχει μυρωδιά πεύκου, ενώ το δεύτερο, εξαιρετικά ισχυρό άρωμα εσπεριδοειδών, γι' αυτό και παίρνει το όνομά του από το λεμόνι. Χρησιμοποιείται σε αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα (αποσμητικά, κολόνιες, καθαριστικά κ.α.) και, ενώ δεν είναι τοξικό και μεταλλαξιογόνο, είναι εύφλεκτο και ερεθιστικό.
- Πινένιο ( $C_{10}H_{16}$ ): Ανήκει, όπως και το λιμονένιο, στην κατηγορία των τερπενίων. Πρόκειται για διαυγές, άχρωμο υγρό, αδιάλυτο στο νερό, με άρωμα τερπεντίνης (βρίσκεται σε πληθώρα φυτών και αιθέριων ελαίων). Χρησιμοποιείται ως διαλύτης. Έχει αντιφλεγμονώδη και αντικαρκινική δράση ωστόσο προκαλεί ερεθισμό. Τα δύο ισομερή του είναι το α-pinene και β-pinene.
- Τολουόλιο ( $C_7H_8$ ): Το τολουόλιο είναι ένα εύφλεκτο, ερεθιστικό και επικίνδυνο για την υγεία άχρωμο υγρό με διαπεραστική οσμή. Υπάρχει φυσικά στο ακατέργαστο πετρέλαιο ενώ εκπέμπεται κατά το κάπνισμα

και κατά τη διαδικασία παραγωγής καυσίμων και κοκ. Χρησιμοποιείται σε βαφές, διαλύτες, μανό, λακ, κόλλες και παρόμοιας φύσης προϊόντα.

- **Ξυλόλιο (C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>):** Συναντάται ως διαυγές άχρωμο υγρό με χαρακτηριστικό γλυκό άρωμα και τρία ισομερή (meta-xylene, ortho-xylene και para-xylene ή m-xylene, o-xylene και p-xylene αντιστοίχως). Είναι αδιάλυτο στο νερό, εύφλεκτο και ερεθιστικό. Εντοπίζεται φυσικά στο πετρέλαιο και την πίσσα ενώ με αυτό παρασκευάζονται διαλύτες για βαφές και κόλλες, βερνίκια και άλλα χημικά.
- **Στυρένιο (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>):** Το στυρένιο ή στυρόλιο είναι ένα ελαφρώς σκούρο αρωματικό υγρό, εύφλεκτο, δυσδιάλυτο στο νερό, ερεθιστικό για το βλεννογόνο και τα μάτια και επικίνδυνο για την υγεία. Η χρήση του αφορά κυρίως στην κατασκευή πλαστικών, βαφών, μονώσεων και συνθετικού καουτσούκ ενώ στη φύση εντοπίζεται σε διάφορα τρόφιμα.
- **Εξάνιο (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>):** Το n-hexane είναι ένα εύφλεκτο, ερεθιστικό και επικίνδυνο, για την υγεία και το περιβάλλον, υγρό χωρίς χρώμα και με μυρωδιά παρόμοια με του πετρελαίου. Είναι αδιάλυτο στο νερό, μη μεταλλαξιογόνο ενώ χρησιμοποιείται ως διαλύτης σε μπογιές και κόλλες και βρίσκεται σε μικρές ποσότητες στη βενζίνη.
- **Οκτάνιο (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>):** Πρόκειται για εύφλεκτο και επικίνδυνο, για την υγεία και το περιβάλλον, υγρό με οσμή σαν της βενζίνης. Είναι δυσδιάλυτο στο νερό, μη μεταλλαξιογόνο, εκλύει ερεθιστικούς ατμούς και έχει ναρκωτικές ιδιότητες σε υψηλές συγκεντρώσεις. Προέρχεται από το ακατέργαστο πετρέλαιο και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους αλειφατικούς υδρογονάνθρακες.
- **Ναφθαλίνιο (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>):** Η ναφθαλίνη είναι ένα ερεθιστικό, επικίνδυνο, για την υγεία και το περιβάλλον, λευκό, κρυσταλλικό στερεό με οξεία οσμή σαν πίσσα. Είναι πολυκυκλικός αρωματικός υδρογονάνθρακας, αδιάλυτος στο νερό, εκπέμπει τοξικούς ατμούς και χρησιμοποιείται ως σκοροαπωθητικό, εντομοκτόνο, λιπαντικό κ.α.
- **Τριμεθυλοβενζόλιο (C<sub>9</sub>H<sub>12</sub>):** Είναι εύφλεκτο, ερεθιστικό και επικίνδυνο

για την υγεία και παράγεται κατά τη διύλιση του πετρελαίου. Τα ισομερή του είναι τα 1,2,3-trimethylbenzene, 1,3,5-trimethylbenzene και 1,2,4-trimethylbenzene. Είναι επίσης υγρό, αδιάλυτο στο νερό και χρησιμοποιείται σε μπογιές και φαρμακευτικά προϊόντα και ως πρόσθετο στη βενζίνη, όμως η επαφή με αυτό μπορεί να γίνει και μέσω του νερού ή των τροφίμων.

Η ικανότητα των VOCs να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία ποικίλει, από εκείνες που είναι εξαιρετικά τοξικές έως εκείνες με πιο ήπια δράση. Ο βαθμός επίδρασης και οι επιπτώσεις εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως ο χρόνος έκθεσης και η συγκέντρωση ρύπου.

Συνήθεις πηγές πτητικών ενώσεων στο εσωτερικό των κτιρίων αποτελούν οι βαφές, τα διαλυτικά, τα καθαριστικά προϊόντα, αποθηκευμένα καύσιμα και εν γένει τα σπρέι όπως τα αποσμητικά, τα εντομοαπωθητικά, τα αρωματικά χώρου κ.α. Ακόμη, είναι ισχυρή η επίδραση των διάφορων δομικών υλικών και της καύσης, είτε πρόκειται για θέρμανση είτε για μαγειρική. Στο εξωτερικό περιβάλλον, εκπέμπουν VOCs κατά κόρον η κίνηση και οι εξατμίσεις των οχημάτων, αλλά ακόμα και πηγές που δε θα μπορούσε πιθανώς κάποιος να φανταστεί, όπως τα φυτά, οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) ή η ρύπανση από πετρέλαιο. Σαφώς, μπορούν να εισχωρήσουν εντός του κτιρίου με ποικίλους τρόπους όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή.

Ο Πίνακας 2.8 δημιουργήθηκε με σκοπό τη διευκόλυνση στην κατανόηση των πηγών των πτητικών οργανικών ενώσεων και τα είδη που εμφανίζονται. Επεξηγώντας, οι τέσσερις κυριότερες κατηγορίες εκπομπής τους είναι:

1. Τα δομικά υλικά και τα έπιπλα. Αναφέρονται οι VOC που εμφανίζονται λόγω των συνηθέστερων δομικών υλικών, των ξύλινων επίπλων εν γένει, των βαφών και άλλων παρεμφερών υλικών.
2. Οι καύσεις σε εσωτερικούς χώρους, όπου παρατίθενται οι VOCs που εκλύονται από το κάπνισμα, την καύση κεριών και καυσίμων ή βιομάζας.
3. Η μαγειρική, που είναι πηγή πολλών και διάφορων VOC αναλόγως με την τεχνική που χρησιμοποιείται, τα υλικά, τα εργαλεία κ.λπ.

4. Τέλος, τα καθαριστικά και καταναλωτικά προϊόντα που είναι παρόντα οπουδήποτε υπάρχει ανθρώπινη παρουσία λόγω χρήσης αποσμητικών και προϊόντων περιποίησης ή καθαριστικών χώρου και ούτω καθεξής.

	<b>Δραστηριότητα/Υλικό</b>	<b>Κύρια πηγή ρύπου/Αιχνευτής</b>
<b>Building Materials &amp; Furniture Emissions</b>	Δομικά υλικά	φορμαλδεΐδη, πινένιο, εξανάλη, βουτυλεστέρας, 2-επτανόνη, 1-βουτανόλη, κυκλοεξανόνη, γλυοξάλη, βενζαλδεΐδη, ακετόνη, ακεταλδεΐδη, μεθυλο-ισοβουτυλο-κετόνη
	Βαμμένα ξύλα	φορμαλδεΐδη, πινένιο
	(λαδο)μπογιές & κόλλες	επτάνιο, μεθυλεξάνιο, ξυλόλιο μεθυλοκυκλοεξάνιο, διμεθυλοεξάνιο, αιθυλομεθυλοκετόνη, μεθυλο-ισοβουτυλο-κετόνη, μεθυλο-βουτυλο-κετόνη, ακετόνη, βενζυλοχλωρίδιο & 1,2-διχλωρομεθάνιο, αιθυλοβενζόλιο
	Επένδυση δαπέδων & ταπεσαρίες τοίχων (Χρώματα latex με νερό ή διαλύτες)	Δεκάνιο, εννεάνιο, ενδεκάνιο, δωδεκάνιο, τριμεθυλοβενζόλιο, n-βουτυλοβενζόλιο, αιθυλοτολουόλιο, οκτάνιο, τολουόλιο, φορμαλδεΐδη, πινένιο, εξανάλη, βουτυλεστέρας, 2-επτανόνη, 1-βουτανόλη, κυκλοεξανόνη, γλυοξάλη, βενζαλδεΐδη, ακετόνη, ακεταλδεΐδη, προπανόλη, ακρολεΐνη, μεθυλο-ισοβουτυλο-κετόνη, 2-βουτοξυαιθανόλη, 2-αιθυλεξανόλη
	Υδρόλυση ρητινών σε δομικά υλικά & έπιπλα	n-βουτυραλδεΐδη
	Ξύλινα πατώματα (με βερνίκι)	1,4-διχλωροβενζόλιο & μεγάλα αλκάνια
	Ξύλινα έπιπλα	τερπένια, φορμαλδεΐδη, α-πινένιο, εξανάλη
<b>Indoor combustion</b>	Κάπνισμα	φορμαλδεΐδη, (βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο, ξυλόλιο), στυρόλιο, εξάνιο, κυκλοεξάνιο, οκτάνιο & 1,4-διχλωροβενζόλιο
	Καύσιμο (πετρέλαιο, αέριο, κηροζίνη...)	φορμαλδεΐδη, (βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο, ξυλόλιο), στυρόλιο
	Καύση βιομάζας (τζάκια, σόμπες)	
	Κερί & λιβάνια	
<b>Cooking</b>	Τεχνική	βενζόλιο, τολουόλιο, φορμαλδεΐδη, ξυλόλιο, στυρόλιο, βενζυλοχλωρίδιο, τριχλωροαιθάνιο, τετραχλωροαιθάνιο, προπανόλη, ακεταλδεΐδη, αλδεΐδες ευθείας αλυσίδας, μεθανόλη, αιθανόλη, αιθυλοβενζόλιο & 1,2,4-τριμεθυλοβενζόλιο
	Εργαλεία	
	Καύσιμο για την κουζίνα	
	Υλικά	
	Θερμοκρασία	
	Πρόελευση	
<b>Cleaning &amp; Consumer products</b>	Υγρά οικιακά προϊόντα (αποσμητικά, φυτοφάρμακα, καθαριστικά...) & αρώματα	τερπένια (λιμονένιο, στυρόλιο, p-cymene, καμφένιο & α,β-πινένιο), αιθανόλη, αιθανικός αιθυλεστέρας, 1-προπανόλη, ακετόνη, ακεταλδεΐδη & 1,2-διχλωροαιθάνιο
	Λευκαντικό, απορρυπαντικό, απολυμαντικό	αιθανόλη, αιθανικός αιθυλεστέρας, 1-προπανόλη, ακετόνη, ακεταλδεΐδη & 1,2-διχλωροαιθάνιο, χλωρομεθάνιο, κυκλοεξάνιο, BTEX (Βενζόλιο, Τολουόλιο, Αιθυλοβενζόλιο, Ξυλόλιο)
	Καθαριστικά πατώματος και άλλων επιφανειών	φορμαλδεΐδη & 1,1-διχλωροαιθάνιο, διχλωρομεθάνιο, ακεταλδεΐδη
	Αρωματικά χώρου	φορμαλδεΐδη, πινένιο, ακεταλδεΐδη, εννεάνιο, δεκάνιο, τερπένια & 1,2,4-τριαιθυλοβενζόλιο
	Ασετόν, λαδομπογιές, κόλλα χαλιών, βερνίκι επίπλων, ταπεσαρίες	ακετόνη, αιθανικός αιθυλεστέρας, BTEX, κυκλοεξάνιο, ακεταλδεΐδη, χλωροαιθάνιο & 1,1-διχλωροαιθάνιο

Πίνακας 2.8: Μεγάλες κατηγορίες εκπομπής VOCs και αναλυτική καταγραφή τους (Saraga et al., 2023)

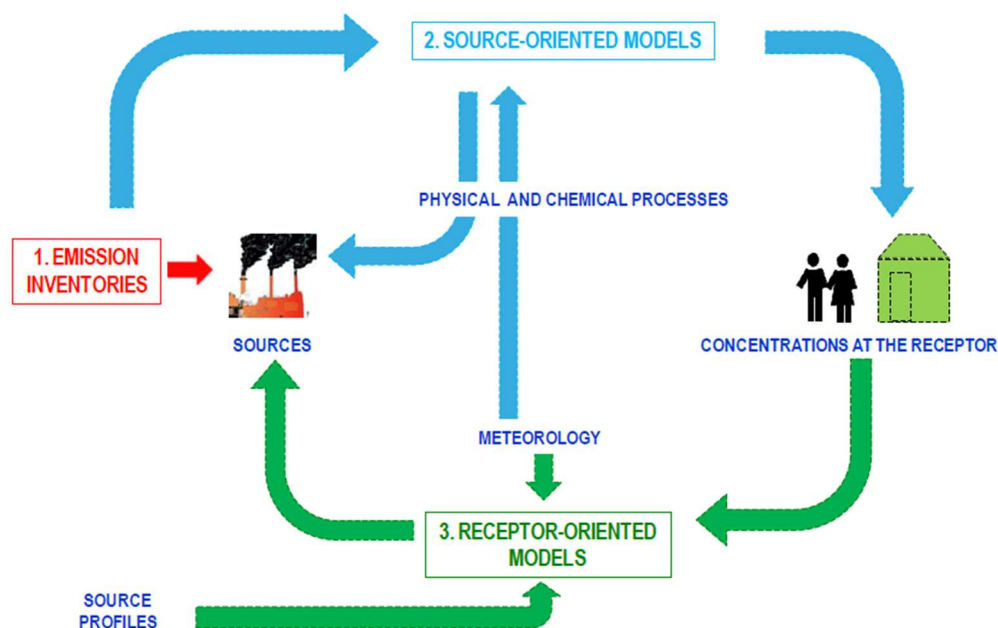
## 2.5. Source Apportionment (Επιμερισμός Πηγών)

Για τον πλήρη έλεγχο της ποιότητας του αέρα εσωτερικών ή εξωτερικών χώρων και την εκτίμηση των ενδεχόμενων κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία, πέρα από τη μελέτη των συγκεντρώσεων των διάφορων ρύπων, είναι απαραίτητη η ανίχνευση και η ποσοτικοποίηση των συνεισφορών των αντίστοιχων πηγών. Οι σύγχρονες επιστημονικές μελέτες περιλαμβάνουν ένα μεγάλο εύρος πειραματικών και υπολογιστικών προσεγγίσεων, οι οποίες περιγράφονται με το γενικότερο όρο Source Apportionment. Αποτελεί σημαντική πρόκληση για τη ρύπανση εσωτερικών χώρων λόγω της πολλαπλότητας και της υψηλής μεταβλητότητας των εσωτερικών πηγών, λόγω των περίπλοκων φυσικών και χημικών διεργασιών που λειτουργούν ως πρωτογενείς πηγές, καταβόθρες και πηγές πρόδρομων ουσιών που οδηγούν σε δευτερογενείς αντιδράσεις και λόγω της διασύνδεσης με το εξωτερικό περιβάλλον.

Το Source apportionment (SA) είναι η πρακτική απομάστευσης πληροφοριών για τις πηγές ρύπων και το βαθμό στον οποίο συμβάλλουν στα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Όπως εξηγείται και στο Διάγραμμα 2.1, μπορεί να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας τρεις κύριες προσεγγίσεις: απογραφές εκπομπών (emission inventories), μοντέλα πηγής (source models) και μοντέλα αποδέκτη (receptor models).

Οι βάσεις απογραφών εκπομπών είναι λεπτομερείς συλλογές εκπομπών από όλες τις κατηγορίες πηγών σε μία ορισμένη γεωγραφική περιοχή κατά τη διάρκεια ενός έτους. Οι εκπομπές εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας την ένταση κάθε σχετικής δραστηριότητας (ρυθμός δραστηριότητας) με μία σταθερά αναλογίας εξαρτώμενη από το ρύπο (παράγοντας εκπομπής). Έχουν ως στόχο την προσομοίωση της εκπομπής, του σχηματισμού, της μεταφοράς και της εναπόθεσης των σωματιδίων.

Μοντέλα πηγής ή μοντέλα διασποράς είναι συχνά το όνομα που δίνεται στα μοντέλα Lagrange, Gauss και Euler. Τα πρώτα κάνουν χρήση ενός κινητού πλαισίου αναφοράς για την περιγραφή της τροχιάς ενός ή πολλών σωματιδίων καθώς κινούνται στην ατμόσφαιρα. Τα μοντέλα Gauss (plume models) υποθέτουν πως ο τυρβώδης διασκορπισμός μπορεί να περιγραφεί εφαρμόζοντας ένα προφίλ Γκαουσιανής κατανομής και χρησιμοποιούνται ιδιαίτερος για την εκτίμηση εκπομπών από βιομηχανικές πηγές. Τέλος, τα μοντέλα Euler περιλαμβάνουν εξισώσεις κίνησης, χημείας και άλλων φυσικών διεργασιών που επιλύονται επάνω σε σημεία τοποθετημένα σε τρισδιάστατο πλέγμα (Σαραγά, 2010).



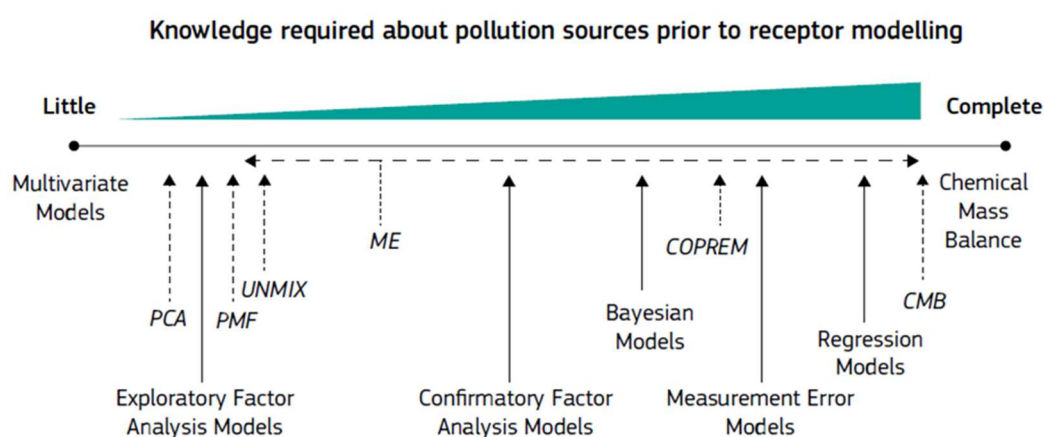
Διάγραμμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση των διαφορετικών μεθόδων για ταυτοποίηση πηγών (Belis, 2019)

Τα μοντέλα αποδέκτη (RM), από την άλλη, μοιράζουν τη μετρημένη μάζα ενός ατμοσφαιρικού ρυπαντή σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία, που ονομάζεται αποδέκτης, στις πηγές εκπομπής του, χρησιμοποιώντας πολυπαραγοντική ανάλυση για την επίλυση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας. Κατά μία έννοια ακολουθούν αντίστροφη πορεία από τα source – oriented models. Η διατήρηση μάζας ανάμεσα στην πηγή εκπομπής και την περιοχή μελέτης μπορεί να υποτεθεί και μια ανάλυση ισοζυγίου μάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση και το διαμοιρασμό των ατμοσφαιρικών ρύπων στις πηγές τους. Είναι η μέθοδος που αναπτύσσεται ταχέως τα τελευταία χρόνια, ωστόσο χρησιμοποιείται μόνο σε ισχυρά αντιδραστικά στοιχεία και σε πιο τοπικό επίπεδο. Μπορούν να εφαρμοστούν μαζί με ανεξάρτητες μεθόδους (π.χ. emission inventories, chemical transport models) για πιο ακριβή αποτελέσματα.

Κάποια από τα μοντέλα αποδέκτη που έχουν αναπτυχθεί και απεικονίζονται και στο Διάγραμμα 2.2 είναι τα εξής: Χημικό ισοζύγιο μάζας (Chemical Mass Balance – CMB), Θετική παραγοντοποίηση μήτρας (Positive Matrix Factorization – PMF), Ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA), Ιεραρχική ανάλυση συστάδων (Hierarchical Cluster Analysis – HCA), Παραγοντική ανάλυση (Factor Analysis – FA), UNMIX, Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (Absolute



Principal Component Scores – APCS), Προσέγγιση Lanchbow (Lanchbow’s approach), Μοντέλα υβριδικής τροχιάς (Hybrid-trajectory-based models), Γραμμικά μικτά μοντέλα (Linear Mixed Model – LMM), CO-PREM (Constrained Physical Receptor Model) κ.α. Για τη διερεύνηση των εσωτερικών VOCs επιλέγονται συνήθως τεχνικές PCA ή PMF και σπανιότερα τα CO-PREM, υβριδικά μοντέλα αποδέκτη που συνδυάζουν την παραγοντική ανάλυση και το CMB.



Διάγραμμα 2.2: Αποτύπωση των μοντέλων αποδέκτη και της απαιτούμενης γνώσης για τη ρυπογόνο πηγή (Belis, 2014)

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα RM είναι το χημικό ισοζύγιο μάζας και η θετική παραγοντοποίηση μήτρας. Στο πρώτο, ο αριθμός των πηγών και το προφίλ κάθε πηγής είναι με ακρίβεια γνωστά και δεδομένα ως στοιχεία εισόδου ώστε να εκτιμηθεί η συνεισφορά κάθε πηγής στις μετρούμενες συγκεντρώσεις. Το δεύτερο μοντέλο, χρήση του οποίου γίνεται και στην παρούσα μελέτη, υποθέτει ελάχιστη εκ των προτέρων γνώση του πλήθους και των προφίλ των πιθανών πηγών και κάνοντας χρήση παραγοντικής ανάλυσης προσδιορίζει τις διακυμάνσεις της συγκέντρωσης των μετρούμενων ειδών. Χρησιμοποιεί την εξίσωση

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} * f_{kj} + e_{ij}$$

όπου:

- $X_{ij}$ : πίνακας που περιλαμβάνει περιβαλλοντικές μετρήσεις ιδιοτήτων ρυπαντών (συνήθως χημικές συγκεντρώσεις αερίων ή/και σωματιδίων που συμπεριλαμβάνουν ανιχνευτές για διαφορετικές πηγές). Είναι ένας  $n \times m$  πίνακας αποτελούμενος από  $x_{ij}$  στοιχεία όπου  $x$  είναι η συγκέντρωση του  $i$  στοιχείου στο  $j$  δείγμα ( $i=1, \dots, m$  στοιχεία και  $j=1, \dots, n$  δείγματα). Οι μονάδες των στοιχείων του πίνακα  $X$  είναι  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ή αριθμός σωματιδίων/ $\text{cm}^3$ .
- $k = 1 \dots p$ : ο αριθμός των παραγόντων
- $g_{ik}$ : πίνακας του οποίου οι στήλες αναπαριστούν τις συνεισφορές  $n$  πηγών. Είναι ο  $n \times p$  πίνακας αποτελούμενος από  $g_{ki}$  στοιχεία όπου  $g$  είναι η συγκέντρωση της  $k^{\text{th}}$  πηγής στο  $j$  δείγμα ( $k=1, \dots, p$  πηγές). Οι μονάδες των στοιχείων του είναι  $\mu\text{g}/\mu\text{g}$  ή αριθμός σωματιδίων/αριθμός σωματιδίων.
- $f_{kj}$ : πίνακας του οποίου οι γραμμές αναπαριστούν τα προφίλ (σύνθεση)  $n$  πηγών. Είναι ο  $p \times m$  πίνακας αποτελούμενος από  $f_{ik}$  στοιχεία όπου  $f$  είναι η συγκέντρωση του  $i$  στοιχείου το οποίο εκπέμπεται από την  $k^{\text{th}}$  πηγή. Οι μονάδες των στοιχείων του πίνακα είναι  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ή αριθμός σωματιδίων/ $\text{cm}^3$ .
- $e_{ij}$ : πίνακας υπολοίπων, τα στοιχεία του οποίου ορίζονται ως η διαφορά της πραγματικής τιμής από την τιμή που υπολογίζει η σχέση:

$$e_{ij} = x_{ij} - \hat{x} = x_{ij} - \sum_{k=1}^p f_{ij} g_{jk} \quad (1)$$

Το μοντέλο της PMF προσεγγίζει τη λύση της εξίσωσης (1) εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εξαγωγή μόνο θετικών αποτελεσμάτων ως στοιχεία για τους πίνακες  $F$  και  $G$ . Στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση της  $Q(E)$  ως προς τους πίνακες  $G$  και  $F$ , με τον περιορισμό τα στοιχεία τους να είναι μη αρνητικά.

Η επίλυση του προβλήματος της ελαχιστοποίησης της ποσότητας  $Q$  λύνεται επαναληπτικά. Ο αλγόριθμος ελαχιστοποιεί την τιμή της  $Q$  λύνοντας την εξίσωση (1) ως προς τον πίνακα  $G$  ή  $F$  θεωρώντας γνωστό τον πίνακα  $F$  ή  $G$  αντίστοιχα. Στη συνέχεια, ο πίνακας που έχει μόλις υπολογιστεί χρησιμοποιείται ως ο γνωστός πίνακας για τον υπολογισμό του δεύτερου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

Η PCA είναι μία τεχνική γραμμικής μείωσης των διαστάσεων διάφορων υπέρογκων σετ δεδομένων με πολλές μεταβλητές ώστε να γίνουν μικρότερα, άρα πιο εύκολα οπτικοποιήσιμα και επεξεργάσιμα. Σαφώς υπάρχει και μία θυσία στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν αλλά είναι μικρή σε σύγκριση με την απλοποίηση που θα λάβει ο χρήστης. Οι κύριες συνιστώσες (principal components) είναι ουσιαστικά νέες μεταβλητές που κατασκευάζονται ως γραμμικοί συνδυασμοί ή μίγματα των αρχικών μεταβλητών ούτως ώστε οι κύριες συνιστώσες να μην αλληλοσυσχετίζονται και οι περισσότερες πληροφορίες που υπήρχαν στις αρχικές μεταβλητές να συμπιεστούν στις πρώτες συνιστώσες. Οι περισσότερες πληροφορίες από αυτές που περίσσεψαν θα μεταφερθούν στις δεύτερες συνιστώσες και ούτω καθεξής.

Η HCA προσπαθεί να ταυτοποιήσει σχετικά ομογενή γκρουπ μεταβλητών (ή περιπτώσεων) βασιζόμενη σε επιλεγμένα χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που αρχίζει με κάθε μεταβλητή σε ξεχωριστό cluster και συνενώνει clusters μέχρι να απομείνει μόνο ένα.

Η FA είναι μία στατιστική μέθοδος που στοχεύει στη μείωση ενός μεγάλου αριθμού μεταβλητών σε μικρότερα σετ παραγόντων. Είναι πολύτιμη για την εξαγωγή της μέγιστης κοινής διακύμανσης από όλες τις μεταβλητές, μετατρέποντάς τις σε ένα μοναδικό αποτέλεσμα για περαιτέρω ανάλυση. Ως μέρος του γενικού γραμμικού μοντέλου (General Linear Model – GLM), η παραγοντική ανάλυση βασίζεται σε ορισμένες υποθέσεις όπως η ύπαρξη γραμμικότητας, η απουσία πολυσυγγραμμικότητας, η συμπερίληψη σχετικών μεταβλητών και η πραγματική συσχέτιση μεταξύ μεταβλητών και παραγόντων.

Το UNMIX είναι ένα μοντέλο που κατασκευάστηκε με το λογισμικό UNMIX 6.0 του EPA. Προσπαθεί να επιλύσει προβλήματα ανάμιξης όπου τα δεδομένα θεωρούνται γραμμικός συνδυασμός άγνωστου αριθμού πηγών άγνωστης σύνθεσης και τα οποία συνεισφέρουν σε άγνωστο ποσοστό σε κάθε δείγμα. Χρησιμοποιεί μία αυστηρή διαδικασία ελέγχου δεδομένων βασισμένη στην ανάλυση ιδιοτιμών. Τα δεδομένα που λείπουν ή είναι μικρότερα του κατώτατου ορίου ανίχνευσης, αποκλείονται ενώ τα αποτελέσματα περιορίζονται σε μη αρνητικές τιμές.

Κλείνοντας, πρέπει να επισημανθεί ότι οι μελέτες source apportionment θα πρέπει να προγραμματίζονται εκ των προτέρων με βάση τα εξής κριτήρια:

- Την προκαταρκτική αξιολόγηση
- Το αντικείμενο της έρευνας
- Τους διαθέσιμους πόρους (χρηματοδότηση, προσωπικό, χρόνος)
- Τα μοντέλα και λογισμικά που θα χρησιμοποιηθούν
- Την πηγή εισαγωγής δεδομένων (input data source ήδη διαθέσιμη)
- Τα απαιτούμενα προσόντα του συντονιστή και τις ανάγκες εκπαίδευσης

Επίσης, περιοχές αντιπροσωπευτικές του μίγματος των πηγών σε ένα δεδομένο χωρίο είναι προτιμότερες από περιοχές επηρεασμένες από συγκεκριμένες πηγές. Ακόμη, δε θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται περιττά είδη, προς αποφυγή διπλού υπολογισμού μάζας· παραδείγματος χάρη στοιχεία και τα αντίστοιχα κατιόντα τους ή οργανικός, στοιχειακός και ολικός άνθρακας, όπως επίσης και στοιχεία που δεν είναι ενδεικτικά κάποιας πηγής.

Στη μελέτη του Campagnolo et al. (2017) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ποιότητας εσωτερικού αέρα σε δύο έρευνες πεδίου, για καλοκαίρι και χειμώνα για τα έτη 2012-2013, σε 148 ευρωπαϊκούς χώρους γραφείων σε 8 χώρες, σαν τμήμα του χρηματοδοτούμενου project της OFFICAIR. Η μελέτη ταυτοποίησης πηγών έγινε για VOCs και αλδεΐδες με τη μέθοδο PCA, λεπτομέρειες για την οποία δίδονται στο υποκεφάλαιο 2.5. Οι συνηθέστερες εσωτερικές και εξωτερικές πηγές ταυτοποιήθηκαν μέσω κριτικής επιλογής βάσει των παρατηρήσεων και της βιβλιογραφίας. Μετρήθηκαν μία πληθώρα φυσικών παραμέτρων (θερμοκρασία, σχετική υγρασία κ.λπ.) και χημικών ουσιών (όζον, ακεταλδεΐδη, λιμονένιο, βενζόλιο κ.α.) σε 4 χώρους γραφείων κάθε κτιρίου, σε διαφορετικά σημεία δειγματοληψίας για 5 συνεχόμενες ημέρες.

Προέκυψαν οι ακόλουθοι παράγοντες (factors) από τα εσωτερικά δείγματα, με βάση το εκάστοτε περιβάλλον και παράλληλη σύγκριση με τη βιβλιογραφία:

- Παράγοντας 1: Είναι ισχυρά συνδεδεμένος με τα BTEX και το n-hexane το χειμώνα και επιπλέον με το acrolein το καλοκαίρι. Αυτές οι ουσίες προέρχονται κυριότερα από εξωτερικές πηγές και πιθανότερα από καύση ορυκτών καυσίμων από βιομηχανίες, θέρμανση ή την κίνηση οχημάτων ενώ η ακρολεΐνη βρίσκεται μεταξύ των πιο άφθονων καρβονυλίων των εκπομπών μηχανών ντίζελ
- Παράγοντας 2: Συνδέεται άμεσα με τη φορμαλδεΐδη, την ακεταλδεΐδη την προπανάλη και την εξανάλη και τις δύο εποχές, προϊόντα οξειδωσης

λόγω της παρουσίας όζοντος από τους χρήστες, τα χαλιά, ηλεκτρονικά μηχανήματα όπως φαξ ή φωτοτυπικά και αρωματικά καταναλωτικά προϊόντα. Ωστόσο, για το χειμώνα αποδίδεται σε ξύλινα υλικά και εκπομπές από βαφές.

- Παράγοντας 3: Κατά τη διάρκεια του χειμώνα συσχετίζεται έντονα με τις χημικές ενώσεις α-pinene (εκπομπές δαπέδων και χαλιών) και 2-ethylhexanol (βινυλικά πατώματα και χαλιά) ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού με 2-butoxyethanol (διαλύτης, βερνίκια, μουσαμάς δαπέδου, καθαριστικά χαλιών και επιφανειών), 2-ethylhexanol και propanal (χαλιά, βαφές και βερνίκια που περιέχουν λινέλαιο). Αποδίδεται περισσότερο σε εκπομπές από τα δάπεδα.
- Παράγοντας 4: Εξαρτάται ιδιαιτέρως από τα acrolein και benzaldehyde το χειμώνα που είναι εκπομπές των βαφών (καθότι ήταν φρεσκοβαμμένοι πολλοί χώροι). Το καλοκαίρι εξαρτάται από το α-pinene που απελευθερώνουν τα αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα και τα ξύλινα έπιπλα, στα οποία και οφείλεται.
- Παράγοντας 5: Αποτελείται βασικά από 2-butoxyethanol το χειμώνα και οφείλεται στην έντονη χρήση καθαριστικών προϊόντων. Για το καλοκαίρι, είναι ο αντίστοιχος παράγοντας 6 του χειμώνα.
- Παράγοντας 6: Εντοπίζεται μόνο το χειμώνα και συνδυάζεται με στυρένιο. Γενικώς μπορεί να προέρχεται από τα χαλιά, δάπεδο από καουτσούκ και μονωτικό αφρό πολυστυρενίου αλλά εδώ σχετίζεται άμεσα με τον εξοπλισμό του γραφείου (επεξεργασμένο χαρτί, toner, εκτυπωτής κ.λπ.)

Μεταξύ των συμπερασμάτων που συνάγονται είναι ότι δεν υπάρχουν αξιόλογες διαφορές ανάμεσα στις δύο εποχές, παρά μόνον το καλοκαίρι όπου ευνοούνται οι αντιδράσεις που προξενούνται από το όζον ενώ η πλειονότητα των εσωτερικών πηγών είναι κτιριακές πηγές από τα δομικά υλικά.

### 3. Μεθοδολογία μετρήσεων

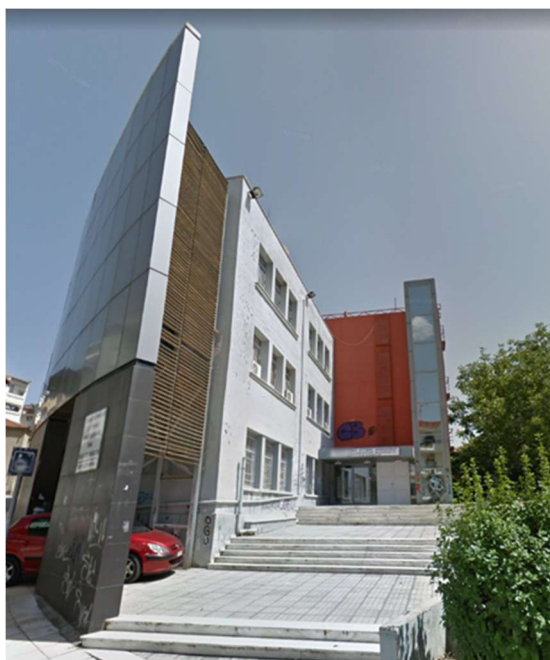
Το εν λόγω κεφάλαιο αφορά στο υπολογιστικό – πειραματικό μέρος της εργασίας. Δίνονται πληροφορίες για τα κτίρια που συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη, όπως το ωράριο λειτουργίας τους, το εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον τους. Αναλύονται ο τρόπος που ελήφθησαν τα δείγματα και ο αναγκαίος εξοπλισμός για τη λήψη και την ανάλυσή τους, ποιες πτητικές οργανικές ενώσεις μετρήθηκαν και παρατηρήσεις που έγιναν από τους ερευνητές για τους χώρους γραφείων που οδηγούν και σε αναμενόμενες πηγές ρύπων.

#### 3.1. Περιγραφή κτιρίων μελέτης

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν πραγματοποιείται μία περιγραφή των κτιρίων που επιλέχθηκαν να μελετηθούν στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας. Πρόκειται για χώρους γραφείων στην Κοζάνη, που σε γενικές γραμμές λειτουργούν 8 ώρες την ημέρα, 5 ημέρες την εβδομάδα και καθαρίζονται σε καθημερινή βάση αλλά διαφέρουν στον αριθμό των εργαζομένων που απασχολούν, στη χρήση τους και τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα.

##### 3.1.1. Κτίριο I

Το πρώτο κτίριο που θα μελετηθεί, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 3.1, δε χρησιμοποιείται πλέον και ανήκει στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας (Αργυροκάστρου 13, Κοζάνη), ενώ πέρα από χώρους γραφείων φιλοξενούσε τα Εργαστήρια Χημείας του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών. Βρίσκεται εντός του αστικού ιστού της πόλης αλλά σε περιοχή με μειωμένη κίνηση και έγινε δειγματοληψία στον 1<sup>ο</sup> όροφο, για 10 συναπτές εργάσιμες ημέρες, στο χρονικό διάστημα 18 Οκτωβρίου έως και 1 Νοεμβρίου. Σε καθημερινή βάση λαμβανόντουσαν 4 δείγματα (επομένως προέκυψαν 40), εκ των οποίων τα 3 στον εσωτερικό χώρο και ένα στον εξωτερικό. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως οι χώροι του κτιρίου αερίζονται φυσικά.



*Εικόνα 3.1: Εξωτερική όψη του Κτιρίου I*

Οι χημικές ουσίες που καταγράφηκαν είναι οι εξής: Benzene, Ethylbenzene, Toluene, Octane, p-m-Xylene, o-Xylene, α-Pinene, beta-Pinene, 1,2,4-Trimethylbenzene, d-Limonene, Naphthalene, Styrene, 3-Carene, Hexane, Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, Butyl Acetate, N-heptanal, Octanal, Nonanal, Decanal, Benzaldehyde, 1,2,3-Trimethylbenzene.

Τόσο με βάση τις παρατηρήσεις των ατόμων (εργαζομένων και δειγματοληπτών), όσο και με τη χρήση, την τοποθεσία και την κατασκευή του κτιρίου αναμενότουσαν οι επόμενες πηγές πτητικών οργανικών ενώσεων:

- Χημικές ουσίες από τα εργαστήρια: κυρίως διαλύτες (lab solvents), δηλαδή αλδεΐδες
- Αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα (fragranced consumer products): κολόνιες, αποσμητικά, καθαριστικά κ.α.
- Δεξαμενή φύλαξης πετρελαίου θέρμανσης (unburnt oil tank)
- Δομικά υλικά (building materials): εκπομπές από τα πατώματα, τα έπιπλα, τις μογιές στους τοίχους κ.α.
- Κίνηση οχημάτων (traffic)

### 3.1.2. Κτίριο II

Το δεύτερο υπό μελέτη κτίριο, που φαίνεται στις Εικόνες 3.2 και 3.3, είναι ένα γεωπονικό κατάστημα στην πόλη της Κοζάνης (Αριστοφάνους 9) το οποίο, πέρα από χώρους γραφείων, διαθέτει εντός και αποθήκη φύλαξης γεωπονικών προϊόντων μέσα στην οποία υπάρχει ανεμιστήρας. Κάνει χρήση φυσικού αερισμού ενώ κατά τη διενέργεια των μετρήσεων εφαρμόστηκαν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί αναφορικά με τη χρήση του ανεμιστήρα και της πόρτας. Η δειγματοληψία έλαβε χώρα στο διάστημα 16 μέχρι και 25 Μαΐου, για 6 ημέρες, σε πολλούς χώρους εντός και εκτός του κτιρίου, με μεταβαλλόμενο αριθμό δειγμάτων κάθε ημέρα και προέκυψαν 36 δείγματα.



Εικόνα 3.2: Πρόσψη του Κτιρίου II



Εικόνα 3.3: Εσωτερικός χώρος του Κτιρίου II



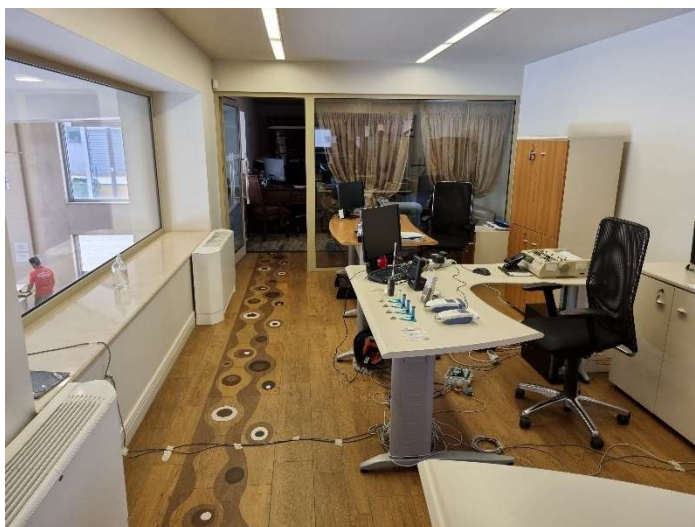
Οι χημικές ουσίες που καταγράφηκαν είναι οι εξής: Benzene, Ethylbenzene, Toluene, Octane, p-m-Xylene, o-Xylene, α-Pinene, 1,2,4-Trimethylbenzene, d-Limonene, Naphthalene, Styrene, 3-Carene, Hexane, Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, 2-Butoxyethanol, Linalool, Dihydromyrcenol.

Τόσο με βάση τις παρατηρήσεις των ατόμων όσο και με τη χρήση, την τοποθεσία και την κατασκευή του κτιρίου ήταν αναμενόμενες οι επόμενες πηγές πτητικών οργανικών ενώσεων:

- Κάπνισμα τσιγάρων (smoking)
- Γεωπονικά είδη: φυτοφάρμακα, λιπάσματα κ.α.
- Κίνηση οχημάτων (traffic)
- Φυτά εσωτερικού χώρου
- Αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα (fragranced consumer products): κολόνιες, αποσμητικά, καθαριστικά κ.α.

### 3.1.3. Κτίριο III

Το τρίτο κτίριο, που φαίνεται στην Εικόνα 3.4, ανήκει σε εταιρεία παραγωγής και εμπορίας έτοιμου σκυροδέματος και δομικών υλικών (7ο χλμ Α/Δ Κοζάνης – Πτολεμαΐδας), βρίσκεται εκτός της πόλης, πλησίον αυτοκινητοδρόμου ενώ κοντά στο χώρο των γραφείων γίνεται η παραγωγή μπετόν. Πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες συνολικής διάρκειας 10 ημερών, στα διαστήματα 19 – 23 και 26 – 30 Ιουλίου και κάθε ημέρα λαμβανόντουσαν 4 δείγματα (σύνολο 40), εκ των οποίων 3 εσωτερικά και 1 εξωτερικά του κτιρίου. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων οι χώροι αεριζόντουσαν φυσικά παρά τη δυνατότητα μηχανικού αερισμού.



*Εικόνα 3.4: Εξωτερική και εσωτερική όψη του Κτιρίου III*

Οι χημικές ουσίες που καταγράφηκαν είναι οι εξής: Benzene, Ethylbenzene, Toluene, Octane, p-m-Xylene, o-Xylene, α-Pinene, beta-Pinene, 1,2,4-Trimethylbenzene, d-Limonene, Naphthalene, Styrene, 3-Carene, Hexane, Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, Butyl Acetate, N-heptanal, Octanal, Nonanal, Decanal, 1,2,3-Trimethylbenzene.

Βάσει παρατηρήσεων, αλλά και της τοποθεσίας και της κατασκευής του κτιρίου, ήταν προβλεπόμενη η εμφάνιση των ακόλουθων πηγών πτητικών οργανικών ενώσεων:

- Κάπνισμα τσιγάρων (smoking)
- Εξατμίσεις οχημάτων (vehicle exhausts): Διέλευση και στάθμευση φορτηγών
- Κίνηση οχημάτων (traffic)
- Καθαριστικά προϊόντα (cleaning products)
- Αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα (fragranced consumer products)

### 3.2. Καμπάνια μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια του 2021 έγιναν μετρήσεις σε κτίρια γραφείων της Δυτικής Μακεδονίας (Κοζάνη: ΤΕΧΝΟΜΠΕΤΟΝ Α.Ε., Εργαστήρια Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, Γεωπονικό κατάστημα, Δημόσια Οικονομική Υπηρεσία, Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας. Πτολεμαΐδα: Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – Ινστιτούτο χημικών Διεργασιών & Ενεργειακών Πόρων, Δημαρχείο), εκ των οποίων θα μελετηθούν 3 που βρίσκονται στην Κοζάνη και χρησιμοποιούνται για εντελώς διαφορετικού τύπου δραστηριότητες. Πραγματοποιήθηκαν ενεργητικές (active) μετρήσεις για την καταγραφή των VOCs με χρήση ειδικών αντλιών χαμηλού όγκου (SKC) και ρυθμού αναρρόφησης 80 mL/min, οι οποίες ήταν εξοπλισμένες με γυάλινα σωληνάκια Tenax TA (Chrompack). Ακόμη, γινόταν λήψη δειγμάτων στον εξωτερικό (γύρω στις 12:00) και τον εσωτερικό χώρο (περίπου στις 09:00, 12:00 και 15:00) κάθε κτιρίου, διάρκειας 30 λεπτών κάθε φορά. Στη συνέχεια τα δείγματα αναλύθηκαν στα εργαστήρια της σχολής με τη μέθοδο της αέριας χρωματογραφίας, με χρήση ανιχνευτή φασματοσκοπίας μάζας στο χρωματογράφο Agilent GC/MS (Gas Chromatography/Mass Spectrometry) 6890 GC – 5973 MS. Στις Εικόνες 3.5 έως και 3.8 απεικονίζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.



Εικόνα 3.5: Χρωματογράφος μάζας Agilent 6890 N/5973



*Εικόνα 3.6: Αντλία χαμηλού όγκου με σοληνάκι*



*Εικόνα 3.7: Εξοπλισμός δειγματοληψίας στο κτίριο II*



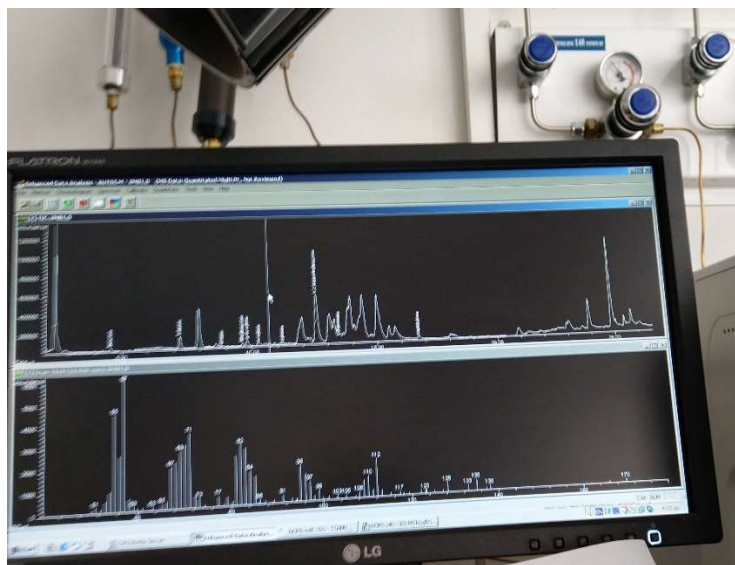
*Εικόνα 3.8: Εξοπλισμός δειγματοληψίας στο κτίριο III*

Πιο συγκεκριμένα, για να βρεθούν οι συγκεντρώσεις των VOCs στα δείγματα αέρα που λήφθηκαν, έγινε χρήση αέριας χρωματογραφίας συζευγμένης με χρωματογράφο μάζας σε συνδυασμό με σύστημα θερμικής εκρόφησης (TDS – GC – MS).

Η θερμική μονάδα εκρόφησης (Thermal Desorption System) είναι συνδεδεμένη με αέριο χρωματογράφο ενώ ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε είναι φασματογράφος μάζας. Η αρχική θερμοκρασία εισαγωγής των γυάλινων σωλήνων είναι οι 40 °C. Κατόπιν, θερμαίνονται προσεγγιστικά για 7 λεπτά, με ρυθμό αύξησης θερμοκρασίας 60 °C/min, ώσπου να φτάσουν τους 260 °C. Παράλληλα διοχετεύεται ήλιο και οι ενώσεις που έχουν εκροφηθεί μεταβιβάζονται σε τριχοειδή κρουπαγίδα στους -120 °C. Η θερμοκρασία που επικρατεί στην ίνα (transfer capillary) μεταξύ της κρουπαγίδας και του φούρνου είναι οι 280 °C. Η κρουπαγίδα είναι αναγκαία ώστε να συγκεντρώσει το δείγμα πριν να εισαχθεί στη χρωματογραφική στήλη ενώ η ψύξη της επιτυγχάνεται με υγρό άζωτο. Εν συνεχεία, θερμαίνεται με ρυθμό 12 °C/sec μέχρι να φτάσει τους 0 °C και έπειτα με ρυθμό 3 °C/sec μέχρι τους 300 °C, όπου το δείγμα παραμένει για ένα λεπτό. Ακολούθως, εισάγεται εξ ολοκλήρου στο χρωματογράφο με διαχωρισμό 1:10, όπου στην αρχή εισέρχεται στο φούρνο στους 35 °C και παραμένει για 4 λεπτά, ενώ η θερμοκρασία του μεταβάλλεται κατά 8 °C/min ώσπου να αγγίξει τους 120 °C. Εκεί παραμένει για 6 λεπτά, μετά η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 20 °C/min, μέχρι τους 220 °C, όπου και παραμένει για 1-2 λεπτά. Η στήλη καθαρίζεται για τα επόμενα 10 λεπτά, η ροή είναι 0.9 mL/min και η μέση ταχύτητα του ηλίου τα 35 cm/sec. Η έγχυση γίνεται σε λειτουργία διαχωρισμού (split mode) με αναλογία 10:1. Η συγκεκριμένη διαδικασία ορίζει ευθεία αναφοράς δύο σημείων. Ο ποιοτικός προσδιορισμός των ενώσεων βασίζεται στους χρόνους ανάλυσης τους ενώ ο ποσοτικός προσδιορισμός, στην ευθεία βαθμονόμησης.

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των πτητικών οργανικών ενώσεων χρησιμοποιήθηκε ένα πρότυπο μίγμα που αποτελείτο από τις εξής χημικές ουσίες, σε διαφορετικές αναλογίες για κάθε μία: Benzene, Toluene, Octane, Ethylbenzene, p-m-Xylene, o-Xylene, a-Pinene, d-Limonene, Naphthalene, Styrene, 1,2,3-Trimethylbenzene και 1,2,4-Trimethylbenzene. Το μίγμα αυτό βοηθά στην αποτύπωση του ακριβούς χρόνου εμφάνισης κάθε ουσίας στα αποτελέσματα του χρωματογράφου καθώς και στην κατασκευή καμπύλης αναφοράς με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις. Τα πρότυπα που προέκυψαν έπειτα από διαδοχικές αραιώσεις

εγχύθηκαν σε σωλίνες TENAX και εισήχθησαν στο χρωματογράφο ώστε να αναλυθούν οι ενώσεις των προτύπων που είχαν συγκεντρωθεί σε αυτούς. Στις Εικόνες 3.9, 3.10 και 3.11 αποτυπώνονται ορισμένα από τα στάδια της διαδικασίας που περιγράφηκε.



Εικόνα 3.9: Επεξεργασία αποτελεσμάτων της χημικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό των VOCs



Εικόνα 3.10: Ακριβής προσδιορισμός των χημικών ενώσεων που εντοπίστηκαν



*Εικόνα 3.11: Κασετίνα εισαγωγής των δειγμάτων tenax στο χρωματογράφο μάζας GC – MS*

## 4. Εξαγωγή και επεξεργασία αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο καταγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη χρήση του προγράμματος PMF για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, αφού πρότινος δόθηκαν πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας του. Έπονται, για κάθε κτίριο ξεχωριστά, τα αποτελέσματα τόσο σε ρητή μορφή όσο και σε μορφή εικόνων που παράγαγε το πρόγραμμα.

### 4.1. Μοντέλο και πρόγραμμα PMF

Το μοντέλο της Positive Matrix factorization (PMF) αναπτύχθηκε από τον P. Paatero το 1997 και το πρόγραμμα που το χρησιμοποιεί διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο από την U.S. E.P.A. (United States Environmental Protection Agency). Στην εργασία έγινε χρήση της έκδοσης 5.0 (2004). Είναι ένα εργαλείο πολυπαραγοντικής ανάλυσης που αποσυνθέτει έναν πίνακα δεδομένων σε δύο επιμέρους πίνακες: τη συνεισφορά παραγόντων (G) και το προφίλ παραγόντων (F). Ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία στην εφαρμογή της PMF είναι η σωστή επιλογή του πλήθους των παραγόντων, που ορίζεται από το χρήστη. Οι παράγοντες αυτοί θα ταυτιστούν στη συνέχεια με πηγές ή ομάδες πηγών. Εάν επιλεγούν λιγότεροι παράγοντες από όσους πραγματικά υπάρχουν, τότε εγκυμονεί ο κίνδυνος δύο ή περισσότερες πηγές να αντιπροσωπευθούν από έναν παράγοντα (συγχώνευση). Από την άλλη πλευρά, η επιλογή περισσότερων παραγόντων από τους πραγματικούς, οδηγεί σε διαχωρισμό μιας πηγής σε δύο ή περισσότερους παράγοντες (διάσπαση). Η θεμελιώδης συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται είναι ότι ο αριθμός των πηγών  $p$  πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος από το σύνολο των μεταβλητών  $m$ . Ο χρήστης του μοντέλου της PMF πρέπει να εξετάζει τις μεταβολές της αντικειμενικής συνάρτησης  $Q$  με την αύξηση του αριθμού των παραγόντων ενώ παράλληλα το αποτέλεσμα του πίνακα των συνεισφορών των πηγών  $G$  θα πρέπει να είναι λογικό και να έχει φυσική σημασία, δηλαδή να μπορεί να ερμηνευθεί και να εξηγηθεί από τις παρατηρήσεις που έχουν καταγραφεί για τον εκάστοτε χώρο δειγματοληψίας.

Η εξίσωση της αντικειμενικής συνάρτησης  $Q$ , η οποία πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι:

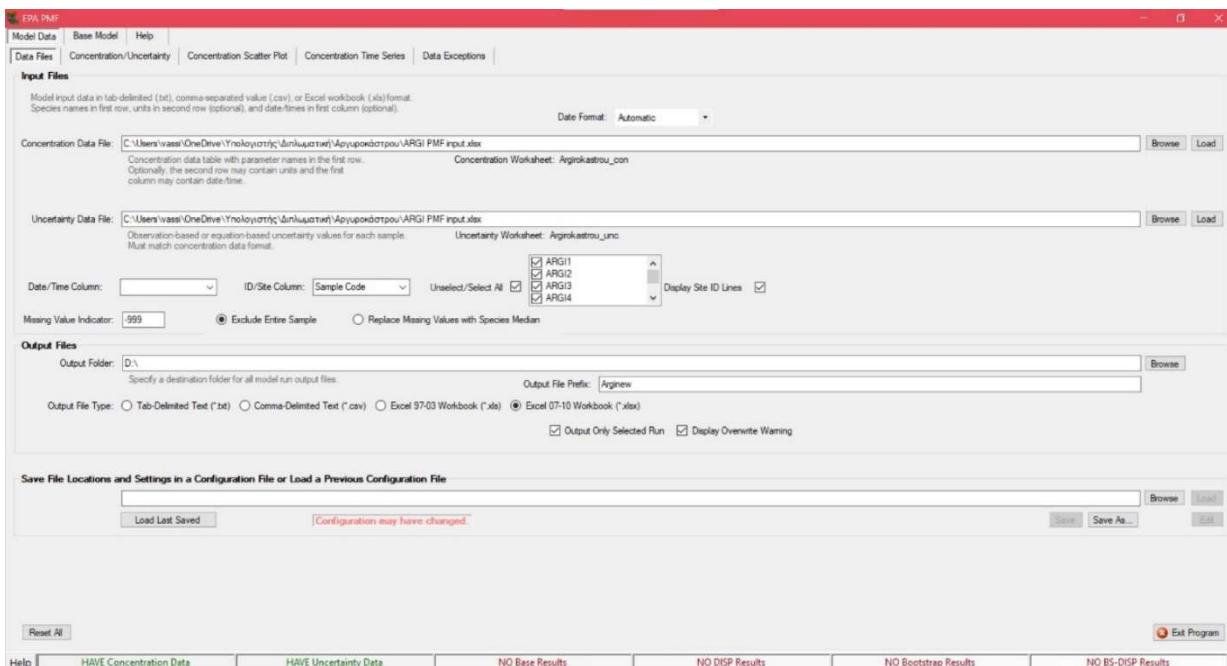


$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} * f_{kj}}{u_{ij}} \right]^2$$

όπου  $u_{ij}$  η εκάστοτε αβεβαιότητα.

Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εξαγωγή αποτελεσμάτων (εν προκειμένω για το κτίριο I), σε συνδυασμό με βοηθητικά στιγμιότυπα οθόνης, είναι τα εξής,:

1. Δημιουργία excel με κατάλληλη μορφή ώστε να εισαχθεί ως είσοδος (input). Θα πρέπει να υπάρχει ένα φύλλο με τις συγκεντρώσεις των στοιχείων, το οποίο θα επιλεγεί ως **concentration data file**, και ένα φύλλο με τα ποσοστά αβεβαιότητας ως **uncertainty data file** (Εικόνα 4.1). *Σημείωση: Δεν έγινε μελέτη περίπτωσης που να διαχώριζε τα εσωτερικά από τα εξωτερικά δείγματα καθότι είναι μικρός ο αριθμός τους και δε θα προέκυπταν σωστά αποτελέσματα.*

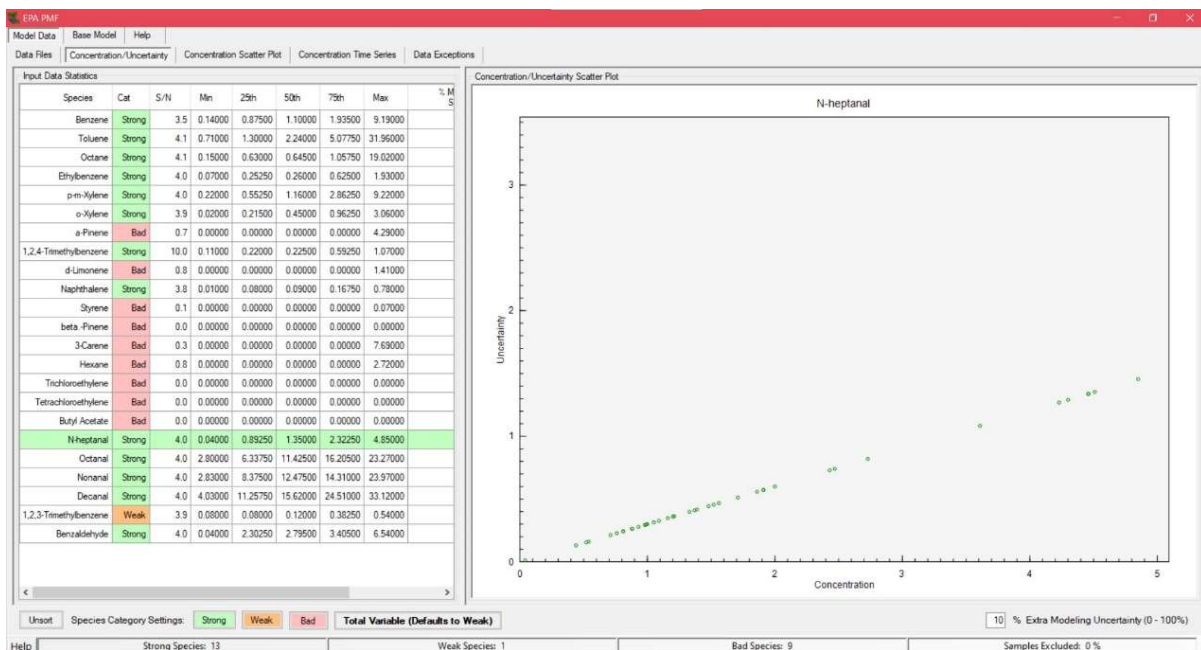


Εικόνα 4.1: Βήμα 1 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

2. Στην καρτέλα **Concentration/Uncertainty** το διάγραμμα παρουσιάζει τη συσχέτιση ανάμεσα στη συγκέντρωση και την αβεβαιότητα για κάθε χημική ουσία/είδος. Μία καλή ένδειξη για την κατηγοριοποίηση των ουσιών

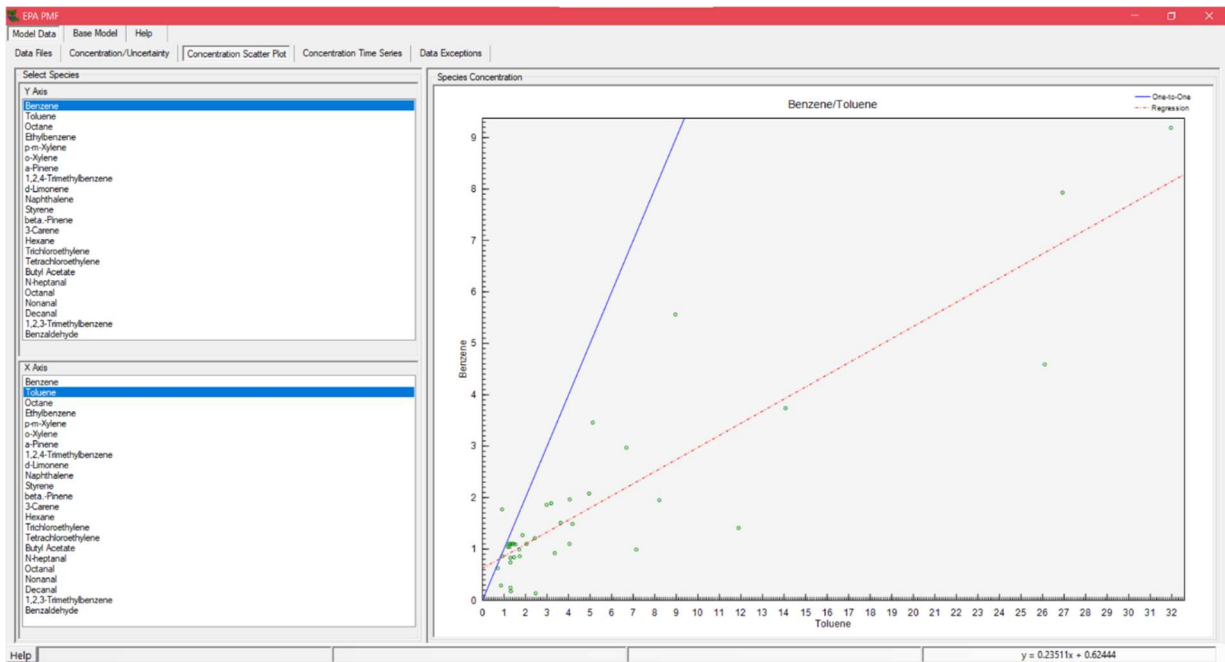
(species) είναι το S/N (signal to noise ratio) το οποίο αν είναι  $> 2 \rightarrow$  **strong**, αν βρίσκεται μεταξύ των τιμών 0,2 και 2  $\rightarrow$  **weak** ενώ αν είναι  $< 0,2 \rightarrow$  **bad**. Φυσικά, η κατηγοριοποίηση έγινε και με γνώμονα άλλους παράγοντες οι οποίοι αναφέρονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

3. Ορισμός **extra modeling uncertainty**, όπου ενδείκνυται κάποια τιμή από 10% έως 15% (Εικόνα 4.2).



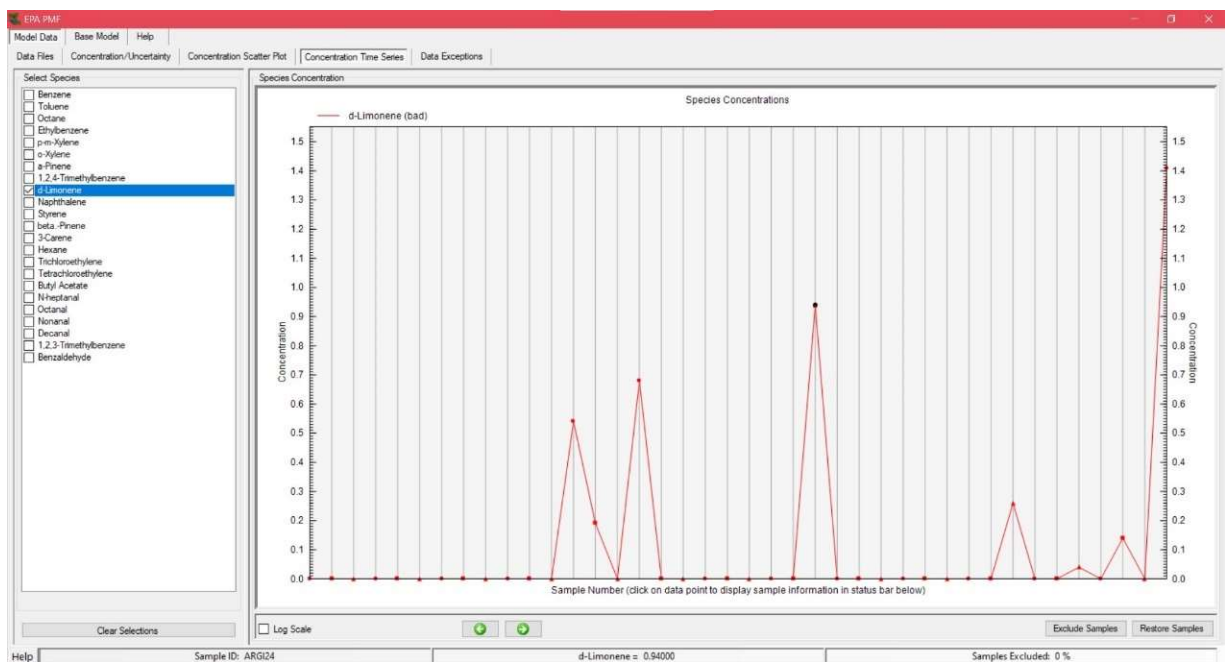
Εικόνα 4.2: Βήματα 2 και 3 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

4. Στην καρτέλα **Concentration scatter plot** αποτυπώνεται η συσχέτιση μεταξύ δύο species που επιλέγει ο χρήστης, ώστε να παρατηρηθεί πιθανή συνδιακύμανσή τους για τη μετέπειτα διευκόλυνση στον προσδιορισμό των πηγών, ενώ η καρτέλα **Concentration time series** δίνει τη δυνατότητα αποκλεισμού ή επανένταξης μεμονωμένων δειγμάτων (Εικόνα 4.3).



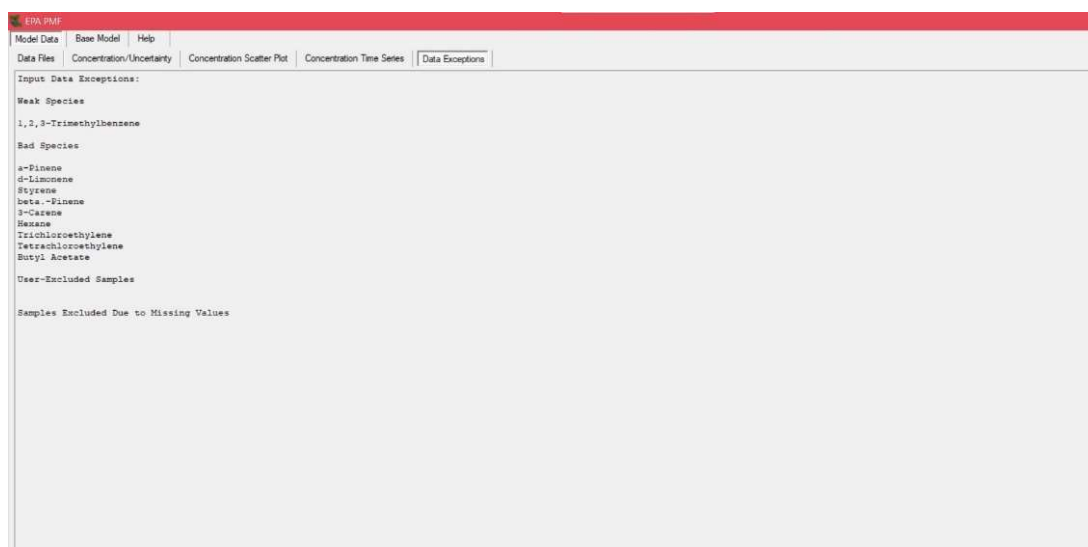
Εικόνα 4.3: Βήμα 4 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

5. Στην καρτέλα *Concentration time series* μπορούμε να αποκλείσουμε εντελώς κάποια δείγματα που παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν ιδιαίτερα έντονες διακυμάνσεις οπότε πιθανώς θα «χαλάσουν» το αποτέλεσμα της ανάλυσης (Εικόνα 4.4).



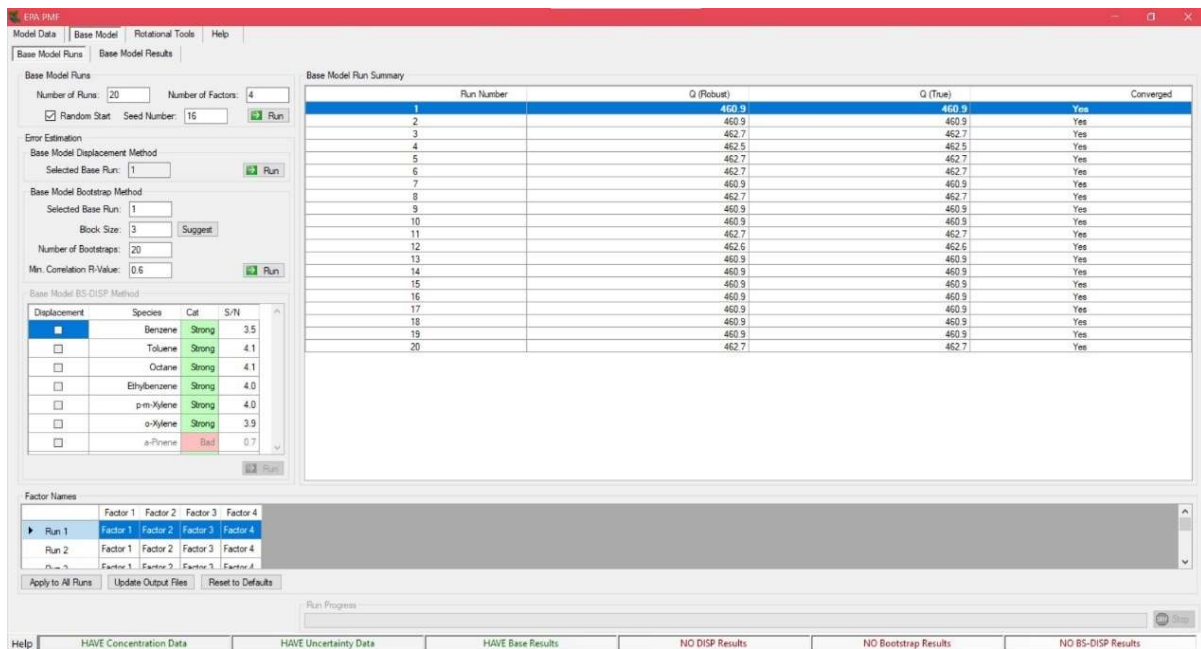
Εικόνα 4.4: Βήμα 5 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

6. Η καρτέλα **Data exceptions** (Εικόνα 4.5) αποτελεί ένα «σημειωματάριο/ιστορικό» των επιλογών που έχουμε κάνει μέχρι εκείνο το σημείο (δείγματα που αφαιρέσαμε, ουσίες που ορίσαμε ως bad κ.λπ.).



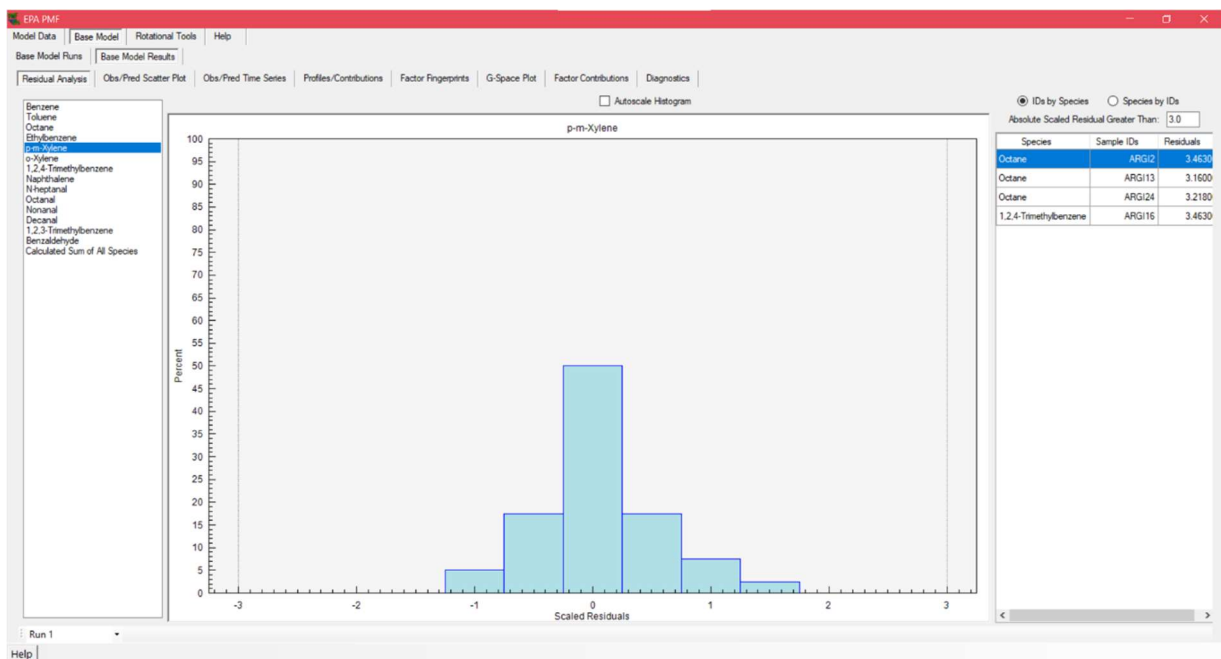
Εικόνα 4.5: Βήμα 6 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

7. Στην υποενότητα **Base model runs** με 20 επαναλήψεις και επιλέγοντας ένα μικρό αριθμό factors γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης της συνάρτησης  $Q$  και εξίσωσης των τιμών που προκύπτουν ως τοπικό και ολικό ελάχιστο, δηλαδή  $Q_{\text{true}}$  και  $Q_{\text{robust}}$  αντίστοιχα. Και τα δύο είναι παράμετροι καλής προσαρμογής, όμως το  $Q_{\text{true}}$  υπολογίζεται συμπεριλαμβανομένων όλων των σημείων ενώ το  $Q_{\text{robust}}$  εξαιρεί τα σημεία που δεν ταιριάζουν, δηλαδή εκείνα όπου η αβεβαιότητα μείον το scaled residual δίνει αριθμό  $> 4$  (Εικόνα 4.6).



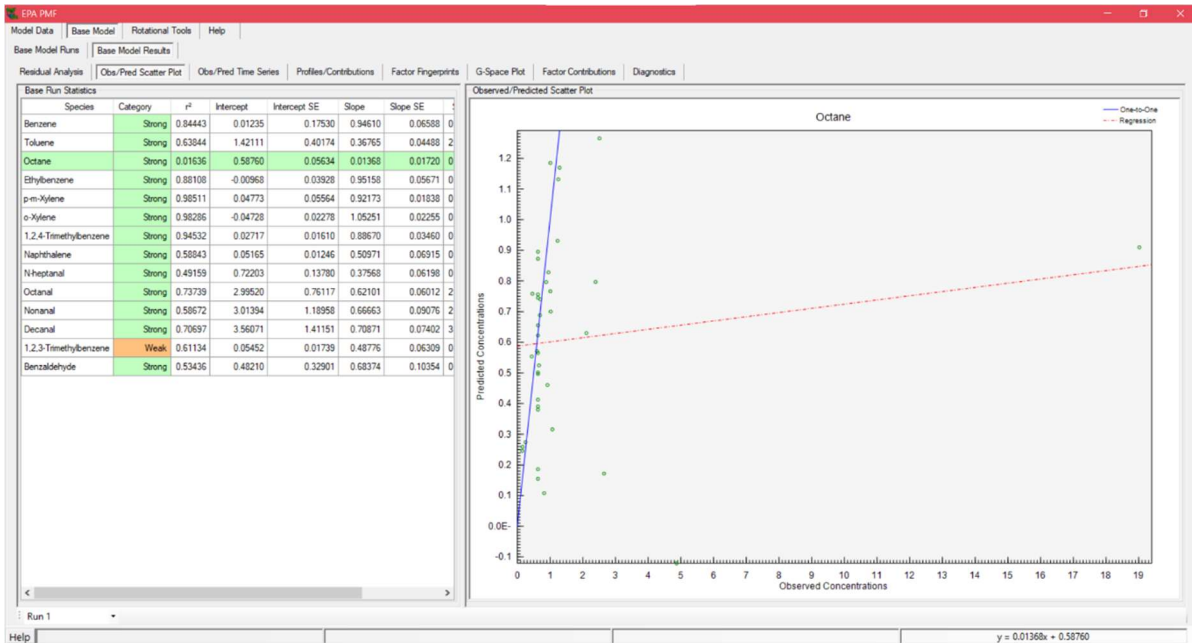
Εικόνα 4.6: Βήμα 7 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

8. Στην κατηγορία **Residual analysis** της **Base model results** είναι ευκατὰ μία κατά το δυνατόν συμμετρική κατανομή, εντός του διαστήματος [-3,3], όπως αυτή που απεικονίζεται για το p-m-Xylene, και έτσι παρέχεται η δυνατότητα αποκλεισμού δειγμάτων, αν δεν πληρούν τις προδιαγραφές. Το πρόγραμμα συνιστά πιθανό αποκλεισμό των δειγμάτων που αναγράφονται στα δεξιά της Εικόνας 4.7.



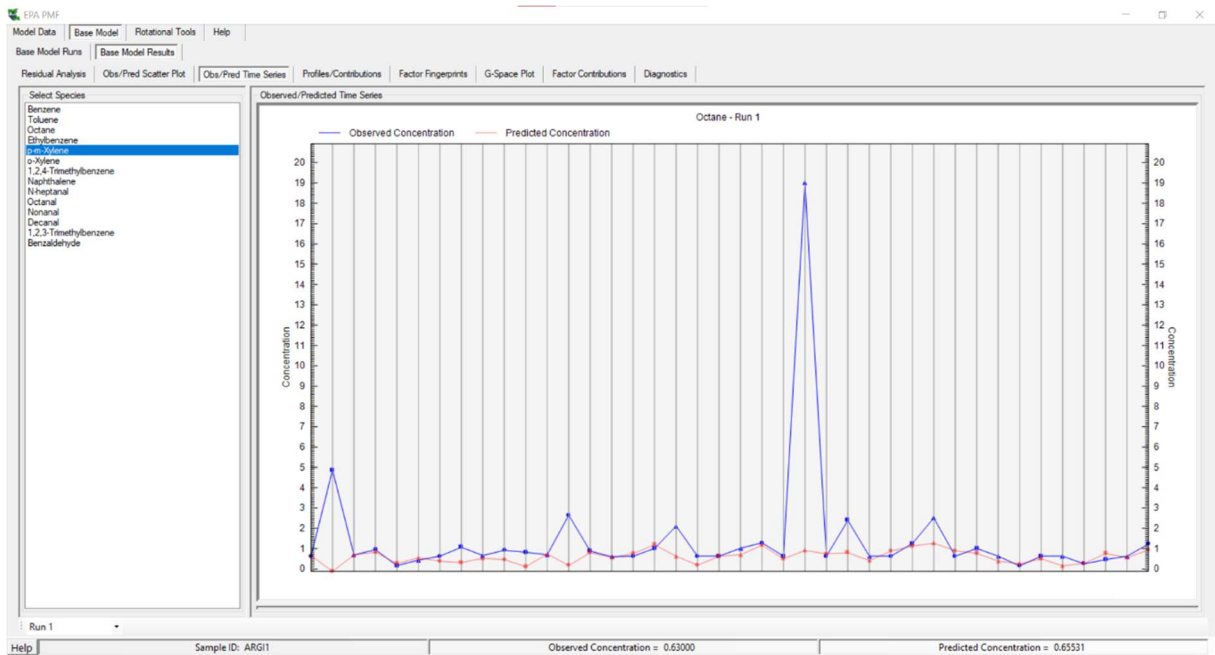
Εικόνα 4.7: Βήμα 8 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

9. Η κατηγορία **Obs/Pred scatter plot** αναπαριστά το πόσο ταυτίζονται οι προβλέψεις μας, με τις παρατηρήσεις. Είναι θεμιτές τιμές του  $r^2$  όσο το δυνατόν κοντύτερα στη μονάδα ενώ πολύ χαμηλές τιμές αποτελούν ένδειξη για την αφαίρεση δειγμάτων ή την υποβάθμιση κάποιου species σε weak ή bad (όπως του Octane στην Εικόνα 4.8).



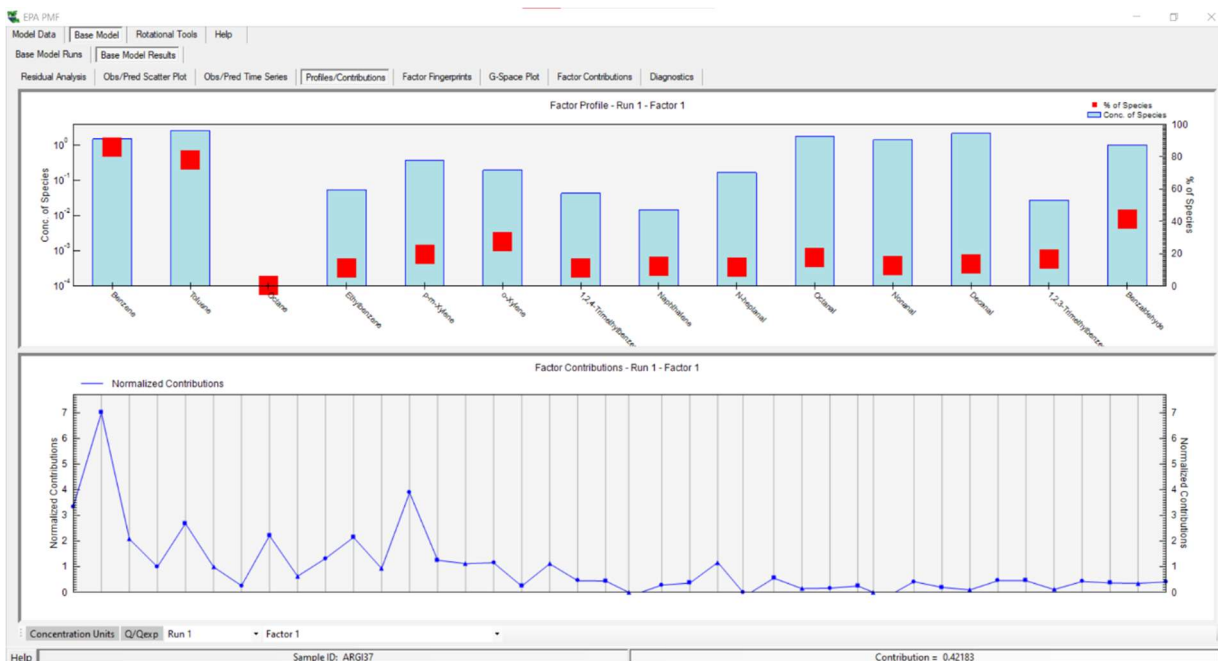
Εικόνα 4.8: Βήμα 9 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

10. Ακολούθως, η κατηγορία **Obs/Pred time series** αναπαριστά επίσης την ταύτιση παρατηρήσεων (με μπλε γραμμή) και προβλέψεων (με κόκκινη γραμμή) όπου, εν προκειμένω, οι έντονες κορυφώσεις (peaks) στο διάγραμμα υποδηλώνουν πιθανή ανάγκη τροποποιήσεων με αφαίρεση του δείγματος που αντιστοιχεί στην εν λόγω κουκκίδα (Εικόνα 4.9).



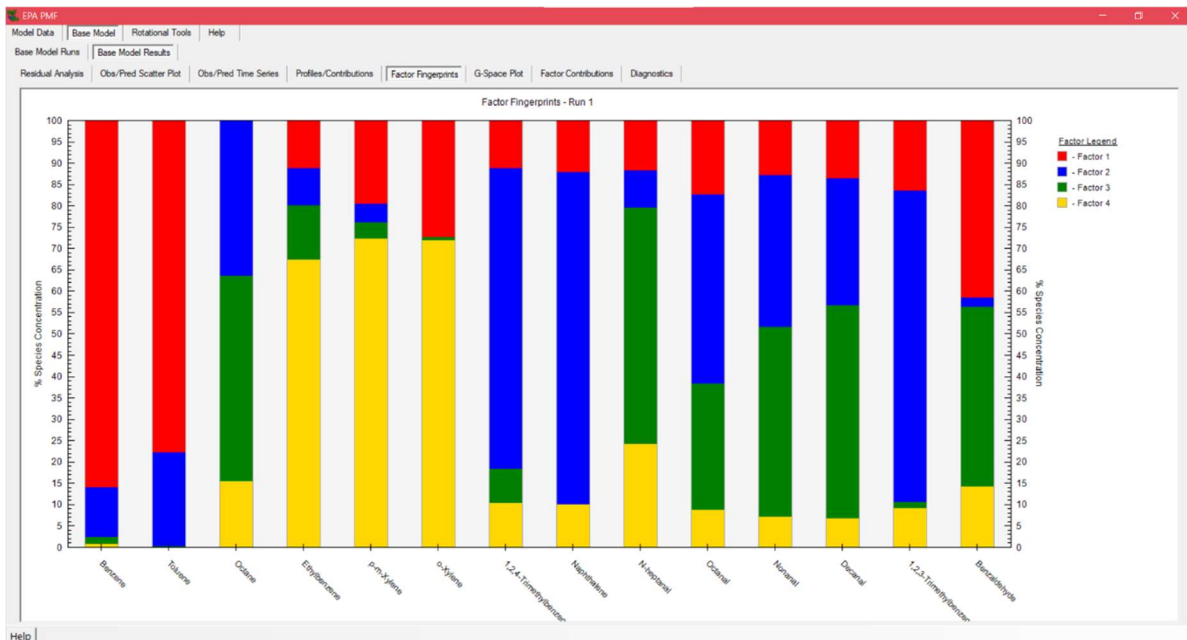
Εικόνα 4.9: Βήμα 10 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

11. Σημαντικότερη όλων είναι η καρτέλα **Factor fingerprints** όπου οι γαλάζιες ράβδοι της Εικόνας 4.10 δείχνουν τη συγκέντρωση κάθε species και τα κόκκινα τετράγωνα το ποσοστό συμμετοχής κάθε χημικής ουσίας σε κάθε παράγοντα. Κατ' αυτόν τον τρόπο πρέπει να μπορεί να ερμηνευθεί η πηγή εκπομπής.



Εικόνα 4.10: Βήμα 11 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

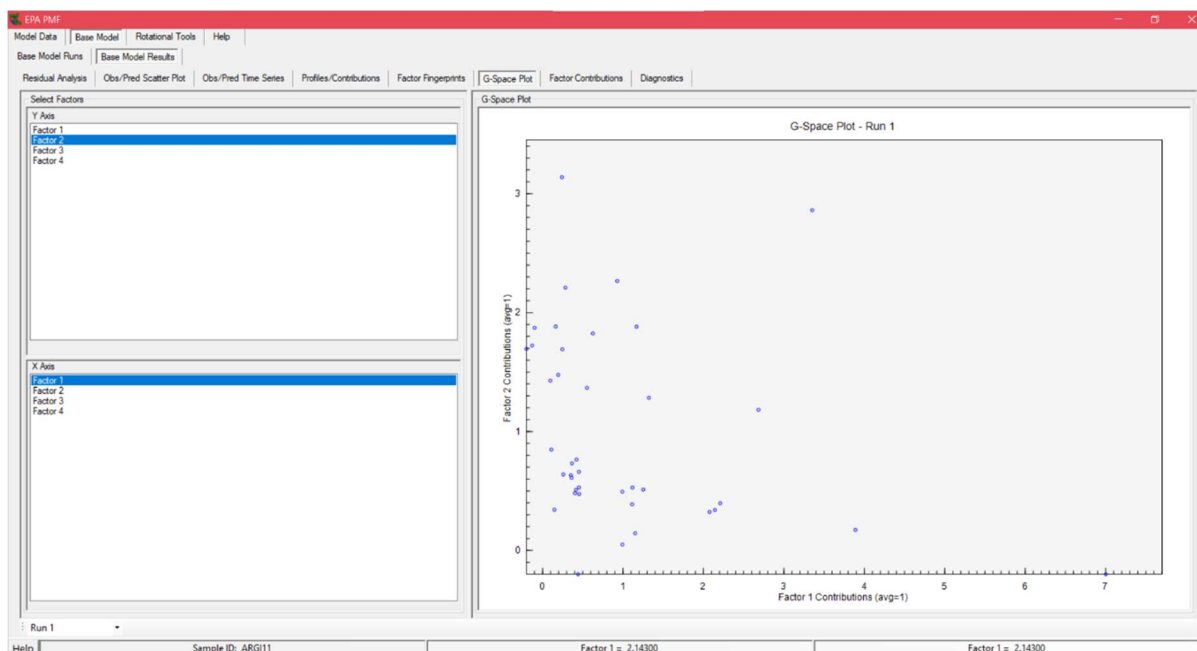
12. Ακολουθεί η καρτέλα **Factor Fingerprints** όπου παρουσιάζονται με τη μορφή ραβδογραμμάτων τα ποσοστά συμμετοχής κάθε χημικής ουσίας σε κάθε παράγοντα (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11: Βήμα 12 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

13. Τέλος, στην καρτέλα **G Space Plot** επιλέγουμε κάποιον factor στον άξονα x και κάποιον άλλο στον άξονα y και σκοπός είναι να επιβεβαιώσουμε ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτισή τους, άρα και ταύτισή τους, αλλά τα σημεία διατάσσονται σε μορφή νέφους (τυχαία), όπως στην Εικόνα 4.12.

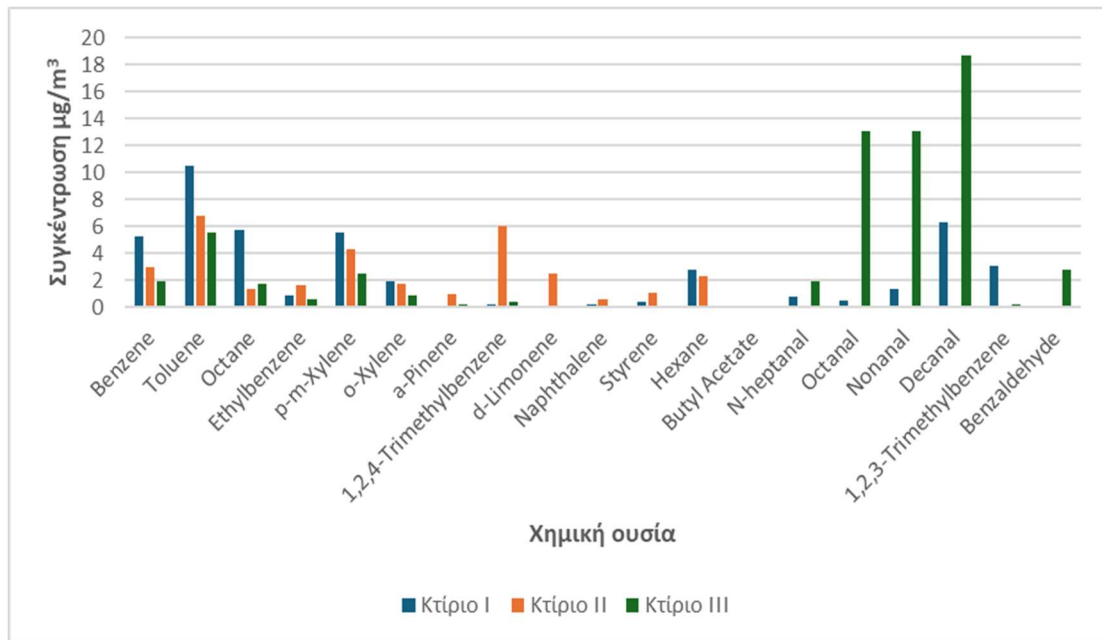




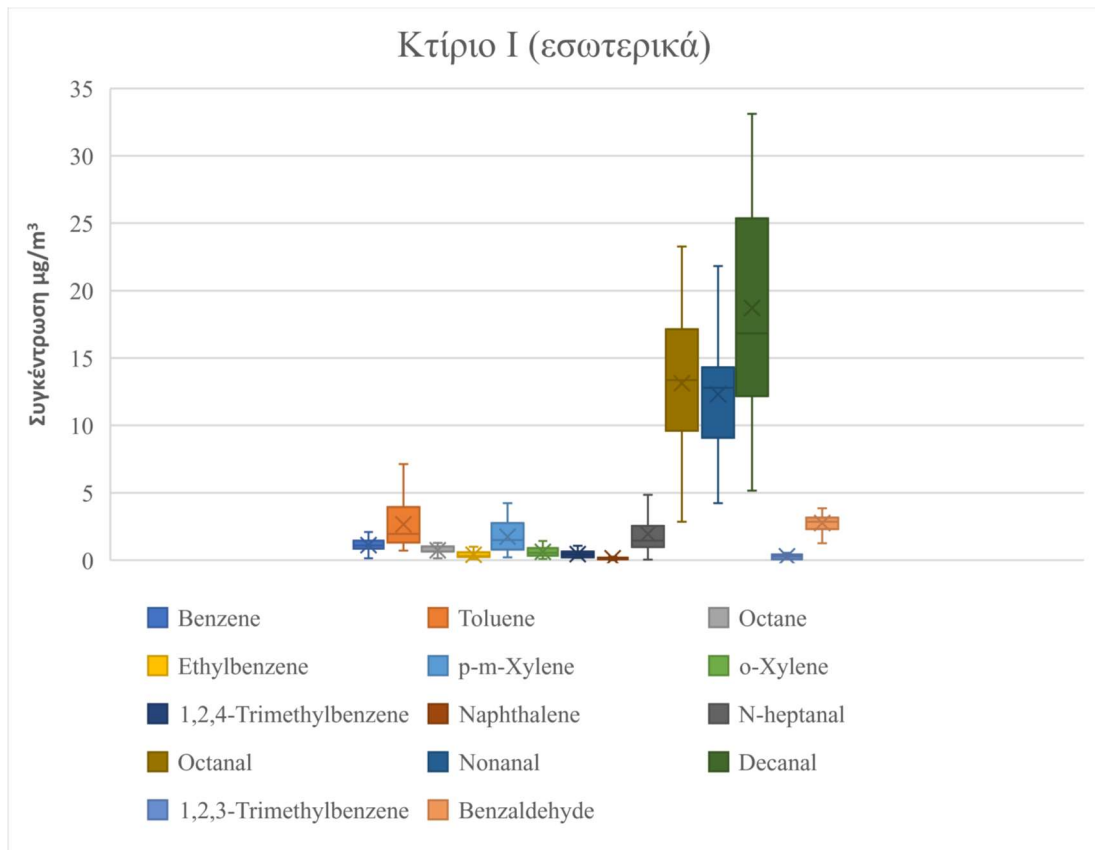
Εικόνα 4.12: Βήμα 13 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF

## 4.2. Αποτελέσματα

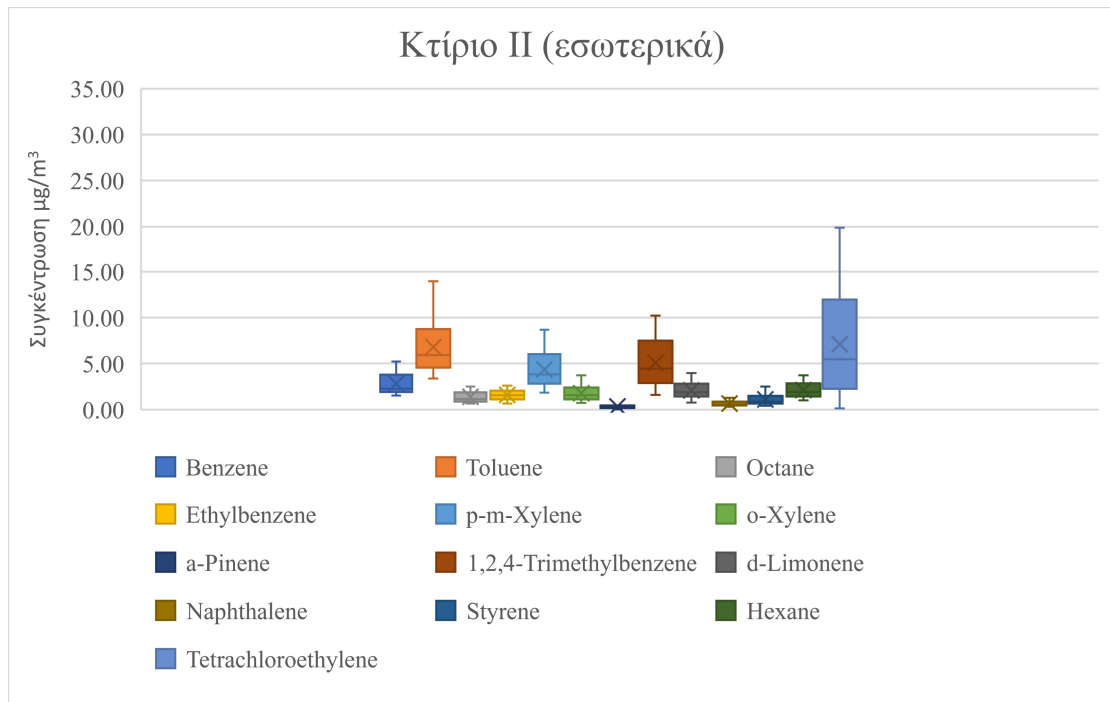
Στα επόμενα υποκεφάλαια καταγράφονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα της PMF, ερμηνεύονται σε σχέση με τη σύγκλισή τους ως προς αυτά που αναμέναμε, παρατίθενται στιγμιότυπα οθόνης για τη διευκόλυνση στην καταγραφή και διακύμανσή τους καθώς και για μία πληρέστερη αποτύπωση που συμπληρώνει τις σύντομες περιγραφές που γίνονται. Στο Διάγραμμα 4.1 παρουσιάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις που προέκυψαν από το σύνολο των δειγμάτων μόνο για τις πτητικές οργανικές ενώσεις που υπήρχαν και στα τρία κτίρια και που δεν αποτελούσαν bad species στο input του PMF. Αθροιστικά, και λαμβάνοντας υπόψιν αποκλειστικά τις συγκεντρώσεις ως καθαρούς αριθμούς, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το Κτίριο III είναι το πιο επιβαρυνμένο λόγω των αλδευδών. Τα Διαγράμματα πλαισίου – απολήξεων 4.2, 4.3 και 4.4 απεικονίζουν για κάθε κτίριο ξεχωριστά, τη διασπορά στις συγκεντρώσεις των χημικών ενώσεων που μετρήθηκαν σε κάθε δείγμα. Όμως, αφαιρέθηκαν τα δείγματα που λήφθηκαν από τους εξωτερικούς χώρους, οι πολύ ακραίες τιμές σε κάποιες ενώσεις καθώς και οι ουσίες που αποκλείστηκαν κατά την ανάλυση του λογισμικού PMF (δηλαδή οι ουσίες με πολλές συγκεντρώσεις μικρότερες από το detection limit τους).



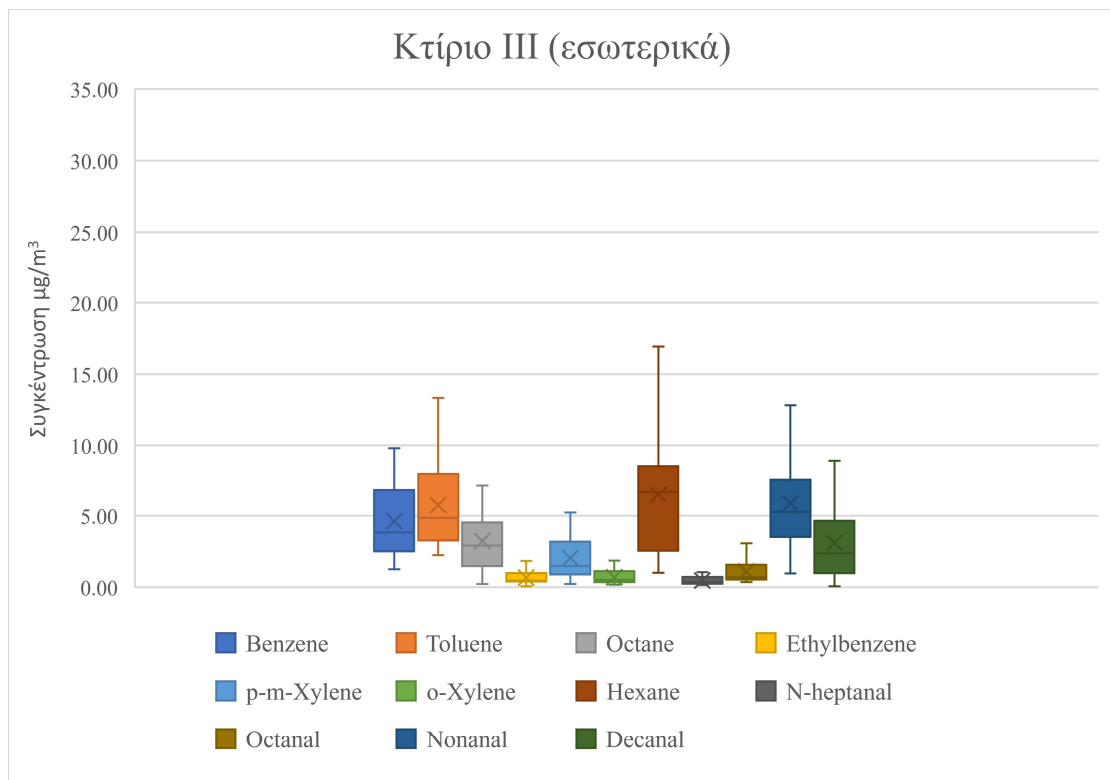
Διάγραμμα 4.1: Συγκεντρώσεις των κοινών οργανικών ενώσεων που είναι κοινές για τα τρία κτίρια



Διάγραμμα 4.2: Διασπορά στις συγκεντρώσεις κάθε χημικής ουσίας για το Κτίριο I



Διάγραμμα 4.3: Διασπορά στις συγκεντρώσεις κάθε χημικής ουσίας για το Κτίριο II



Διάγραμμα 4.4: Διασπορά στις συγκεντρώσεις κάθε χημικής ουσίας για το Κτίριο III

Παρατηρούμε ότι τα εύρη των συγκεντρώσεων των ενώσεων όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο και το οκτάνιο, που εκπέμπονται από τις εξατμίσεις των οχημάτων, αλλά και των ενώσεων που σχετίζονται με αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα (ethylbenzene, p-m-xylene, o-xylene), κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα στα τρία κτίρια. Αυτό οφείλεται στις ίδιες δραστηριότητες και συμπεριφορές των ανθρώπων μεταξύ των χώρων αυτών ενώ, όπως βλέπουμε, η χωροθέτηση εντός ή εκτός του αστικού ιστού δεν παίζει, εν προκειμένω, σημαντικό ρόλο. Ο Πίνακας 4.1 έχει εξαχθεί βρίσκοντας το μέσο όρο των συγκεντρώσεων κάθε ουσίας για τα εσωτερικά και τα εξωτερικά δείγματα ξεχωριστά και κατόπιν το λόγο τους (indoor/outdoor). Περιλαμβάνει αυτούς τους λόγους και για τα 3 κτίρια αλλά μόνο για τις ενώσεις που είναι κοινές σε αυτά και που δεν προκύπτει κλάσμα που να μην ορίζεται. Παρατηρούμε πως στα Κτίρια I και III όλοι οι λόγοι I/O είναι >1 επομένως έχουν ισχυρή εσωτερική επίδραση ενώ στο Κτίριο II αυτό ισχύει μόνο για τις ουσίες Octane, Naphthalene και 1,2,4-Trimethylbenzene που οφείλονται κυρίως στο κάπνισμα, τα φυτά και τα γεωπονικά είδη.

Κτίριο/Ενώση	I/O								
	Benzene	Toluene	Octane	Ethylbenzene	p-m-Xylene	o-Xylene	1,2,4-Trimethylbenzene	Naphthalene	Hexane
Αργυροκάστρου	1.121	1.281	2.628	1.787	5.076	3.826	2.184	2.004	0.453
Γεωπονικό	0.395	0.515	1.512	0.852	0.608	0.477	1.933	2.437	0.617
Τεχνομπετόν	2.767	4.300	1.480	2.987	3.191	3.040	1.864	2.807	1.685

Πίνακας 4.1: Λόγος συγκεντρώσεων εσωτερικών προς εξωτερικών δειγμάτων

Συγκρίνοντας τα εύρη των συγκεντρώσεων με αυτά που προέκυψαν στη μελέτη των Licina και Langer (2021), η οποία περιλάμβανε πολλές από τις ενώσεις που μελετώνται εδώ και μάλιστα σε ίδιου τύπου χώρους, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Στο Κτίριο I κυμαίνονται στα ίδια εύρη οι συγκεντρώσεις των benzene και toluene ενώ πιο κάτω βρίσκονται οι συγκεντρώσεις των ethylbenzene, p-m-xylene, o-xylene,  $\alpha$ -pinene και d-limonene.
- Στο Κτίριο II, παρόμοιες συγκεντρώσεις με αυτές τις μελέτης, εμφανίζουν τα benzene, toluene, nonanal και decanal. Χαμηλότερες είναι οι συγκεντρώσεις των ethylbenzene, p-m-xylene, o-xylene.

- Στο Κτίριο III είναι αρκετά κοντά με αυτά της μελέτης τα εύρη των συγκεντρώσεων των ουσιών toluene, nonanal και decanal. Πιο χαμηλά είναι των ethylbenzene, p-m-xylene, o-xylene ενώ υψηλότερα είναι του benzene.

Οι όποιες διαφοροποιήσεις είναι σε λογικά πλαίσια, καθώς στη μελέτη των Licina και Langer οι πόλεις που βρίσκονται τα γραφεία είναι πιο πυκνοκατοικημένες ενώ παράλληλα τα κτίρια αυτά απασχολούν πολύ μεγαλύτερο αριθμό εργαζομένων, χρησιμοποιούν μηχανικό αερισμό, είναι προσφάτως ανακαινισμένα και το διάστημα των μετρήσεων ήταν πολύ μεγαλύτερο και κάλυπτε όλες τις εποχές.

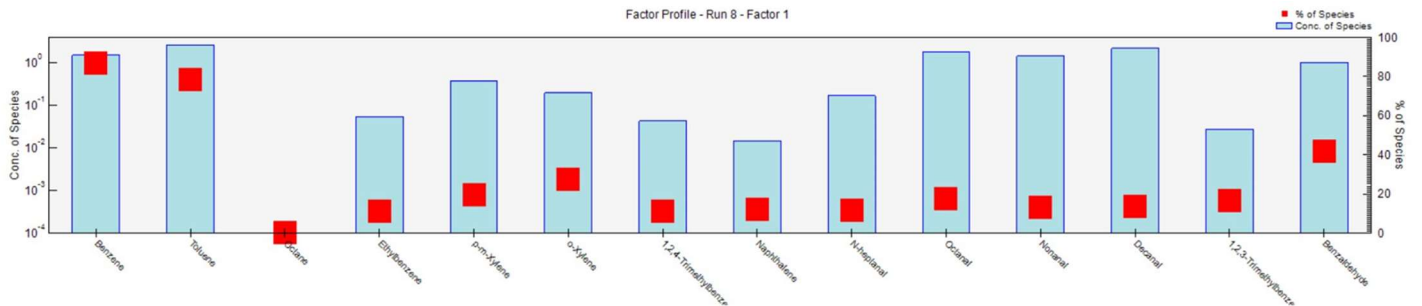
#### 4.2.1. Αποτελέσματα Κτιρίου I

Από την ανάλυση του προγράμματος PMF αφαιρέθηκαν (ορισμός ως bad) όσες χημικές ουσίες είχαν μη ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις με βάση τα κατώτατα όρια ανίχνευσής τους (detection limits) ή είχαν λίγες μη μηδενικές τιμές ή γνωρίζαμε εκ των προτέρων ότι υπήρξαν σφάλματα κατά τη δειγματοληψία και ανάλυσή τους στο χρωματογράφο. Αυτές είναι οι εξής:  $\alpha$ -Pinene, d-Limonene, Styrene, beta-Pinene, 3-Carene, Hexane, Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, Butyl Acetate. Επίσης, ορίστηκαν ως αδύναμες (weak) οι ενώσεις που περίπου το 40 – 60% των δειγμάτων τους είχαν μηδενική τιμή, όπως το 1,2,3-Trimethylbenzene, ενώ οι υπόλοιπες παρέμειναν ως ισχυρές (strong).

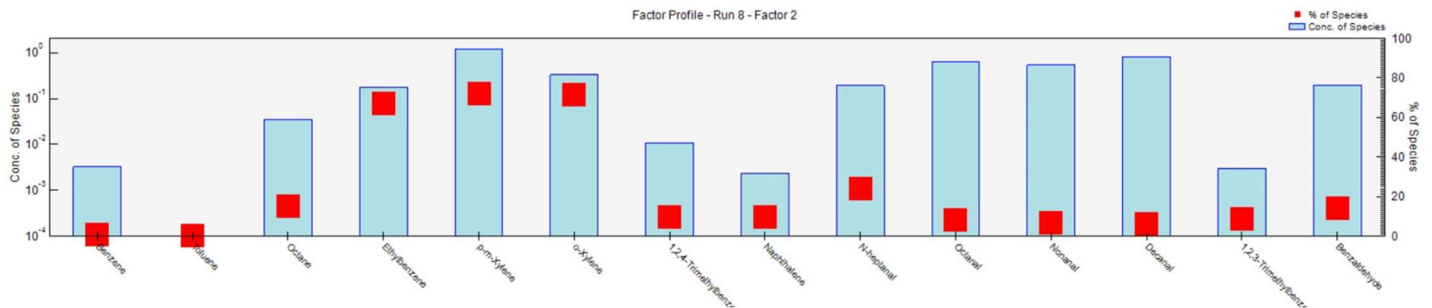
Στη συνέχεια έγιναν runs για 3, 4 και 5 παράγοντες (factors) ώστε τελικά να επιλεγούν οι 4, και λόγω των αριθμητικών παραγόντων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, αλλά κυρίως λόγω της καλής φυσικής τους ερμηνείας. Προέκυψαν οι ακόλουθοι παράγοντες/κύριες πηγές εκπομπής VOCs:

- Factor 1: 90% Benzene, 80% Toluene, 40% Benzaldehyde → κίνηση οχημάτων
- Factor 2: 80% o-Xylene και p-m-Xylene, 70% Ethylbenzene → αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα
- Factor 3: 70% Naphthalene, 65% 1,2,4-Trimethylbenzene και 1,2,3-Trimethylbenzene, 40% Octanal → άκαυστο καύσιμο
- Factor 4: 65% n-Heptanal, 60% Octane και Decanal, 50% Nonanal, 40% Octanal → χημικά εργαστηρίου

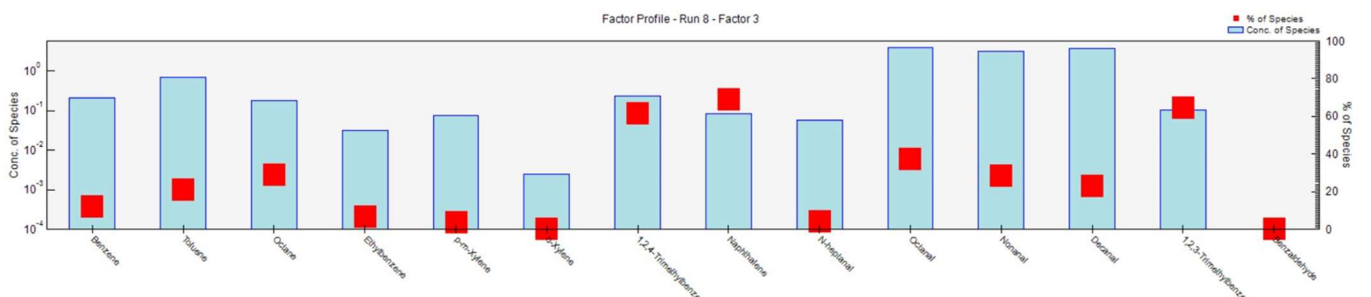
Τα Διαγράμματα 4.5 – 4.8 αποτυπώνουν το ποσοστό στο οποίο συνεισφέρει η εκάστοτε ουσία στον αντίστοιχο παράγοντα καθώς και η συγκέντρωσή της.



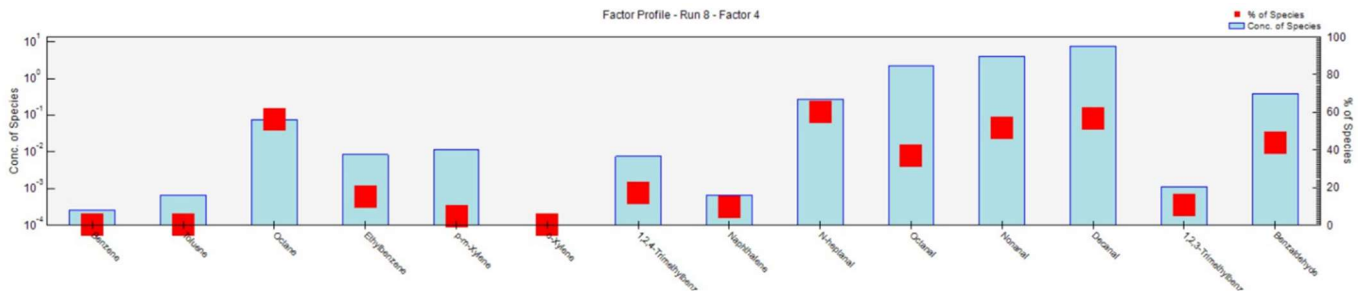
Διάγραμμα 4.5: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 1



Διάγραμμα 4.6: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 2



Διάγραμμα 4.7: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 3



Διάγραμμα 4.8: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 4

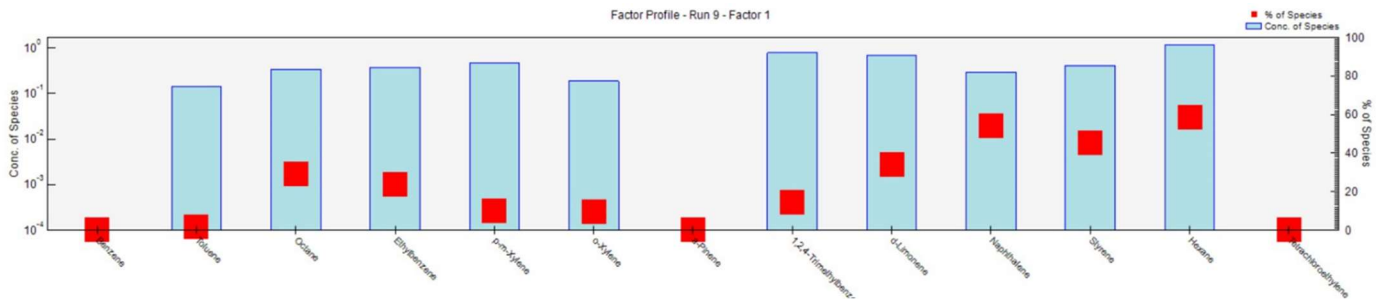
#### 4.2.2. Αποτελέσματα Κτιρίου II

Από την ανάλυση του προγράμματος PMF αφαιρέθηκαν (ορισμός ως bad) οι παρακάτω χημικές ενώσεις: 3-Carene, Trichloroethylene, 2-Butoxyethanol, Linalool και Dihydromyrcenol ενώ οι υπόλοιπες παρέμειναν ως ισχυρές (strong).

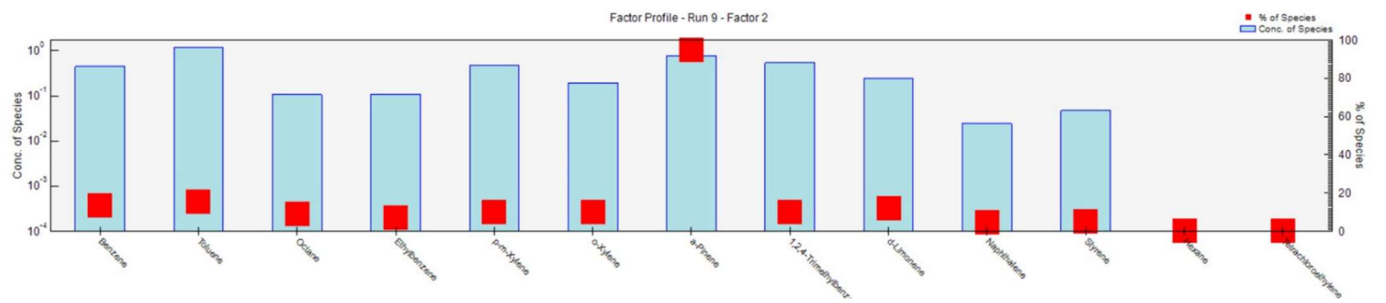
Κατόπιν, έγιναν τρεξίματα για 4, 5 και 6 παράγοντες και κρίθηκε πως οι 5 περιγράφουν καλύτερα την κατάσταση και εμφανίζουν καλά αριθμητικά και γραφικά αποτελέσματα. Αυτοί είναι:

- Factor 1: 60% Naphthalene και Hexane, 50% Styrene, 40% d-Limonene, 30% Octane → κάπνισμα
- Factor 2: 90% α-Pinene, 20% Toluene, 10% 1,2,4-Trimethylbenzene → φυτά
- Factor 3: 60% 1,2,4-Trimethylbenzene, 40% d-Limonene, 30% Styrene → γεωπονικά είδη
- Factor 4: 60% Tetrachloroethylene, 40% d-Limonene, 30% Styrene → αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα
- Factor 5: 80% Benzene και o-Xylene, 75% p-m-Xylene και Toluene, 60% Ethylbenzene, 50% Octane → εξατμίσεις (exhausts) ή κίνηση οχημάτων

Στα Διαγράμματα 4.9 – 4.12 απεικονίζεται το ποσοστό συμμετοχής κάθε χημικής ουσίας στον εκάστοτε παράγοντα καθώς και η συγκέντρωσή της.



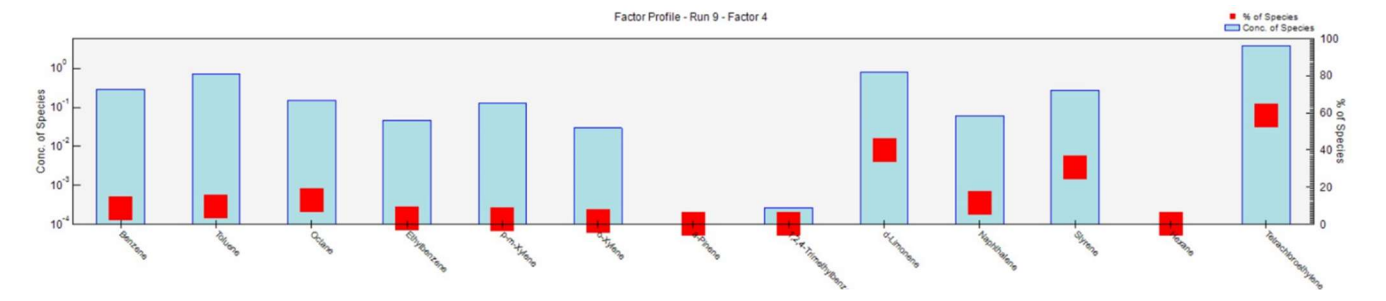
Διάγραμμα 4.9: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 1



Διάγραμμα 4.10: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 2

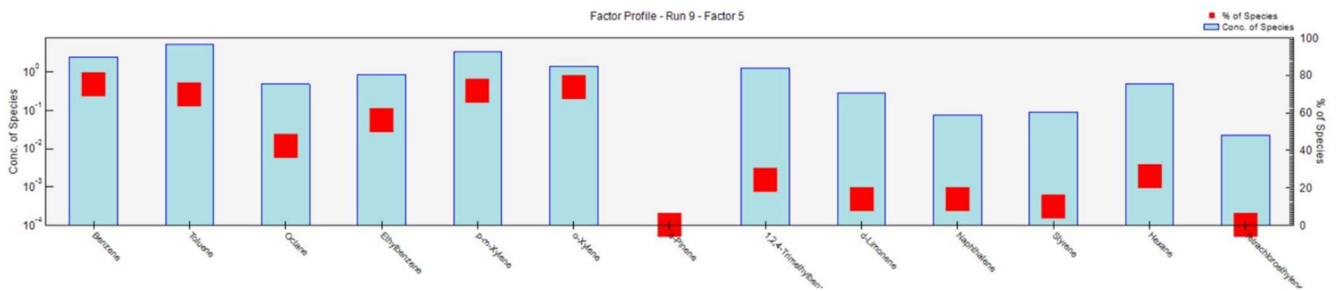


Διάγραμμα 4.11: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 3



Διάγραμμα 4.12: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 4





Διάγραμμα 4.13: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 5

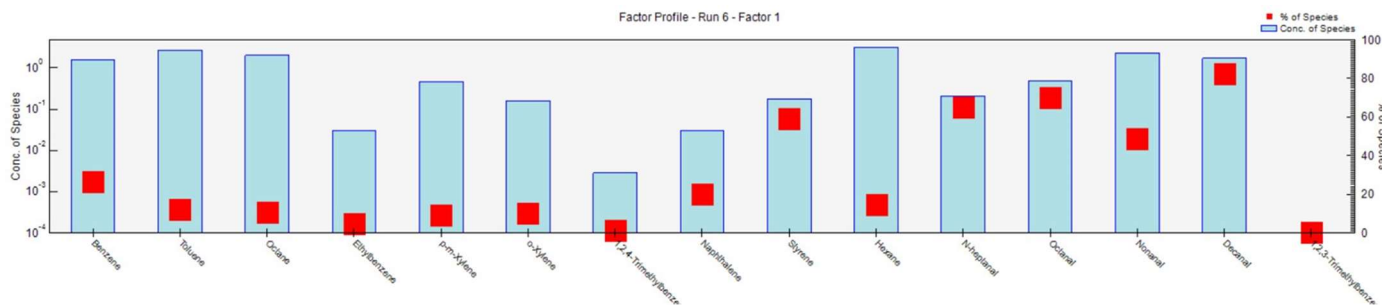
#### 4.2.3. Αποτελέσματα Κτιρίου III

Από την ανάλυση του προγράμματος αφαιρέθηκαν (ορισμός ως bad) οι κάτωθι χημικές ενώσεις: α-Pinene, d-Limonene, beta-Pinene, Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, Butyl Acetate, 3-Carene. Ακόμη επιλέχθηκαν ως αδύναμες (weak) η N-heptanal και η Octanal και οι υπόλοιπες ουσίες παρέμειναν ως ισχυρές (strong).

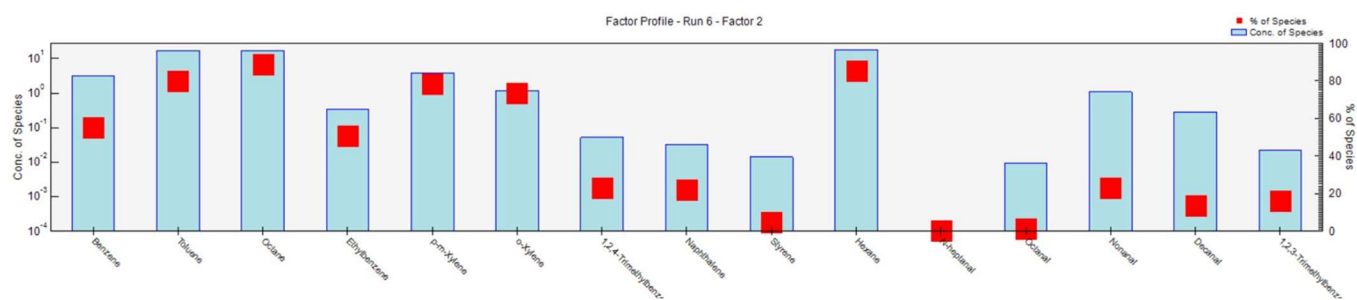
Κατόπιν, έγιναν τρεξίματα για 3 και 4 παράγοντες και κρίθηκε πως οι 3 περιγράφουν καλύτερα το πρόβλημα και εμφανίζουν καλά αριθμητικά και γραφικά αποτελέσματα. Αυτοί είναι:

- Factor 1: 85% Decanal, 70% Octanal, 65% N-heptanal, 60% Styrene, 50% Nonanal, 30% Benzene → κάπνισμα
- Factor 2: 90% Octane, 85% Toluene και Hexane, 75% p-m-Xylene και o-Xylene, 50% Benzene και Ethylbenzene, 35% Naphthalene και 1,2,3-Trimethylbenzene → εξατμίσεις
- Factor 3: 80% 1,2,3-Trimethylbenzene, 75% 1,2,4-Trimethylbenzene, 60% Naphthalene, 45% Ethylbenzene, 35% N-heptanal και Styrene → καταναλωτικά προϊόντα

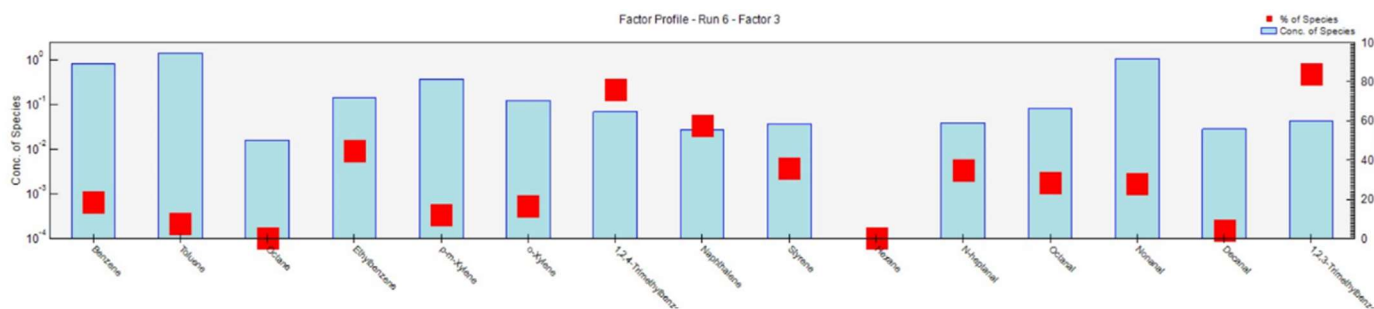
Στα Διαγράμματα 4.14, 4.15, 4.16 αποτυπώνεται το ποσοστό συνεισφοράς της κάθε χημικής ένωσης σε κάθε έναν από τους παράγοντες. Σημειώνεται, επίσης, πως υπήρξε δυσκολία στην ταυτοποίηση του τρίτου παράγοντα καθώς οι κύριοι ανιχνευτές των αρωματικών προϊόντων είναι τα πινένια και το λιμονένιο, τα οποία δεν έχουν συμπεριληφθεί στην ανάλυση.



Διάγραμμα 4.14: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 1



Διάγραμμα 4.15: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 2



Διάγραμμα 4.16: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 3

Ακολουθεί ο Πίνακας 4.2 που περιέχει τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκεντρωτικά, από τα 3 κτίρια.

<b>Κτίριο</b>	<b>Παράγοντες</b>	<b>Κύριοι ιχνηθέτες</b>
I	Κίνηση οχημάτων	Benzene, Toluene, Ethylbenzene
	Αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα	o-Xylene, p-m-Xylene, Ethylbenzene
	Άκαυστο καύσιμο	Naphthalene, 1,2,4-Trimethylbenzene, 1,2,3-Trimethylbenzene, Octanal
	Χημικά εργαστηρίου	n-Heptanal, Octane, Decanal, Nonanal Octanal
II	Κάπνισμα	Naphthalene, Hexane, Styrene d-Limonene, Octane
	Φυτά	$\alpha$ -Pinene, Toluene, 1,2,4-Trimethylbenzene
	Γεωπονικά είδη	1,2,4-Trimethylbenzene, d-Limonene, Styrene
	Αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα	Tetrachloroethylene, d-Limonene, Styrene
	Κίνηση/εξατμίσεις οχημάτων	Benzene, o-Xylene, p-m-Xylene, Toluene, Ethylbenzene, Octane
III	Κάπνισμα	Decanal, Octanal, n-Heptanal, Styrene, Nonanal, Benzene
	Καταναλωτικά προϊόντα	1,2,3-Trimethylbenzene, 1,2,4-Trimethylbenzene Naphthalene, Ethylbenzene, Styrene, n-Heptanal
	Κίνηση/εξατμίσεις οχημάτων	Octane, Toluene, Hexane, p-m-Xylene, o-Xylene, Ethylbenzene, Benzene

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Προβαίνοντας σε μία σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών κτιρίων με αυτά που προέκυψαν στη μελέτη του Campagnolo (2017), που αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.5, και με γνώμονα μόνο τις κοινές πτητικές οργανικές ενώσεις, παρατηρούμε αρκετές ομοιότητες. Τα BTEX και το hexane αποδίδονται ως ο παράγοντας που οφείλεται στην καύση καυσίμων, τη βιομηχανική δραστηριότητα και την κίνηση των οχημάτων, το  $\alpha$ -Pinene είναι ο κύριος ιχνηθέτης των αρωματισμένων καταναλωτικών προϊόντων αλλά και των εκπομπών από χαλιά και πατώματα ενώ το styrene εκπέμπεται από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του γραφείου.

## 5. Συμπεράσματα

Η πανδημία του Covid-19, που έπληξε πρόσφατα την ανθρωπότητα σε παγκόσμιο επίπεδο, αποτέλεσε εφαλτήριο για την αναθεώρηση των απαιτήσεων της ποιότητας του αέρα των εσωτερικών χώρων των κτιρίων (Roh et al., 2021). Κτιριακές μονάδες που εμφανίζουν έντονο συνωστισμό, όπως οι αίθουσες διδασκαλίας και οι χώροι γραφείων, συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον για τον εντοπισμό και τον περιορισμό των πηγών ρύπων και δη των πτητικών οργανικών ενώσεων, όπως πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις τους πολλές φορές είναι αποδεδειγμένα, σταθερά υψηλότερες σε εσωτερικούς χώρους απ' ότι σε εξωτερικούς.

Συμπερασματικά, και στα τρία κτίρια είναι έντονη η παρουσία πτητικών οργανικών ενώσεων που προέρχονται από την κίνηση των οχημάτων και τις εξατμίσεις τους, είτε βρίσκονται εντός είτε εκτός του αστικού ιστού. Βέβαια, το Κτίριο I, λαμβάνοντας υπόψη και το Διάγραμμα 4.1, φαίνεται να είναι περισσότερο επιβαρυνμένο, κυρίως λόγω των μεγαλύτερων μέσων συγκεντρώσεων βενζολίου και τολουολίου. Ένας ακόμη κοινός παράγοντας επιβάρυνσης του μικροπεριβάλλοντος αυτών των κτιρίων είναι τα αρωματισμένα καταναλωτικά προϊόντα λόγω της ισχυρής ανθρώπινης παρουσίας και δραστηριότητας.

Μελετώντας τις συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν σε κάθε δείγμα και είναι αποτυπωμένες σε λογιστικά φύλλα, όπως αυτό που αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 4.1, μόνο στο Κτίριο III υπήρχαν δείγματα (μόλις 5) που ξεπερνούσαν το ανώτατο όριο έκθεσης σε TVOC που έχει θέσει ο Π.Ο.Υ., σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1. Ακόμη, στο γεωπονικό κατάστημα, η ναφθαλίνη συναντάται σε αισθητά υψηλότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους χώρους και πιθανώς ξεπερνά το ετήσιο όριο έκθεσης που έχει θεσπίσει ο Π.Ο.Υ. βάσει του Πίνακα 2.3. Οι ίδιες επισημάνσεις ισχύουν και για το τετραχλωροαιθυλένιο. Αυτές οι διαπιστώσεις, σαφώς, δεν αρκούν για το χαρακτηρισμό της ποιότητας του αέρα αυτών των χώρων. Ούτως ή άλλως, δεν υπάρχει ακόμη και αρκετή βιβλιογραφία που να αφορά στη μελέτη ποιότητας αέρα χώρων γραφείων που να βασίζεται στον εντοπισμό πηγών VOCs εφαρμόζοντας PMF, επομένως δεν ήταν εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια μελλοντικής έρευνας, θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η δειγματοληψία κατά τη χειμερινή και την καλοκαιρινή περίοδο στα τρία

κτίρια ώστε να καταγραφεί πιθανή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων λόγω της μεταβολής των καιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου κ.λπ.). Έτσι, θα προέκυπτε και μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων που θα βοηθούσε στον ορθότερο εντοπισμό πηγών και στον πιθανό διαχωρισμό των εσωτερικών από τα εξωτερικά δείγματα. Ακόμη, θα ήταν χρήσιμη και η επιλογή διαφορετικού λογισμικού για το source apportionment, όπως η τεχνική PCA, που ενδείκνυται για αυτές τις ουσίες αλλά και τους χώρους μελέτης. Το source apportionment, βέβαια, είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον συσχετισμό πηγών και ρύπων που, όμως, χρήζει περισσότερης έρευνας για να μπορέσει να δώσει ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα του.

Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη και η μελέτη διαφορετικού τύπου κτιρίων, όπως οι κατοικίες και τα σχολεία, καθώς οι άνθρωποι δαπανούν εξίσου μεγάλα διαστήματα της ζωής τους εκεί και κλείνοντας θα παρουσίαζε, επίσης, ενδιαφέρον η πιθανή συσχέτιση της ποιότητας του αέρα με την ενεργειακή κατανάλωση των χώρων.

## Βιβλιογραφία

- (1) Norris, G.; Duvall, R.; Brown, S.; Bai, S. Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide, **2004**.
- (2) WHO. WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants; WHO: Geneva, Switzerland, **2010**.
- (3) Wi, S.; Kang, Y.; Yang, S.; Kim, Y. U.; Kim, S. Hazard Evaluation of Indoor Environment Based on Long-Term Pollutant Emission Characteristics of Building Insulation Materials: An Empirical Study. *Environmental Pollution* **2021**, 285, 117223. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117223>.
- (4) *Indoor Environmental Quality (IEQ) - GSA Sustainable Facilities Tool*. <https://sftool.gov/learn/about/1/indoor-environmental-quality-ieq>.
- (5) Environment, I. *Indoor Environmental Quality parameter*. Medium. <https://medium.com/@ieqandwellbeing/indoor-environmental-quality-parameter-56aab5cffd8>.
- (6) Al Horr, Y.; Arif, M.; Kaushik, A.; Mazroei, A.; Katafygiotou, M.; Elsarrag, E. Occupant Productivity and Office Indoor Environment Quality: A Review of the Literature. *Building and Environment* **2016**, 105, 369–389. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.001>.
- (7) CEN. **2005**. EN ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Brussels.
- (8) CEN. **2011**. EN 12464-1. Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- (9) CEN. **2012**. EN15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustic. Brussels
- (10) CEN. **2014**. EN 16798-2, Energy Performance of Buildings — Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics —Module M1-6, European Standard, 2014.

- (11) CEN. **2018**. EN 12665. Light and lighting – Basic terms and criteria for specifying lighting requirements. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- (12) Y.A. YPIEN/ΔΑΟΚΑ/66006/2360/2023 (ΦΕΚ 3985/Β' 22.6.2023) | ΕΛΙΝΥΑΕ. [https://www.elinyae.gr/en/node/74780\\_3046/304](https://www.elinyae.gr/en/node/74780_3046/304)
- (13) Κοτσίρης, Γ. Α. Θερμική Άνεση; Ίων, **2007**.
- (14) BS EN ISO 3382-1, (**2009**). Acoustics – Measurement of room acoustic parameters.
- (15) ANSI/ASHRAE. 2023. ANSI/ASHRAE STANDARD 55-**2023**. Thermal environmental conditions for human occupancy, Atlanta.
- (16) Licina, D.; Yildirim, S. Occupant Satisfaction with Indoor Environmental Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Self-Reported Productivity before and after Relocation into WELL-Certified Office Buildings. Building and Environment **2021**, 204, 108183. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108183>.
- (17) WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789289002134>
- (18) Buildings Performance Institute Europe (BPIE), **2011**. EUROPE'S BUILDINGS UNDER THE MICROSCOPE. A country-by-country review of the energy performance of buildings.
- (19) Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (Recast); **2010**; Vol. 153. <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj/eng>.
- (20) INDAIRPOLLNET, **2021**. Final summary report of INDAIRPOLLNET Working Group 5: In what type of buildings should we aim to run a field campaign? Deliverables of COST Action 17136 Indoor Air Pollution Network INDAIRPOLLNET.
- (21) Belis, C.; Favez, O.; Mircea, M.; Diapouli, E.; Manousakas, M.-I.; Vratolis, S.; Gilardoni, S.; Paglione, M.; Močnik, G.; Mooibroek, D.; Takahama, S.; Vecchi, R.; Paatero, P.; Salvador, P.; Decesari, S. European Guide on Air Pollution Source Apportionment with Receptor Models - Revised Version 2019.; **2019**. <https://doi.org/10.2760/439106>.
- (22) Claudio A. Belis, Bo R. Larsen, Fulvio Amato, Imad El Haddad, Olivier Favez, Roy M.Harrison, Philip K. Hopke, Silvia Nava, Pentti Paatero, André

- Prévôt, Ulrich Quass, Roberta Vecchi, Mar Viana. European Guide on Air Pollution Source Apportionment with Receptor Models; **2014**.
- (23) Λαζαρίδης, Μ. *Ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους*; ΤΖΙΟΛΑ: Θεσσαλονίκη, **2008**.
- (24) Saraga, D. E.; Querol, X.; Duarte, R. M. B. O.; Aquilina, N. J.; Canha, N.; Alvarez, E. G.; Jovasevic-Stojanovic, M.; Bekö, G.; Byčenkienė, S.; Kovacevic, R.; Plauškaitė, K.; Carslaw, N. Source Apportionment for Indoor Air Pollution: Current Challenges and Future Directions. *Science of The Total Environment* **2023**, *900*, 165744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165744>.
- (25) Campagnolo, D.; Saraga, D. E.; Cattaneo, A.; Spinazzè, A.; Mandin, C.; Mabilia, R.; Perreca, E.; Sakellaris, I.; Canha, N.; Mihucz, V. G.; Szigeti, T.; Ventura, G.; Madureira, J.; De Oliveira Fernandes, E.; De Kluizenaar, Y.; Cornelissen, E.; Hänninen, O.; Carrer, P.; Wolkoff, P.; Cavallo, D. M.; Bartzis, J. G. VOCs and Aldehydes Source Identification in European Office Buildings - The OFFICAIR Study. *Building and Environment* **2017**, *115*, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.009>.
- (26) Environmental Protection Agency. Indoor Air Facts No.4 Sick Building Syndrome. **1991**.
- (27) ANSI/ASHRAE. **2019**. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-**2019**, Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta.
- (28) Licina, D.; Langer, S. Indoor Air Quality Investigation before and after Relocation to WELL-Certified Office Buildings. *Building and Environment* **2021**, *204*, 108182. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108182>.
- (29) Sakellaris, I.; Papadopoulos, G.; Saraga, D.; Xenofontos, T.; Tolis, E.; Panaras, G.; Bartzis, J. Air Quality Versus Perceived Comfort and Health in Office Buildings at Western Macedonia Area, Greece during the Pandemic Period. *Applied Sciences* **2023**, *13* (2), 1137. <https://doi.org/10.3390/app13021137>.
- (30) Chatoutsidou, S. E.; Ondráček, J.; Tesar, O.; Tørseth, K.; Ždímal, V.; Lazaridis, M. Indoor/Outdoor Particulate Matter Number and Mass Concentration in Modern Offices. *Building and Environment* **2015**, *92*, 462–474. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.023>.



- (31) Μπαρμπαρέσος, Ν. Διερεύνηση των επιπτώσεων της ποιότητας του αέρα στον εσωτερικό χώρο κτιρίου μητροπολιτικών περιοχών που χρησιμοποιούν ευπαθείς πληθυσμιακές ομάδες, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα Φυσικής, **2019**.
- (32) ProActive CMS, C. S. O. S. *Indoor air quality estimator*.  
<http://www.construction-innovation.info/www.construction-innovation.info/index2f08.html?id=1140>.
- (33) TVOC Monitoring in Commercial and Office Buildings, **2022**.  
<https://atmotube.com/blog/tvoc-monitoring-in-commercial-and-office-buildings>
- (34) EU air quality standards. **2008**  
[https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en)
- (35) Σαραγά, Δ. Ανίχνευση πηγών αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα εσωτερικών χώρων. ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΑΘΗΝΑ, **2010**.  
<https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/26218>.
- (36) US EPA, O. *Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Part A*.  
<https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part>
- (37) *BREEAM | Sustainable Building Certification*. BREEAM.  
<https://breeam.com>
- (38) Canada, E. and C. C. *Toxic substances list: schedule 1*.  
<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/substances-list/toxic/schedule-1.html>
- (39) *Benzene - Cancer-Causing Substances - NCI*.  
<https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/substances/benzene>
- (40) Nikfar, S.; Behboudi, A. F. Limonene. In *Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)*; Wexler, P., Ed.; Academic Press: Oxford, **2014**; pp 78–82.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00628-X>.
- (41) Salehi, B.; Upadhyay, S.; Erdogan Orhan, I.; Kumar Jugran, A.; L.D. Jayaweera, S.; A. Dias, D.; Sharopov, F.; Taheri, Y.; Martins, N.; Baghalpour, N.; C. Cho, W.; Sharifi-Rad, J. Therapeutic Potential of  $\alpha$ - and  $\beta$ -Pinene: A Miracle Gift of Nature. *Biomolecules* **2019**, *9* (11), 738.  
<https://doi.org/10.3390/biom9110738>.

- (42) Mirkin, D. B. Chapter 94 - Benzene and Related Aromatic Hydrocarbons. In *Haddad and Winchester's Clinical Management of Poisoning and Drug Overdose (Fourth Edition)*; Shannon, M. W., Borron, S. W., Burns, M. J., Eds.; W.B. Saunders: Philadelphia, **2007**; pp 1363–1376. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7216-0693-4.50099-2>.
- (43) *Styrene*. National Institute of Environmental Health Sciences. <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/styrene>
- (44) Clough, S. R. Hexane. In *Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)*; Wexler, P., Ed.; Academic Press: Oxford, **2014**; pp 900–904. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00397-3>.
- (45) Clough, S. R. Octane. In *Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)*; Wexler, P., Ed.; Academic Press: Oxford, **2014**; pp 652–654. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00416-4>
- (46) PubChem. *Naphthalene*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/931>
- (47) Davis, J. A.; Kraft, A. Trimethylbenzenes. In *Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition)*; Wexler, P., Ed.; Academic Press: Oxford, **2024**; pp 621–626. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00465-6>.
- (48) *Principal Component Analysis (PCA) Explained*. Built In. <https://builtin.com/data-science/step-step-explanation-principal-component-analysis>
- (49) *SPSS Statistics Subscription - Early Access*. <https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/beta?topic=features-hierarchical-cluster-analysis>
- (50) *Comprehensive Guide to Factor Analysis*. Statistics Solutions. <https://www.statisticssolutions.com/free-resources/directory-of-statistical-analyses/factor-analysis/>
- (51) EPA Unmix 6.0 Fundamentals & User Guide. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/unmix-6-user-manual.pdf>.
- (52) Roh, T.; Moreno-Rangel, A.; Baek, J.; Obeng, A.; Hasan, N.T.; Carrillo, G. Indoor Air Quality and Health Outcomes in Employees Working from Home during the COVID-19 Pandemic: A Pilot Study. *Atmosphere* **2021**, *12*, 1665. <https://doi.org/10.3390/atmos12121665>.

- (53) US EPA, O. *Basic Information about NO2*. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>
- (54) Subri, M.S.M., Arifin, K., Sohaimin, M.F.A.M., Abas, A., **2024**. The parameter of the Sick Building Syndrome: A systematic literature review. *Heliyon* 10, e32431. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32431>
- (55) *Revised Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. European Commission - European Commission. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_24\\_1966](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_24_1966)

## Παράρτημα

Εικόνα 2.1: Παράμετροι ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος και η επίδρασή τους . -	
11 -	
Εικόνα 2.2: Κύριες πηγές ρύπανσης εσωτερικού περιβάλλοντος .....	- 20 -
Εικόνα 3.1: Εξωτερική όψη του Κτιρίου Ι .....	- 46 -
Εικόνα 3.2: Πρόσοψη του Κτιρίου ΙΙ .....	- 47 -
Εικόνα 3.3: Εσωτερικός χώρος του Κτιρίου ΙΙ.....	- 47 -
Εικόνα 3.4: Εξωτερική και εσωτερική όψη του Κτιρίου ΙΙΙ.....	- 49 -
Εικόνα 3.5: Χρωματογράφος μάζας Agilent 6890 N/5973 .....	- 50 -
Εικόνα 3.6: Αντλία χαμηλού όγκου με σωληνάκι .....	- 51 -
Εικόνα 3.7: Εξοπλισμός δειγματοληψίας στο κτίριο ΙΙ .....	- 51 -
Εικόνα 3.8: Εξοπλισμός δειγματοληψίας στο κτίριο ΙΙΙ.....	- 51 -
Εικόνα 3.9: Επεξεργασία αποτελεσμάτων της χημικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό των VOCs .....	- 53 -
Εικόνα 3.10: Ακριβής προσδιορισμός των χημικών ενώσεων που εντοπίστηκαν . -	53 -
Εικόνα 3.11: Κασετίνα εισαγωγής των δειγμάτων tenax στο χρωματογράφο μάζας GC – MS.....	- 54 -
Εικόνα 4.1: Βήμα 1 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 56 -
Εικόνα 4.2: Βήματα 2 και 3 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 57 -
Εικόνα 4.3: Βήμα 4 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 58 -
Εικόνα 4.4: Βήμα 5 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 58 -
Εικόνα 4.5: Βήμα 6 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 59 -
Εικόνα 4.6: Βήμα 7 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 60 -
Εικόνα 4.7: Βήμα 8 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 60 -
Εικόνα 4.8: Βήμα 9 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 61 -
Εικόνα 4.9: Βήμα 10 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF.....	- 62 -
Εικόνα 4.10: Βήμα 11 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 62 -
Εικόνα 4.11: Βήμα 12 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 63 -
Εικόνα 4.12: Βήμα 13 της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος PMF .....	- 64 -
Πίνακας 2.1: Κλίμακα έκθεσης σε συγκεντρώσεις συνολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) (Atmotube, 2022).....	- 20 -

Πίνακας 2.2: Όρια έκθεσης των ανθρώπων σε διοξείδιο του θείου (European Environment Agency, 2008).....	- 21 -
Πίνακας 2.3: Όρια έκθεσης ανθρώπων σε ορισμένους εσωτερικούς ρύπους σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO, 2010).....	- 21 -
Πίνακας 2.4: Οριακές τιμές για τα PM <sub>10</sub> και PM <sub>2.5</sub> (E.E., 2008).....	- 22 -
Πίνακας 2.5: Χαρακτηρισμός αερισμού εσωτερικών χώρων βάσει της συγκέντρωσης CO <sub>2</sub> (ASHRAE, 2019).....	- 22 -
Πίνακας 2.6: Ποιότητα αέρα για οκτάωρη έκθεση σε όζον (EPA, 2015).....	- 22 -
Πίνακας 2.7: Καταγραφή όλων των πτητικών οργανικών ενώσεων (Canada Government, 1999).....	- 32 -
Πίνακας 2.8: Μεγάλες κατηγορίες εκπομπής VOCs και αναλυτική καταγραφή τους (Saraga et al., 2023).....	- 37 -
Πίνακας 4.1: Λόγος συγκεντρώσεων εσωτερικών προς εξωτερικών δειγμάτων ...	- 67 -
Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.....	- 74 -
Διάγραμμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση των διαφορετικών μεθόδων για ταυτοποίηση πηγών (Belis, 2019).....	- 39 -
Διάγραμμα 2.2: Αποτύπωση των μοντέλων αποδέκτη και της απαιτούμενης γνώσης για τη ρυπογόνο πηγή (Belis, 2014).....	- 40 -
Διάγραμμα 4.1: Συγκεντρώσεις των πτητικών οργανικών ενώσεων που είναι κοινές για τα τρία κτίρια.....	- 65 -
Διάγραμμα 4.2: Διασπορά στις συγκεντρώσεις κάθε χημικής ουσίας για το Κτίριο Ι..	- 65 -
Διάγραμμα 4.3: Διασπορά στις συγκεντρώσεις κάθε χημικής ουσίας για το Κτίριο ΙΙ..	- 66 -
Διάγραμμα 4.4: Διασπορά στις συγκεντρώσεις κάθε χημικής ουσίας για το Κτίριο ΙΙΙ..	- 66 -
Διάγραμμα 4.5: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 1.....	- 69 -
Διάγραμμα 4.6: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 2.....	- 69 -
Διάγραμμα 4.7: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 3.....	- 69 -
Διάγραμμα 4.8: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 4.....	- 70 -
Διάγραμμα 4.9: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 1.....	- 71 -
Διάγραμμα 4.10: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 2.....	- 71 -

Διάγραμμα 4.11: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 3 .....	- 71 -
Διάγραμμα 4.12: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 4 .....	- 71 -
Διάγραμμα 4.13: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 5 .....	- 72 -
Διάγραμμα 4.14: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 1 .....	- 73 -
Διάγραμμα 4.15: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 2 .....	- 73 -
Διάγραμμα 4.16: Ραβδόγραμμα συγκεντρώσεων των ουσιών του Factor 3 .....	- 73 -