



# Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την πυρκαγιά στη Μονάδα Διαχείρισης Ανακυκλώσιμων Υλικών στη Λέσβο

Τεχνική Έκθεση

## Επιστημονική Ομάδα

- Αθανάσιος Σ. Στασινάκης, Καθηγητής – Επιστημονικά Υπεύθυνος
- Χριστόδουλος Πηλίνης, Καθηγητής
- Χρήστος Ματσούκας, Αναπληρωτής Καθηγητής
- Δρ. Μαρία Αλούπη, Ε.ΔΙ.Π
- Δρ. Μαρία Χατζηαντωνίου, Ε.ΔΙ.Π
- Μαρία Ελευθεριάδου, Περιβαλλοντολόγος Msc

# Περιεχόμενα

Σύνοψη.....	6
1. Εισαγωγή.....	8
1.1.Οι πυρκαγιές σε χώρους αποθήκευσης απορριμμάτων ως πηγή ρύπανσης του περιβάλλοντος.....	8
Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	8
Ρύπανση εδάφους .....	9
Ρύπανση υδάτων .....	9
1.2 Ρύπανση εδάφους και εκτίμηση κινδύνου για την υγεία .....	9
1.3 Χρονικό της πυρκαγιάς και σκοπός της μελέτης .....	11
2. Μεθοδολογία.....	13
2.1 Περιγραφή των εγκαταστάσεων της εταιρείας διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών .....	13
2.2 Δειγματοληψία εδάφους .....	13
2.3 Μετρήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης και δειγματοληψία αέρα.....	13
2.4 Χημικές αναλύσεις οργανικών ενώσεων και βαρέων μετάλλων.....	15
3. Αποτελέσματα και συζήτηση .....	16
3.1 Οργανικοί ρύποι στο χώμα .....	16
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, PAHs .....	16
Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) .....	23
3.2 Βαρέα μέταλλα στο έδαφος .....	27
3.3 Εκτίμηση κινδύνου για τη δημόσια υγεία από τις αναλύσεις στο χώμα.....	33
3.4 Μετρήσεις ατμοσφαιρικών σωματιδίων .....	40
4. Συμπεράσματα και προτάσεις.....	43
5. Βιβλιογραφία .....	45

## Περιεχόμενα Εικόνων

<b>Εικόνα 1.</b> (α) & (β). Εικόνες από την πυρκαγιά στην «Ανακύκλωση Αιγαίου» - Πηγή: εφημερίδα το ΒΗΜΑ.....	12
<b>Εικόνα 2.</b> Σημεία δειγματοληψίας. Το κόκκινο αστέρι δηλώνει τη θέση του εργοστασίου ανακύκλωσης και ο πράσινος κύκλος το σημείο δειγματοληψίας των ατμοσφαιρικών σωματιδίων. ....	14
<b>Εικόνα 3.</b> Εγκατάσταση οργάνων συλλογής και μέτρησης της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών σωματιδίων. ....	14
<b>Εικόνα 4.</b> Χημική δομή των 16 PAHs που προσδιορίστηκαν .....	17
<b>Εικόνα 5.</b> Συνολική συγκέντρωση HMW και LMW PAHs σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης (σε μg/kg ξηρού εδάφους).....	19
<b>Εικόνα 6.</b> Διάγραμμα διασταυρούμενης απεικόνισης (cross plot) των τιμών του λόγου FLAN/(FLAN + PYR) σε σχέση με τις τιμές του λόγου B[A]A/(B[A]A + CHR) (α), και του λόγου AN/(AN+PHE) σε σχέση με τις τιμές του λόγου FLAN/(FLAN + PYR) (β). Οι συνεχείς γραμμές δείχνουν τις οριακές τιμές των λόγων (βλ. Πίνακα 3).....	21
<b>Εικόνα 7.</b> (α) Συγκέντρωση PAHs στα ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια και στο έδαφος, σε μg/kg, και (β) λόγος συγκέντρωσης στο έδαφος προς τη συγκέντρωση τα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Για το έδαφος απεικονίζεται ο μέσος όρος των δειγμάτων.....	23
<b>Εικόνα 8.</b> Χημική δομή μερικών PCBs .....	24
<b>Εικόνα 9.</b> Συγκεντρώσεις των PCBs που ανιχνεύθηκαν σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης (σε μg/kg ξηρού εδάφους).....	26
<b>Εικόνα 10.</b> Γραφική απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας επί των κυρίων συνιστωσών PC1 και PC2 (α), PC3 και PC4 (β). Σημειώνονται μόνο τα σημεία που ξεχωρίζουν. ....	32
<b>Εικόνα 11.</b> Καθορισμός τιμών ελέγχου (screening values) με βάση διάφορα επίπεδα κινδύνου και οι διαφορετικές εφαρμογές των τιμών ελέγχου (προσαρμογή από [44]) .....	33
<b>Εικόνα 12.</b> Προειδοποιητικές τιμές SSV σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και μετρημένες συγκεντρώσεις PAHs και PCBs στην περιοχή μελέτης (οι μαύρες γραμμές δείχνουν τη συγκέντρωση σε κάθε σημείο δειγματοληψίας και ο πορτοκαλί κύκλος το μέσο όρο τους). Ο άξονας της συγκέντρωσης είναι σε λογαριθμική κλίμακα σε όλα τα γραφήματα. Όλες οι τιμές σε mg/kg ξηρού εδάφους. ....	37
<b>Εικόνα 13.</b> Προειδοποιητικές τιμές SSV σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και μετρημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην περιοχή μελέτης (οι μαύρες γραμμές δείχνουν τη συγκέντρωση σε κάθε σημείο δειγματοληψίας και ο πορτοκαλί κύκλος το μέσο όρο τους). Ο άξονας της συγκέντρωσης είναι σε λογαριθμική κλίμακα σε όλα τα γραφήματα. Όλες οι τιμές σε mg/kg ξηρού εδάφους. ....	39
<b>Εικόνα 14.</b> Μετρήσεις σωματιδίων PM2.5 στο Κτίριο Ξενία (Τμήμα Περιβάλλοντος), στο κέντρο της Μυτιλήνης, στην Επάνω Σκάλα, στο Κοινοτικό Γραφείο Μόριας και στον Περιφερειακό Δρόμο Μόριας για το διάστημα 21.7.2025 (10:00) έως και 27.7.2025 (00:00) .....	41

## Περιεχόμενα Πινάκων

<b>Πίνακας 1.</b> Συγκεντρώσεις πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs) σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης, σε $\mu\text{g}/\text{kg}$ ξηρού εδάφους.....	16
<b>Πίνακας 2.</b> ΣΡΑΗs ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) σε εδάφη από την περιοχή μελέτης και από μη βιομηχανικές και αστικές περιοχές σε διάφορες χώρες (συνδυασμός δεδομένων από [63, 64]) .....	19
<b>Πίνακας 3.</b> Διαγνωστικοί λόγοι για την αναγνώριση της προέλευσης των PAHs σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης (AN: Anthracene, PHE: Phenanthrene, BaA: Benz(a)anthracene, CHR: Chrysene, FLA: Fluoranthene, PYR: Pyrene).....	20
<b>Πίνακας 4.</b> Συγκεντρώσεις PAHs στα αιωρούμενα ατμοσφαιρικά σωματίδια της περιοχής μελέτης, σε $\mu\text{g}/\text{kg}$ ξηρής μάζας .....	22
<b>Πίνακας 5.</b> Συγκεντρώσεις πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (PCBs) σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης, σε $\mu\text{g}/\text{kg}$ ξηρού εδάφους.....	25
<b>Πίνακας 6.</b> Συγκεντρώσεις ΣPCBs ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) σε εδάφη από την περιοχή μελέτης και από περιοχές με διάφορες χρήσεις γης στην Ευρώπη.....	27
<b>Πίνακας 7.</b> Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης, σε $\text{mg}/\text{kg}$ ξηρού εδάφους.....	29
<b>Πίνακας 8.</b> Διάμεσες και μέγιστες (σε παρένθεση) συγκεντρώσεις μερικών βαρέων μετάλλων στα εδάφη της Ευρώπης και της Αμερικής και παγκόσμιος μέσος όρος (σε $\text{mg}/\text{kg}$ ) .....	30
<b>Πίνακας 9.</b> Κύριες συνιστώσες των συγκεντρώσεων των μετάλλων.....	31
<b>Πίνακας 10.</b> Προειδοποιητικές τιμές SSV για οργανικούς ρύπους ( $\text{mg}/\text{kg}$ ξηρού εδάφους) .....	35
<b>Πίνακας 11.</b> Προειδοποιητικές τιμές SSV για βαρέα μέταλλα ( $\text{mg}/\text{kg}$ ξηρού εδάφους) .....	35
<b>Πίνακας 12.</b> Μέσοι όροι συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στις θέσεις δειγματοληψίας .....	42

## Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε στις 22.07.2025 σε περίφρακτο χώρο της εταιρείας διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών «Ανακύκλωση Αιγαίου», στην περιοχή της Μόριας, περίπου πέντε χιλιόμετρα βόρεια της πόλης της Μυτιλήνης. Για το λόγο αυτό συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους από δέκα σημεία από την περιοχή γύρω από την εγκατάσταση (αποστάσεις 30 έως 1350 m) και προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονοθετικών (PAHs), πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (PCBs) και βαρέων μετάλλων. Παράλληλα, μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς τοποθετήθηκαν από το Πανεπιστήμιο δύο όργανα μέτρησης σωματιδιακής αέρας ρύπανσης με μέγεθος μικρότερο των 2,5 εκατομμυριοστών του μέτρου (PM<sub>2.5</sub>) σε περιοχές πλησίον της εταιρείας ανακύκλωσης και συλλέχθηκε δείγμα αιωρούμενων ατμοσφαιρικών σωματιδίων το οποίο και αναλύθηκε για την παρουσία PAHs και PCBs.

Η δειγματοληψία εδάφους, οι μετρήσεις αέρας ρύπανσης, η αξιολόγηση του συνόλου των αποτελεσμάτων και η συγγραφή της παρούσας Τεχνικής Έκθεσης πραγματοποιήθηκαν από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Οι χημικές αναλύσεις των οργανικών και ανόργανων ρύπων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας του Τμήματος Χημείας του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Η ελληνική νομοθεσία και η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν έχουν θεσπίσει έως σήμερα όρια για τις συγκεντρώσεις οργανικών ρύπων και βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας από την παρουσία αυτών των ουσιών στο έδαφος πολλές ευρωπαϊκές χώρες όμως έχουν ορίσει προειδοποιητικές τιμές πιθανού κινδύνου (Soil Screening Values, SSVs), που ενεργοποιούν περαιτέρω διερεύνηση, ειδική για την κάθε περιοχή.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων, τα επίπεδα των PAHs και των PCBs στην περιοχή μελέτης είναι εν γένει τάξεις μεγέθους χαμηλότερα από τις αυστηρότερες προειδοποιητικές τιμές πιθανού κινδύνου για τη δημόσια υγεία που θέτει η διεθνής νομοθεσία και ως εκ τούτου δεν επιβάλλεται η λήψη μέτρων εξυγίανσης του εδάφους σε κανένα σημείο της περιοχής καθώς δεν διαφαίνεται κίνδυνος για την υγεία των κατοίκων.

Σύγκριση του αθροίσματος των συγκεντρώσεων των PAHs στην περιοχή μελέτης με τα επίπεδα των PAHs σε διαφορετικές περιοχές ανά τον κόσμο, δείχνει πως δεν υπάρχει σοβαρή περιβαλλοντική επιβάρυνση από τις συγκεκριμένες ουσίες. Παρά ταύτα, η συστηματική ανίχνευση διαφορετικών PAHs στα εδάφη γύρω από τη μονάδα ανακύκλωσης καθώς και η ανίχνευση συγκεκριμένων ουσιών στα ατμοσφαιρικά σωματίδια μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς αποτυπώνει αφενός την μακροχρόνια απόθεση PAHs που προέρχονται από την κυκλοφορία των οχημάτων στην περιοχή αφετέρου την εκπομπή πυρογενών ενώσεων από την πρόσφατη πυρκαγιά.

Σύγκριση του αθροίσματος των PCBs στην περιοχή μελέτης με τη διεθνή βιβλιογραφία δείχνει πως οι τιμές που βρέθηκαν είναι παρόμοιες με αυτές που ανιχνεύονται σε περιοχές με μέτρια ή χαμηλά επίπεδα ρύπανσης, ενώ απέχει κατά μια τάξη μεγέθους από σοβαρά ρυπασμένες βιομηχανικές ή αστικές περιοχές. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του χαμηλού μοριακού βάρους PCB 28 στα σημεία κοντά στη μονάδα πιθανότατα δηλώνει την ταχεία μεταφορά και απόθεση του μετά την πυρκαγιά.

Σε αντίθεση με τους οργανικούς ρύπους, για τα βαρέα μέταλλα As, Cr, Pb, Ni, Co, Cu, Zn παρατηρούνται σημειακές υπερβάσεις των προειδοποιητικών τιμών πιθανού κινδύνου που αναφέρονται στη διεθνή νομοθεσία και ως εκ τούτου απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Ορισμένες από τις συγκεκριμένες υπερβάσεις αποδίδονται στην πυρκαγιά ενώ άλλες είναι πιθανό να οφείλονται στη μακροχρόνια λειτουργία της εταιρείας διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών στην περιοχή. Εξαιτίας αυτών των υπερβάσεων και

καθώς δεν είναι σαφές σε ποιο βαθμό έχουν επηρεαστεί τα υπόγεια νερά της περιοχής από τη λειτουργία της εγκατάστασης, προτείνεται η συστηματική παρακολούθηση των επιπέδων βαρέων μετάλλων σε έδαφος και υπόγεια νερά, σε ετήσια βάση.

Σε ότι αφορά στα αποτελέσματα των μετρήσεων ατμοσφαιρικών σωματιδίων, οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα έκθεση υποεκτιμούν τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς καθώς εκείνη την χρονική στιγμή δεν υπήρχαν εγκατεστημένοι σταθμοί μέτρησης στη μονάδα ανακύκλωσης και στους κοντινούς οικισμούς της Μόριας και της Παναγιούδας. Οι μετρήσεις από σταθμούς που βρίσκονταν στην πόλη (απόσταση >4 Km από την εστία της πυρκαγιάς) δείχνουν αύξηση των συγκεντρώσεων τις πρώτες ώρες μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς και μέχρι αυτή να τεθεί υπό έλεγχο. Η εγκατάσταση οργάνων μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης πλησίον της εγκατάστασης μετά το συμβάν έδειξε πως τις επόμενες 48 ώρες παρατηρήθηκαν αυξομειώσεις των συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>. Βάση των διαθέσιμων μετρήσεων όμως, δεν ξεπεράστηκαν σε κανέναν από τα σημεία παρακολούθησης τα ημερήσια όρια ενημέρωσης του κοινού και συναγερμού για την αέρια ρύπανση που έχει θέσει η ευρωπαϊκή νομοθεσία.

Για την έγκαιρη ενημέρωση των κατοίκων σε παρόμοια μελλοντικά περιστατικά και για τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας προτείνεται η εγκατάσταση σταθμών μέτρησης αιωρούμενων ατμοσφαιρικών σωματιδίων εντός του χώρου της εταιρείας, στους παρακείμενους οικισμούς Μόριας, Παναγιούδας, Αφάλωνα και στην Κλειστή Ελεγχόμενη Δομή (Κ.Ε.Δ.) Λέσβου. Καθώς σήμερα οι πλησιέστεροι σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικών σωματιδίων βρίσκονται στην πόλη της Μυτιλήνης, ενώ παράλληλα οι Μονάδες Ανακύκλωσης θεωρούνται χώροι υψηλού κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιών, η υφιστάμενη υποδομή παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κρίνεται ανεπαρκής.

Προτείνεται επίσης η ανάπτυξη από την Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας της Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου ενός πρωτοκόλλου παρακολούθησης της περιβαλλοντικής ποιότητας το οποίο θα μπορεί να εφαρμόζεται άμεσα μετά την εκδήλωση παρόμοιων περιστατικών πυρκαγιάς σε χώρους διαχείρισης απορριμμάτων και ανακυκλώσιμων υλικών.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Οι πυρκαγιές σε χώρους αποθήκευσης απορριμμάτων ως πηγή ρύπανσης του περιβάλλοντος

Τα τελευταία χρόνια, οι πυρκαγιές σε χώρους αποθήκευσης απορριμμάτων έχουν γίνει ολοένα και πιο συχνές, προκαλούμενες είτε από αυθόρμητες διεργασίες ανάφλεξης είτε από σκόπιμες ενέργειες [1, 2, 3, 4]. Οι πυρκαγιές σε τέτοιους χώρους μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, την ασφάλεια και την ανθρώπινη υγεία [5] καθώς με την καύση ορισμένοι από τους ρύπους που περιέχουν τα απορρίμματα ή παράγονται κατά τη διαδικασία απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, κάποιοι διαφεύγουν στα υπόγεια νερά λόγω έκπλυσης, ενώ άλλοι ρυπαίνουν το έδαφος γύρω από τον χώρο αποθήκευσης [6].

Ανάλογα με τη σύσταση των αποθηκευμένων απορριμμάτων, κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς μπορούν να εκπέμπονται διάφορες τοξικές ενώσεις, όπως βαρέα μέταλλα, ιχνοστοιχεία, μεταλλαξιόνες ενώσεις, τοξικές και καρκινογόνες ουσίες (πτητικές οργανικές ενώσεις, VOCs), πολυχλωριωμένα διβενζοφουράνια (PCDF) και πολυχλωριωμένες διβενζο-π-διοξίνες (PCDD), πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), καθώς και στερεά σωματίδια [3, 7, 8, 9]. Οι πυρκαγιές σε χώρους αποθήκευσης μπορούν να αποτελέσουν σημαντική περιβαλλοντική απειλή, μέσω ρύπανσης του αέρα, των υπόγειων υδάτων, των επιφανειακών υδάτων, του εδάφους και των καλλιεργειών [10, 11, 12]. Λόγω της ποικιλίας των απορριμμάτων που αποθηκεύονται στους χώρους αυτούς, η ποσότητα και ο τύπος των ουσιών και μειγμάτων που υπάρχουν εκεί είναι άγνωστα, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διεξαγωγή ουσιαστικής εκτίμησης κινδύνου [13]. Μεταξύ των υλικών που αποθηκεύονται σε χώρους αποθήκευσης απορριμμάτων, τα ελαστικά αποτελούν από τα πιο επικίνδυνα απόβλητα [14].

### Ατμοσφαιρική ρύπανση

Οι πυρκαγιές απορριμμάτων συμβάλλουν σημαντικά στη ρύπανση της ατμόσφαιρας [15]. Παρότι η συμβολή τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση δεν έχει μελετηθεί εκτενώς ως τοπικό ή παγκόσμιο φαινόμενο [16], οι επιπτώσεις τους είναι σοβαρές. Λόγω της υψηλής θερμότητας της καύσης, ο καπνός ανυψώνεται και διασπείρει ρύπους (διοξίνες, φουράνια, PCBs, PAHs, μέταλλα) και αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη μεταφορά τους σε μεγάλες αποστάσεις [17]. Η καύση υλικών όπως πλαστικά, σκουπίδια και βαμμένα ή βερνικωμένα ξύλα, ρυπαίνει την ατμόσφαιρα με καρκινογόνες ουσίες. Ο καπνός και η σκόνη μπορούν να επηρεάσουν μεγάλες περιοχές, προκαλώντας δυσάρεστες οσμές και ρύπανση τόσο εντός των κατοικιών όσο και σε εξωτερικά αντικείμενα. Η εκπομπή διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) και διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) οδηγεί σε σχηματισμό όξινης βροχής, η οποία προκαλεί φθορές στα οικοσυστήματα, στα εδάφη και στα κτίρια [18]. Επιπλέον, η ανοιχτή καύση απορριμμάτων απελευθερώνει σημαντικές ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου, όπως μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), καθώς και αιωρούμενα σωματίδια (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), τα οποία σχετίζονται με χαμηλή ποιότητα αέρα και αναπνευστικά προβλήματα [19, 20, 21, 22]. Εκτός των αναπνευστικών προβλημάτων, πολλές μελέτες μέχρι σήμερα έχουν δείξει ότι ο καπνός από την καύση απορριμμάτων μπορεί να αυξήσει τη συχνότητα νευρολογικών και μυοσκελετικών συμπτωμάτων [23], να επηρεάσει την αναπαραγωγή, την καρκινογένεση και το ορμονικό σύστημα [7] και να αυξήσει τον κίνδυνο θνησιμότητας [24]. Επικίνδυνες ενώσεις όπως οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), και ειδικότερα το βενζο(α)πυρένιο (BaP), απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από την ανεξέλεγκτη καύση οργανικών υλικών ή συσκευασιών μολυσμένων με φυτοφάρμακα και άλλες επικίνδυνες ουσίες [22, 25].

## Ρύπανση εδάφους

Η ρύπανση του εδάφους από πυρκαγιές απορριμμάτων προκαλείται από την απελευθέρωση κατά την καύση ανθεκτικών τοξικών ουσιών, χημικών, οξέων και τοξικών ισοτόπων, με αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία φυτών και ζώων. Οι πυρκαγιές συμβάλλουν σημαντικά στη ρύπανση του εδάφους, καθώς η στάχτη, ο καπνός και τα υπολείμματα καύσης εισχωρούν στο έδαφος και αυξάνουν την τοξικότητά του [26, 27]. Οι PAHs, κυρίως οι μη αλκυλιωμένοι, σχηματίζονται συχνά από ατελή καύση, αντίθετα με τους μεθυλιωμένους PAHs που έχουν συνήθως βιογενή προέλευση [28]. Οι τοξικές ουσίες που παράγονται κατά την πυρκαγιά ή κινητοποιούνται από τα απορρίμματα που ήδη τις περιέχουν μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα χερσαία οικοσυστήματα [29, 30]. Αφού εισέλθουν στο έδαφος, οι ρύποι αυτοί μπορεί να παραμείνουν για μεγάλο χρονικό διάστημα και να δημιουργήσουν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία μέσω άμεσης έκθεσης, μεταφοράς μέσω της τροφικής αλυσίδας και ρύπανσης των υπόγειων υδάτων [31].

## Ρύπανση υδάτων

Η ρύπανση των υδάτων από πυρκαγιές απορριμμάτων αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την ποιότητα των υδάτινων πόρων. Οι φωτιές σε απορρίμματα μπορούν να καταστρέψουν λίμνες, να αυξήσουν την οξύτητά τους και να απελευθερώσουν χημικές ουσίες που ρυπαίνουν τα νερά, επηρεάζοντας οικοσυστήματα και την παροχή γλυκού νερού για οικιακή και κοινοτική χρήση. Οι επικίνδυνες ουσίες που παράγονται κατά την καύση των απορριμμάτων (βαρέα μέταλλα, PAHs και άλλες οργανικές ενώσεις) μπορούν να εισχωρήσουν στα υπόγεια και επιφανειακά νερά [32]. Επιπλέον, η όξινη βροχή, αποτέλεσμα των εκπομπών SO<sub>2</sub> και NO<sub>2</sub> που παράγονται κατά την καύση στις πυρκαγιές όπως και στη βιομηχανία, εντείνει τη ρύπανση των υδάτων [33].

### 1.2 Ρύπανση εδάφους και εκτίμηση κινδύνου για την υγεία

Ρύπανση του εδάφους μπορεί να προκύψει από διάφορες πηγές, όπως τυχαία βιομηχανική διαρροή χημικών ουσιών, διαρροή από χώρους υγειονομικής ταφής επικίνδυνων αποβλήτων, σκόπιμη χρήση ρυπασμένων υλικών για επιχωμάτωση ή έλεγχο της σκόνης, γεωργικές δραστηριότητες [34, 35] ή καύση απορριμμάτων [36].

Τα ρυπασμένα εδάφη μπορούν να αποτελέσουν απειλή για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον μέσω

- α. άμεσης έκθεσης, με δερματική επαφή, τυχαία κατάποση ή εισπνοή σωματιδίων εδάφους και οικιακής σκόνης
- β. έμμεσης έκθεσης, με εισπνοή πτητικών ουσιών και σκόνης, κατάποση υπόγειου νερού, ρυπασμένου με χημικές ουσίες χημικών ουσιών που έχουν μεταναστεύσει μέσα από το έδαφος προς τον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα, κατανάλωση προϊόντων που καλλιεργούνται σε ρυπασμένο έδαφος, έκθεση σε επιφανειακά ύδατα που έχουν ρυπανθεί με αερομεταφερόμενη σκόνη ή απορροή ρυπασμένων υδάτων

Έκθεση μπορεί επίσης να συμβεί κατά τη διάρκεια επεξεργασίας ή αναμόρφωσης των εδαφών, για παράδειγμα κατά την ανακατασκευή ενός χώρου [34, 35, 37, 38].

Τα παιδιά εκτίθενται συχνά περισσότερο σε περιβαλλοντικούς ρύπους από τους ενήλικες, καθώς καταναλώνουν περισσότερη τροφή και νερό και έχουν υψηλότερους ρυθμούς αναπνοής ανά κιλό σωματικού βάρους. Επιπλέον, τα μικρά παιδιά παίζουν κοντά στο έδαφος και έρχονται σε επαφή με

ρυπασμένο χώμα σε εξωτερικούς χώρους και με ρυπασμένη σκόνη σε επιφάνειες και χαλιά εσωτερικών χώρων. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η ακούσια κατάποση εδάφους είναι συχνό φαινόμενο μεταξύ παιδιών ηλικίας έως 6 ετών, οδηγώντας σε σχετικά υψηλή βραχυπρόθεσμη έκθεση σε ρύπους που υπάρχουν στο έδαφος [34, 39, 40].

Η αξιολόγηση κινδύνου για την ανθρώπινη υγεία είναι μια διαρκής, πολυεπίπεδη διαδικασία που αξιολογεί τα εξής: [38, 41]

- ο την ποσότητα μιας χημικής ουσίας που υπάρχει σε ένα περιβαλλοντικό μέσο (π.χ. έδαφος, νερό, αέρας),
- ο την έκταση της έκθεσης που έχει ένα άτομο ή ένας οικολογικός αποδέκτης με το ρυπασμένο περιβαλλοντικό μέσο, και
- ο την εγγενή τοξικότητα της χημικής ουσίας

Στην πράξη, η διαδικασία εκτίμησης κινδύνου για μια ουσία με γνωστή τοξικολογική συμπεριφορά συνίσταται στη σύγκριση των επιπέδων στα οποία εκτίθεται ο πληθυσμός με τα επίπεδα έκθεσης στα οποία δεν αναμένονται τοξικές επιδράσεις [35, 38, 39, 42]. Όσον αφορά τον κίνδυνο από ρυπασμένο έδαφος, η αξιολόγηση περιλαμβάνει τη σύγκριση των επιπέδων ρύπανσης σε μια περιοχή με τιμές ελέγχου (screening levels) ώστε να καθοριστεί αν απαιτείται περαιτέρω έλεγχος ή ανάπτυξη κατάλληλης στρατηγικής διαχείρισης [42, 43].

Σε διεθνές επίπεδο, πολλές χώρες έχουν θεσπίσει νομοθετικά πλαίσια για την προστασία του εδάφους, που επικεντρώνονται κυρίως στη ρύπανση ως μία από τις απειλές υποβάθμισης της ποιότητας του εδάφους. Στο πλαίσιο αυτών περιλαμβάνονται «Τιμές Ελέγχου Εδάφους» (Soil Screening Values – SSVs) για μια σειρά δυνητικά τοξικών ρύπων [44]. Όσον αφορά την Ελλάδα, δεν έχουν ακόμη θεσπιστεί SSVs ούτε έχει θεσμοθετηθεί αντίστοιχη εθνική νομοθεσία. Παρόλο που η προστασία του εδάφους αποτελεί προτεραιότητα της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής πολιτικής εδώ και χρόνια, η ΕΕ δεν διέθετε ενιαίο νομοθετικό πλαίσιο για τη βιώσιμη χρήση και προστασία των εδαφών. Το 2006, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε τη Θεματική Στρατηγική για το Έδαφος, που περιλάμβανε πρόταση για Οδηγία-Πλαίσιο για το Έδαφος αλλά η πρόταση αποσύρθηκε το 2014 [45, 44]. Μόλις πρόσφατα, στις 29 Σεπτεμβρίου 2025, το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης υιοθέτησε επισήμως την Οδηγία για την Παρακολούθηση του Εδάφους, θέτοντας το πρώτο πανευρωπαϊκό πλαίσιο για την αξιολόγηση και παρακολούθηση των εδαφών, με τον απώτερο στόχο να επιτευχθούν υγιή εδάφη σε όλη την Ευρώπη έως το 2050. Σύμφωνα με την Οδηγία, τα κράτη μέλη θα εγκαταστήσουν συστήματα παρακολούθησης για την αξιολόγηση της φυσικής, χημικής και βιολογικής κατάστασης των εδαφών στο έδαφός τους, βάσει μιας κοινής μεθοδολογίας της ΕΕ. Η Οδηγία ορίζει κοινούς δείκτες εδάφους και εισάγει κατηγορίες για την περιγραφή της υγείας των εδαφών, συνδεδεμένες με μη δεσμευτικές τιμές στόχου σε επίπεδο ΕΕ και εθνικές τιμές προειδοποίησης. Ο καθορισμός όμως των τιμών στόχου και προειδοποίησης είναι μια διαδικασία που θα απαιτήσει πολλά χρόνια για να ολοκληρωθεί, και έτσι για την αξιολόγηση της ποιότητας του εδάφους σε μια περιοχή τα μόνα διαθέσιμα εργαλεία προς το παρόν είναι τα SSVs που έχουν ορίσει κάποιες χώρες [46].

Τα SSVs είναι επιστημονικά τεκμηριωμένα, γενικά πρότυπα ποιότητας που υιοθετούνται για τη ρύθμιση της διαχείρισης ρυπασμένων εδαφών. Συνήθως εκφράζονται ως οριακές συγκεντρώσεις (mg/kg εδάφους – ξηρό βάρος) ρύπων στο έδαφος, πάνω από τις οποίες συνιστώνται ή επιβάλλονται συγκεκριμένες ενέργειες [39, 42, 44].

Η ανασκόπηση της σχετικής νομοθεσίας δείχνει ότι όχι μόνο η ορολογία, αλλά και οι αριθμητικές τιμές των SSVs διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών και διεθνώς, με αποκλίσεις που συχνά φτάνουν τις 2 έως 3 τάξεις μεγέθους. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κυρίως στη διαφορετική επιστημονική βάση και μεθοδολογία (μοντέλα, αλγόριθμοι, τοξικολογικά δεδομένα) που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό τους, στην αντίληψη του κινδύνου από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, στη διαφορετική χρήση γης και κατά συνέπεια στον βαθμό έκθεσης, στους στόχους προστασίας (ανθρώπινη υγεία ή οικοσύστημα), καθώς και σε πολιτικούς παράγοντες που σχετίζονται με την ιεράρχηση περιβαλλοντικών και οικονομικών αξιών [44, 47].

Επιπλέον, ο αριθμός των ουσιών για τις οποίες παρέχονται SSVs ποικίλει σημαντικά στην Ευρώπη και διεθνώς, από λιγότερες από 20 έως και 234, με περίπου 60 ουσίες να θεωρούνται οι πιο συχνές. Στην τελευταία κατηγορία περιλαμβάνονται βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Zn), αρωματικοί υδρογονάνθρακες (π.χ. βενζόλιο, αιθυλοβενζόλιο, τολουόλιο), πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (π.χ. ναφθαλίνιο, ανθρακένιο, βενζο(α)ανθρακένιο, βενζο(ghi)περυλένιο, βενζο(α)πυρένιο), χλωριωμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες (διχλωρομεθάνιο, τριχλωροαιθυλένιο, τετραχλωράνθρακας), χλωριωμένοι αρωματικοί υδρογονάνθρακες (χλωροβενζόλιο, εξαχλωροβενζόλιο), φυτοφάρμακα (ατραζίνη, DDT), διοξίνες και πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) [44].

Πέρα από τις διαφορές στον καθορισμό τους, τα SSVs εφαρμόζονται διαφορετικά σε κάθε νομοθετικό πλαίσιο, και οι συνέπειες της υπέρβασής τους κυμαίνονται από την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση έως την ανάγκη για διορθωτικές ενέργειες /αποκατάσταση [44, 47].

### 1.3 Χρονικό της πυρκαγιάς και σκοπός της μελέτης

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε στις 22.07.2025 σε περίφρακτο χώρο της εταιρείας διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών «Ανακύκλωση Αιγαίου», στην περιοχή της Μόριας, περίπου πέντε χιλιόμετρα βόρεια της πόλης της Μυτιλήνης (**Εικόνα 1**). Η πυρκαγιά ξεκίνησε γύρω στις 2:15 το πρωί σε χώρους που αποθηκεύονταν πλαστικό και χαρτί. Μεταξύ 6:00 και 7:00 το πρωί στάλθηκε μήνυμα από το 112 στους κατοίκους των παρακείμενων χωριών Μόριας και Παναγιούδας να παραμείνουν στα σπίτια τους με κλειστά παράθυρα καθώς υπήρχε καπνός και έντονη οσμή εντός των οικισμών ενώ γύρω στις 9:00 η πυρκαγιά είχε τεθεί υπό έλεγχο από την Πυροσβεστική Υπηρεσία. Ομάδα επιστημόνων του Τμήματος Περιβάλλοντος επισκέφθηκε τη μονάδα ανακύκλωσης στις 10:30 της ίδιας ημέρας και εντός του επόμενου δώρου τοποθέτησε όργανα μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε παρακείμενη επιχείρηση και στον οικισμό της Μόριας. Επισημαίνεται πως μέχρι εκείνη τη στιγμή τα μόνα εγκατεστημένα όργανα μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης βρίσκονταν στην πόλη της Μυτιλήνης, σε απόσταση μεγαλύτερη των 4 Km από την εστία της πυρκαγιάς (Επάνω Σκάλα, Κέντρο Μυτιλήνης, Χρυσομαλλούσα, κτίριο Ξενία). Τα όργανα έχουν τοποθετηθεί σε αυτά τα σημεία από ερευνητές του Πανεπιστημίου Αιγαίου στα πλαίσια υλοποίησης ερευνητικών προγραμμάτων που στοχεύουν στην αξιολόγηση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης των ελληνικών πόλεων.

Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε στη διερεύνηση της πιθανής υποβάθμισης της ποιότητας του εδάφους σε μια ευρύτερη περιοχή γύρω από την εγκατάσταση, η οποία δέχθηκε τις άμεσες επιπτώσεις του συμβάντος, μέσω του προσδιορισμού των συγκεντρώσεων οργανικών και ανόργανων ενώσεων που συνήθως εκπέμπονται υπό συνθήκες πυρκαγιάς απορριμμάτων. Παράλληλα, αξιολογήθηκαν τα επίπεδα

ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή μέσω χρήσης των μετρήσεων ατμοσφαιρικών σωματιδίων στους υφιστάμενους σταθμούς της πόλης καθώς και μέσω των οργάνων που τοποθετήθηκαν στην περιοχή μετά το συμβάν.



**Εικόνα 1.** (α) & (β). Εικόνες από την πυρκαγιά στην «Ανακύκλωση Αιγαίου» - Πηγή: εφημερίδα το ΒΗΜΑ

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1 Περιγραφή των εγκαταστάσεων της εταιρείας διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών

Οι δραστηριότητες της εταιρείας διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών περιλαμβάνουν εργασίες ανακύκλωσης σε πολλούς τομείς, όπως υλικά συσκευασίας, απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ), οθόνες με λυχνίες καθοδικού σωλήνα (CRT), καλώδια, μεταλλικά απορρίμματα και οχήματα στο τέλος κύκλου ζωής τους. Η εταιρεία δέχεται επίσης το σύνολο του περιεχομένου των μπλε κάδων που είναι εγκατεστημένοι στους οικισμούς της Λέσβου, έχοντας δημιουργήσει από το 2013 κέντρο διαλογής ανακυκλώσιμων υλικών. Στους χώρους της εταιρείας αποθηκεύονται διάφορα και ετερογενή υλικά σε σωρούς, όπως πλαστικά, χαρτί, γυαλί από CRT, οχήματα στο τέλος κύκλου ζωής και μέρη αυτών, καθώς και σωροί σιδηρούχων και μη σιδηρούχων μετάλλων. Η αποθήκευση είναι προσωρινή, καθώς τα υλικά συσκευάζονται και φορτώνονται συνεχώς σε φορτηγά για μεταφορά στους συνεργαζόμενους τελικούς αποδέκτες της εταιρείας. Το σιδηρούχο σκραπ αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό κατά μάζα — πάνω από 50% της συνολικής ποσότητας που διακινεί η εταιρεία — και συνήθως αποθηκεύεται σε εξωτερικό σωρό. Δεν υφίσταται καμία περαιτέρω επεξεργασία στο εργοστάσιο πέρα από φόρτωση, εκφόρτωση και συμπίεση σε δεμάτια. Τα οχήματα στο τέλος ζωής, που αποτελούν μεγάλο μέρος του σιδηρούχου σκραπ, δεν υφίστανται επίσης ειδική κατεργασία ή αποσυναρμολόγηση πέρα από την αφαίρεση ελαστικών, υγρών, καλωδίων, μπαταριών και ηλεκτρονικών. Αντίθετα, τα ΑΗΗΕ υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία, όπως αφαίρεση γυάλινων οθονών από CRT, καθαρισμός και άλεσή τους, άλεση πλακετών κυκλωμάτων και απογύμνωση καλωδίων [48].

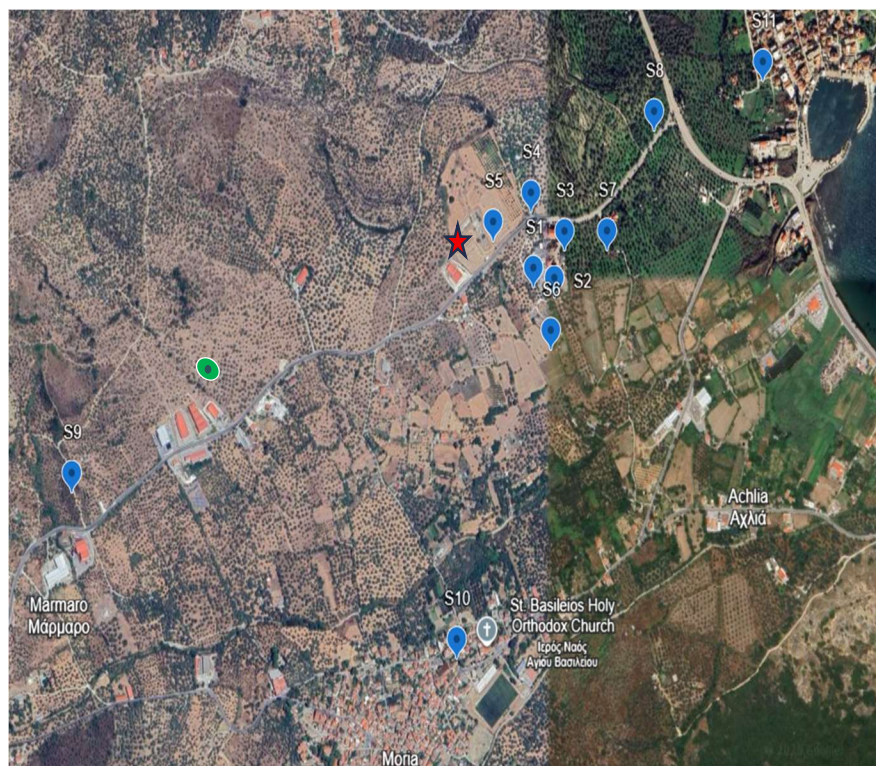
### 2.2 Δειγματοληψία εδάφους

Συνολικά 11 δείγματα επιφανειακού εδάφους (0-10 cm) συλλέγηκαν γύρω από τη μονάδα διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών «Ανακύκλωση Αιγαίου» (**Error! Reference source not found.**). Τα 7 από αυτά κατανέμονται σε αποστάσεις 30 έως 150 m περιμετρικά της μονάδας (δείγματα S1 – S7) ενώ άλλα 4 δείγματα ελήφθησαν σε μεγαλύτερη απόσταση (350 - 1350 m) (δείγματα S8 – S11), δύο εκ των οποίων εντός των παρακείμενων οικισμών της Μόριας (S10) και της Παναγιούδας (S11). Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στις 26.7.2025 (S1 έως S9) και στις 27.7.2025 (S10, S11) από μέλη της ερευνητικής ομάδας του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

### 2.3 Μετρήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης και δειγματοληψία αέρα

Την ημέρα που εκδηλώθηκε η πυρκαγιά, στις 11:30 το πρωί, και για τις επόμενες δύο ημέρες τοποθετήθηκαν από μέλη της ερευνητικής ομάδας του Πανεπιστημίου Αιγαίου δύο όργανα μέτρησης της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών σωματιδίων με μέγεθος μικρότερο των 2,5 εκατομμυριοστών του μέτρου (PM<sub>2.5</sub>), σε επιχείρηση που βρίσκεται στον Περιφερειακό Δρόμο Μόριας (απόσταση 700 μέτρων δυτικά της εστίας) καθώς και στο Κοινοτικό Γραφείο της Μόριας (απόσταση 800 μέτρων νότια της εστίας) ώστε να διερευνηθεί πιθανή ατμοσφαιρική ρύπανση (**Εικόνα 3**). Παράλληλα, εγκαταστάθηκε στην επιχείρηση που βρίσκεται στον Περιφερειακό Δρόμο Μόριας ένα όργανο συλλογής των ατμοσφαιρικών σωματιδίων πάνω σε φίλτρα, ώστε να μελετηθεί η σύσταση των σωματιδίων σε οργανικούς ρύπους (Εικόνες 2, 3). Καθώς, κατά την έναρξη της πυρκαγιάς και έως τις 10:00 το πρωί της 22ας Ιουλίου, δεν υπήρχαν σε κοντινή περιοχή εγκατεστημένα όργανα μέτρησης ατμοσφαιρικών σωματιδίων, ανακτήθηκαν για τις συγκεκριμένες ώρες οι μετρήσεις σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> των οργάνων που είναι μόνιμα εγκατεστημένα

στην Επάνω Σκάλα, στο κέντρο της Μυτιλήνης και στο Τμήμα Περιβάλλοντος (κτίριο Ξενία). Η απόσταση μεταξύ της εταιρείας που εκδηλώθηκε η πυρκαγιά και των αναφερθέντων σταθμών είναι αντίστοιχα 4, 5 και 8 km.



**Εικόνα 2.** Σημεία δειγματοληψίας. Το κόκκινο αστέρι δηλώνει τη θέση του εργοστασίου ανακύκλωσης και ο πράσινος κύκλος το σημείο δειγματοληψίας των ατμοσφαιρικών σωματιδίων.



**Εικόνα 3.** Εγκατάσταση οργάνων συλλογής και μέτρησης της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών σωματιδίων.

## 2.4 Χημικές αναλύσεις οργανικών ενώσεων και βαρέων μετάλλων

Η αρχική προκατεργασία των δειγμάτων εδάφους πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την αυστραλιανή οδηγία «Schedule B3 Guideline: on Laboratory Analysis of Potentially Contaminated Soils» [42] και περιλάμβανε αερόξηρανση, ζύγιση, θραύση, κοσκίνισμα, ανάμειξη και λήψη υποδειγμάτων που οδηγήθηκαν για την ανάλυση οργανικών ρύπων και βαρέων μετάλλων. Η ανάλυση των προκατεργασμένων δειγμάτων έγινε στο Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας, Τμήμα Χημείας, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο ως εξής:

A. Για τον προσδιορισμό των οργανικών ρύπων (PAHs και PCBs) ζυγίστηκαν 5 g προκατεργασμένου δείγματος εδάφους και έγινε προσθήκη εσωτερικών προτύπων. Πραγματοποιήθηκε εκχύλιση των ρύπων με ακετονιτρίλιο έπειτα από προ-ενυδάτωση του δείγματος με υπερκάρθαρο νερό τύπου Milli-Q (18.2 MΩ·cm). Το δείγμα αναδεύτηκε για 5 λεπτά και τοποθετήθηκε σε λουτρό υπερήχων για 20 λεπτά ώστε να υποβοηθηθεί η εκχύλιση. Ακολούθησε φυγοκέντρηση και προσθήκη αλάτων ( $MgSO_4$  και  $NaCl$ ) για τον διαχωρισμό των φάσεων, ενώ το υπερκείμενο εκχύλισμα υποβλήθηκε σε εξατμίση υπό ροή αζώτου μέχρι ξηρού και έγινε ανασύσταση σε μίγμα 20% ακετόνης σε εξάνιο. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε στάδιο καθαρισμού με καθαρισμό στερεάς φάσης (SPE) χρησιμοποιώντας στήλες Florisil (1 g). Το τελικό εκχύλισμα εξατμίσθηκε μέχρι ξηρού υπό ροή αζώτου. Η ανασύσταση του δείγματος πραγματοποιήθηκε με εξάνιο, ενώ το προς ανάλυση εκχύλισμα διηθήθηκε μέσω φίλτρου με μεμβράνη RC. Τα δείγματα αναλύθηκαν με αεριοχρωματογραφία συνδεδεμένη με φασματομετρία μάζας υψηλής διακριτικής ικανότητας (GC-APCI-QToF MS).

B. Για τον προσδιορισμό των βαρέων μετάλλων 0,25 g προκατεργασμένου δείγματος εδάφους υπέστησαν χώνευση με 8 mL Βασιλικού Ύδατος ( $HNO_3/HCl$  1:3 v/v) σε φούρνο μικροκυμάτων της Εταιρεία Milestone. Τα χωνεμένα δείγματα αραιώθηκαν με υπερκάρθαρο νερό στα 50 mL και ακολούθησε περαιτέρω αραιώση 2 φορές και ανάλυση με φασματόμετρο μάζων με επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα Αργού, Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). Εφαρμόστηκε σύστημα εισαγωγής δείγματος High Matrix Introduction (HMI) με παράγοντα αραιώσης 4, προκειμένου να μειωθούν οι επιδράσεις του μητρικού υλικού. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση κυψελίδας συγκρούσεων/αντιδράσεων με ήλιο και υδρογόνο και με παροχή αερίου 5 mL/min αντίστοιχα.

Τα δείγματα φίλτρου συλλογής ατμοσφαιρικών σωματιδίων αναλύθηκαν επίσης στο Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας, Τμήμα Χημείας, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο. Η μέθοδος ανάλυσης βασίστηκε στην τεχνική της υποβοηθούμενης με υπερήχους εκχύλισης (Ultrasonic Assisted Extraction, UAE) σε συνδυασμό με καθαρισμό στερεάς φάσης (SPE) και αποτελεί προσαρμογή των μεθόδων USEPA 3550C, 3620C και 3535A. Αρχικά τα δείγματα φίλτρου κόπηκαν, ζυγίστηκαν και εμβολιάστηκαν με μίγμα εσωτερικών προτύπων. Η εκχύλιση πραγματοποιήθηκε με μίγμα διχλωρομεθανίου/ακετόνης (1:1 v/v), με την χρήση υπερήχων για 30 λεπτά σε θερμοκρασία 25 °C, και ακολούθησε φυγοκέντρηση και επαναληπτική εκχύλιση για μέγιστη απόδοση. Το συνολικό εκχύλισμα συμπυκνώθηκε με περιστροφικό εξατμιστή (4-5 ml), παρουσία ισοοκτανίου ως keeper. Ακολούθησε καθαρισμός του με την μέθοδο SPE με στήλες Florisil (1g). Το τελικό εκχύλισμα εξατμίσθηκε μέχρι ξηρού υπό ροή αζώτου και ακολούθησε ανασύσταση με 200 μL εξανίου, ενώ το προς ανάλυση εκχύλισμα διηθήθηκε μέσω φίλτρου μεμβράνης RC. Τα δείγματα αναλύθηκαν με αεριοχρωματογραφία συνδεδεμένη με φασματομετρία μάζας υψηλής διακριτικής ικανότητας (GC-APCI-QToF MS).

### 3. Αποτελέσματα και συζήτηση

#### 3.1 Οργανικοί ρύποι στο χώμα

Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, PAHs

Οι συγκεντρώσεις των PAHs στα δείγματα εδάφους στην περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**. Από τις 16 ενώσεις που προσδιορίστηκαν και οι οποίες ανήκουν στον κατάλογο με τις ουσίες προτεραιότητας της United States Environmental Protection Agency (USEPA), 3 (Benzo(g,h,i)perylene, Benzo(k)fluoranthene, Dibenzo(ah)anthracene) δεν ανιχνεύθηκαν σε κανένα από τα δείγματα ενώ άλλες 2 (Acenaphthene, Naphthalene) ανιχνεύθηκαν σε μόνο 2 δείγματα.

**Πίνακας 1.** Συγκεντρώσεις πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs) σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης, σε μg/kg ξηρού εδάφους

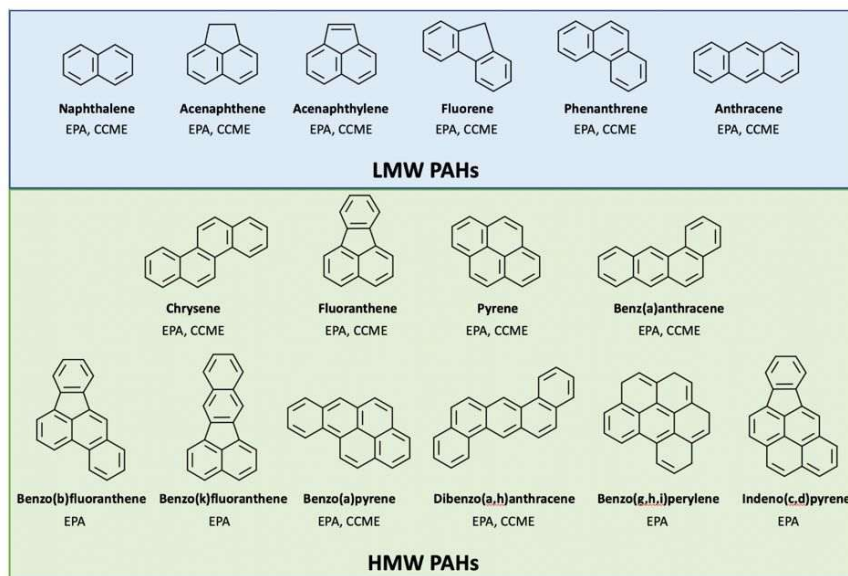
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Anthracene	10.60	9.93	1.70	7.93	2.22	0.243	4.82	2.07	0.940	8.35	0.765
Benzo(b)fluoranthene	4.47	3.18	1.39	1.25	0.454	0.433	0.244	1.04	1.23	1.83	0.840
Benzo(a)pyrene	13.6	18.6	7.43	4.90	3.72	2.89	2.53	7.59	6.69	13.6	7.67
Benzo(g,h,i)perylene	<0.28*	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28	<0.28
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	10.68	14.3	7.34	14.3	1.63	3.43	1.39	4.27	5.08	20.5	7.89
Fluoranthene	2.91	1.85	1.43	297	4.72	2.55	0.801	3.30	14.5	153	7.48
Benzo(k)fluoranthene	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13
Acenaphthene	<0.06	<0.06	<0.06	1.96	<0.06	0.74	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06
Benz(a)anthracene	9.63	13.8	5.80	18.1	1.82	1.04	1.39	5.20	4.11	26.3	2.84
Chrysene	17.65	15.94	13.32	113	61.7	41.7	47.0	15.9	15.2	69.8	80.0
Fluorene	0.493	2.40	1.77	2.86	1.51	0.962	1.84	1.65	1.89	1.73	1.51
Phenanthrene	14.9	18.2	20.6	167	44.4	22.3	35.3	23.4	16.9	43.9	13.4
Pyrene	34.8	21.0	26.0	226	131	15.9	27.7	39.1	45.2	102.1	22.3
Dibenzo(a,h)anthracene	<0.26	<0.26	<0.26	<0.26	<0.26	<0.26	<0.26	<0.26	<0.26	<0.26	<0.26
Naphthalene	<0.12	<0.12	0.98	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	1.64	<0.12
Acenaphthylene	1.75	2.94	1.50	3.05	1.05	0.319	0.596	<0.1	0.298	3.39	0.295
ΣPAHs**	122	123	90	858	254	92.8	124	104	113	446	145

\* η έκφραση «<τιμή» σημαίνει κάτω του αντίστοιχου ορίου ποσοτικοποίησης, καθώς η συγκέντρωση ήταν μη ανιχνεύσιμη

\*\* Άθροισμα των συγκεντρώσεων όλων των PAHs. Για τις μη ανιχνεύσιμες ενώσεις χρησιμοποιήθηκε το μισό του ορίου ποσοτικοποίησης

Οι PAHs είναι οργανικές ενώσεις που αποτελούνται από ενωμένους αρωματικούς δακτυλίους χωρίς άτομα άλλων στοιχείων πλην του άνθρακα και του υδρογόνου (ετεροάτομα) (**Εικόνα 4**). Υπάρχουν περίπου 660 γνωστές μητρικές ενώσεις PAHs, από το απλό βενζόλιο έως δομές με εννέα δακτυλίους. Είναι ενώσεις υψηλού μοριακού βάρους και χαμηλής πτητικότητας, υδρόφοβες και λιπόφιλες, ενώ η υδροφιλία και η κινητικότητά τους μειώνονται όσο αυξάνεται ο αριθμός των δακτυλίων. Λόγω της υδροφοβικής τους φύσης,

οι PAHs προσροφώνται γρήγορα στην οργανική ύλη του εδάφους, των ιζημάτων ή της αιθάλης. Ανάλογα με την πτητικότητα τους, μπορούν να μεταφέρονται μέσω ατμοσφαιρικής απόθεσης σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή εκπομπής, αν και ο κύριος περιβαλλοντικός τους αποδέκτης είναι το οργανικό κλάσμα του εδάφους και των ιζημάτων [49].



*Εικόνα 4. Χημική δομή των 16 PAHs που προσδιορίσθηκαν*

Οι PAHs είναι προϊόντα θερμικής αποσύνθεσης, που σχηματίζονται κατά την ατελή καύση οργανικών υλικών και τη γεωχημική δημιουργία των ορυκτών καυσίμων [50]. Η παρουσία τους στο περιβάλλον μπορεί να είναι ανθρωπογενούς ή φυσικής προέλευσης [51]. Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν διαρροές πετρελαίου, δασικές πυρκαγιές, ηφαιστειακή δραστηριότητα και διάβρωση αρχαϊκών ιζημάτων [52]. Ορισμένοι PAHs, όπως το perylene σχηματίζονται φυσικά μέσω χημικών ή βιολογικών μετασχηματισμών της οργανικής ύλης [53]. Οι ανθρωπογενείς PAHs προκύπτουν από θερμική αλλοίωση ή ατελή καύση οργανικής ύλης, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων, η καύση απορριμμάτων, οι βιομηχανικές διεργασίες και τα καυσαέρια οχημάτων, τα οποία αποτελούν σημαντική πηγή PAHs σε πολλές αστικές περιοχές [54, 50]. Σήμερα, οι κύριες ανθρωπογενείς πηγές υπερβαίνουν κατά πολύ τις φυσικές [51, 52].

Οι PAHs ταξινομούνται ανάλογα με τη θερμοκρασία σχηματισμού ή την προέλευσή τους σε [55]:

- i) **πυρογενείς**, που παράγονται από καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας σε υψηλή θερμοκρασία με περιορισμένη παρουσία οξυγόνου (π.χ. ατελής καύση, πυρόλυση, cracking, εξ ου και ονομάζονται επίσης και **πυρολυτικοί**) [49]. Απελευθερώνονται μέσω των καυσαερίων και στερεών υπολειμμάτων της καύσης. Οι πιο κοινοί πυρογενείς PAHs είναι τα fluoranthene, pyrene και, σε μικρότερο βαθμό, phenanthrene και anthracene [56, 57, 58], ενώσεις δηλαδή με 3 έως 4 δακτυλίους ενώ και τα chrysene (4 δακτύλιοι) και benzo[k]fluoranthene (5 δακτύλιοι) έχει επίσης προταθεί ως δείκτης καύσης άνθρακα [58]. Τα οχήματα αποτελούν σημαντική πηγή δυνητικά καρκινογόνων PAHs υψηλού μοριακού βάρους (HMW PAHs), όπως τα benzo[a]pyrene, benz[a]anthracene, και benzo[b]fluoranthene (4 έως 5 δακτύλιοι), ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα [59]. Άκαυστο καύσιμο, λιπαντικά έλαια και πυρολυτική σύνθεση αποτελούν πιθανές πηγές PAHs από τις εκπομπές των οχημάτων [60]. Οι ενώσεις Indeno[1,2,3-cd]pyrene (IP) και benzo[ghi]perylene (6 δακτύλιοι) είναι χαρακτηριστικά προϊόντα

των εκπομπών οχημάτων, αν και αυτοί οι HMW PAHs δεν μεταφέρονται μακριά από την πηγή τους [61]. Η καύση του ξύλου οδηγεί κυρίως σε εκπομπές phenanthrene και PAHs 4 δακτυλίων (fluoranthene, pyrene, benz(a)anthracene και chrysene), ενώ η συμβολή των PAHs 5 και 6 δακτυλίων είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό. Αντίθετα, οι τελευταίες ενώσεις αποτελούν πολύ υψηλότερα ποσοστά (μέχρι 45%) της συνολικής εκπομπής PAHs κατά την καύση πολυμερών πλαστικών αποβλήτων [62].

- ii) **πετρογενείς**, που συνδέονται με πετρελαϊκές πηγές, και περιλαμβάνουν κυρίως ενώσεις με 2 έως 3 δακτυλίου. Μόνο μερικά βαριά κλάσματα του πετρελαίου περιέχουν σημαντικές ποσότητες PAHs 4 δακτυλίων ενώ ενώσεις με 5 ή 6 δακτυλίου δεν ανιχνεύονται στο αργό πετρέλαιο και στα επεξεργασμένα προϊόντα του.
- iii) **φυσικούς**, δηλ. βιογενούς ή διαγενετικής προέλευσης. Οι **διαγενετικοί** PAHs παράγονται κατά τη διάρκεια της αργής μετατροπής οργανικών υλικών στα ιζήματα λιμνών, ενώ οι **βιογενείς** παράγονται από φυτά, άλγη/φυτόπλαγκτον και μικροοργανισμούς. Το perylene είναι ένας τέτοιος PAH [49].

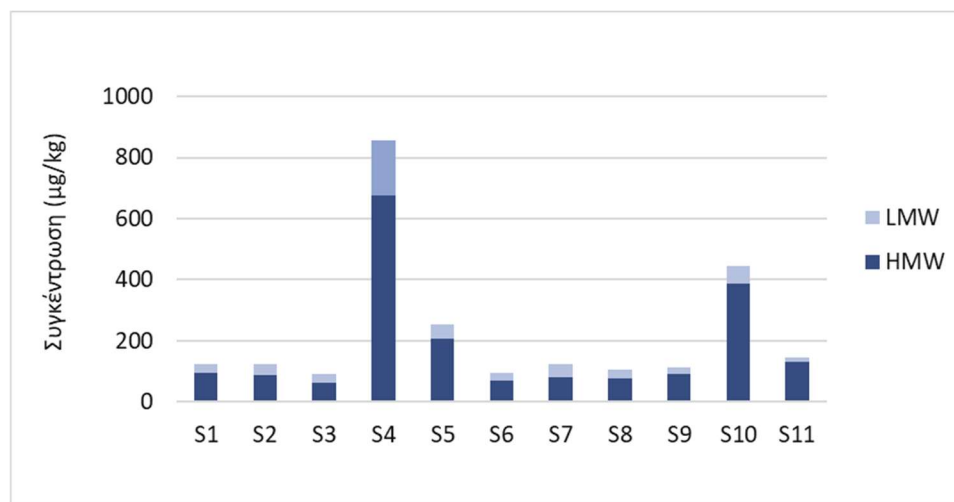
Στα δείγματα εδάφους που αναλύθηκαν, το pyrene είχε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, ακολουθούμενο από τα phenanthrene και chrysene, με εξαίρεση τα δείγματα S4 και S10. Στα δείγματα αυτά το fluoranthene είχε την υψηλότερη συγκέντρωση από όλους τους PAHs που προσδιορίστηκαν, συγκέντρωση υψηλότερη κατά μία με δύο τάξεις μεγέθους σε σχέση με όλα τα άλλα δείγματα. Στα δείγματα S4 και S10 σημειώθηκαν επίσης και οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του αθροίσματος των PAHs (ΣPAHs).

Μια αρχική εκτίμηση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος με PAHs από την πυρκαγιά στη μονάδα διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών στη Λέσβο μπορεί να προκύψει από τη σύγκριση του ΣPAHs που καταγράφηκαν, με αντίστοιχες τιμές σε περιοχές με ποικίλες χρήσεις γης που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία [63, 64]. Φαίνεται, λοιπόν, ότι τα επίπεδα του ΣPAHs που μετρήθηκαν στην περιοχή μελέτης, τόσο κατά μέσο όρο όσο και ως προς το εύρος, αντιστοιχούν σε τιμές από μη βιομηχανικές περιοχές στην Ευρώπη και την Ασία, και μάλιστα στο χαμηλό τμήμα του εύρους τους, ενώ είναι κατά πολύ χαμηλότερες από αυτές που μετρήθηκαν σε ρυπασμένο αστικό περιβάλλον στην Κίνα. Ως εκ τούτου, σε σύγκριση με τα επίπεδα σε περιοχές ανά τον κόσμο, το σύνολο (άθροισμα) των συγκεντρώσεων των PAHs στην περιοχή μελέτης δεν υποδηλώνει σοβαρή περιβαλλοντική επιβάρυνση (**Πίνακας 2**).

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, η καύση διαφόρων τύπων υλικών γενικά οδηγεί σε σχηματισμό PAHs υψηλού μοριακού βάρους (HMW PAHs) που περιλαμβάνουν ενώσεις με 4 έως 6 δακτυλίου. Η αναλογία του αθροίσματος των ποσοστών των HMW PAHs σε σχέση με το άθροισμα των ποσοστών των PAHs χαμηλού μοριακού βάρους, που περιλαμβάνουν ενώσεις με 2 έως 3 δακτυλίου (LMW PAHs) έχει χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο αναγνώρισης της παρουσίας πυρογενών PAHs στο περιβάλλον [65]. Σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν οι HMW PAHs κυριαρχούν έναντι των LMW PAHs, σε ποσοστά από 66% έως 89%, φανερώνοντας την επίδραση των εκπομπών της καύσης οργανικών υλικών σε όλη την περιοχή μελέτης (**Εικόνα 5**). Είναι γνωστό ότι τα εδάφη χαρακτηρίζονται από υψηλότερα ποσοστά HMW PAHs συγκριτικά με τα αρχικά προφίλ των ενώσεων στις πηγές των εκπομπών τους, καθώς οι LMW PAHs είναι πιο πτητικοί και τείνουν να βρίσκονται στη αέρια φάση, όπου υφίστανται φωτοχημική διάσπαση, ενώ οι HMW PAHs συνδέονται κυρίως με ατμοσφαιρικά σωματίδια που καταλήγουν στα επιφανειακά εδάφη μέσω ξηρής και υγρής απόθεσης [64]. Παρόλα αυτά, η σημαντική υπεροχή των HMW PAHs υποστηρίζει την προέλευση τους από θερμικές διεργασίες.

**Πίνακας 2.** ΣΡΑΗs (μg/kg) σε εδάφη από την περιοχή μελέτης και από μη βιομηχανικές και αστικές περιοχές σε διάφορες χώρες (συνδυασμός δεδομένων από [63, 64])

Χώρα	Περιοχή	Αριθμός PAHs	Εύρος	Διάμεση τιμή	Μέσος όρος
Ελλάδα	Λέσβος, περιοχή μελέτης	16	90-858	123	225
France	Seine basin	14	450-2690		
Germany	Bavaria			321	
Germany	Bavaria	15	46-154		
Norway	Περιοχή υποβάθρου	15	9-11 000	158	
The UK	Περιοχή υποβάθρου	15	42-11 200	641	
The UK	Wales (τυπική)	13	108-6740	253	720
Switzerland	Αρόσιμη γη	16	60-145	66	
Czech Republic	Αρόσιμη γη	16	139-2436		847
Poland	Γεωργική έκταση	16	18-2450		264
Poland	Γεωργική έκταση	16	-		423
Poland	Γεωργική έκταση	16	73-1800		252
Poland	Αρόσιμη γη (1995)	13	75-11 391	294	520
Poland	Αρόσιμη γη (2000)	13	54-6680	340	491
Poland	Lublin area	16	105-290		
Poland	Pulawy district	13	81-645	180	216
India	Delhi, Γεωργική έκταση	16	-		830
Korea	Γεωργική έκταση	16	23-2830		236
China	Shantou – γεωργική περιοχή	16	22-1256		318
China	Nanjing, Λαχανόκηπος	15	22-53		178
China	Guangzhou, Λαχανόκηπος	16	160-3700		1503
China	Yangtze Delta, Γεωργική Χορτολιβαδική έκταση	15	8.6-3881		397
China	Shunde, Γεωργική έκταση	16	34-350		144
China	Beijing, Αστική περιοχή	16	219-27825		3917
China	Shanghai, Αστική περιοχή	16	442-17900		3290



**Εικόνα 5.** Συνολική συγκέντρωση HMW και LMW PAHs σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης (σε μg/kg ξηρού εδάφους)

Καθώς οι διαφορετικές πηγές των PAHs απελευθερώνουν διαφορετικού τύπου ενώσεις στο περιβάλλον, μια σειρά από λόγους που συγκρίνουν τις συγκεντρώσεις συγκεκριμένων ενώσεων έχουν προταθεί ως διαγνωστικά κριτήρια για την αναγνώριση της προέλευσης των PAHs [49, 65, 66, 67]. Οι διαγνωστικοί αυτοί λόγοι έχουν καθοριστεί για τη διάκριση μεταξύ πυρογενών και πετρογενών PAHs, βασισμένοι στους PAHs που προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας, καθώς και σε εκείνους που είναι συστατικά των πετρελαϊκών προϊόντων, και οι οριακές τιμές για τη διάκριση έχουν προκύψει από την αναλογία των ενώσεων στην αντίστοιχη πηγή των εκπομπών [64]. Δεδομένου ότι οι PAHs που παράγονται από την καύση πλαστικών δεν έχουν συμπεριληφθεί στον αρχικό καθορισμό των οριακών τιμών αυτών των λόγων, απαιτήθηκε μια προσαρμογή αυτών των ορίων ώστε να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των PAHs που παράγονται από την καύση πλαστικών [67]. Όπου είναι διαθέσιμες, οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν και στη μελέτη αυτή και οι λόγοι που υπολογίσθηκαν είναι οι πιο συχνά εφαρμοζόμενοι για τα εδάφη [68]. Για τον υπολογισμό αθροισμάτων χρησιμοποιήθηκε το μισό του ορίου ποσοτικοποίησης για τις ενώσεις που ήταν μη ανιχνεύσιμες (**Πίνακας 3**). Η ερμηνεία των λόγων στα εδάφη πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι στο περιβάλλον αυτό οι PAHs υφίστανται χημικές μεταβολές με διάφορες διαδικασίες (φωτο-αποδόμηση, μικροβιακή αποδόμηση, εκρόφηση), και κατά συνέπεια προκύπτουν παραποιημένες τιμές [68]. Επίσης, μεταβολές στις συγκεντρώσεις μπορεί να συμβαίνουν και κατά την ατμοσφαιρική μεταφορά των ενώσεων αυτών με αποτέλεσμα αποκλίσεις από τις οριακές τιμές που καθορίζονται με βάση τις πηγές [64].

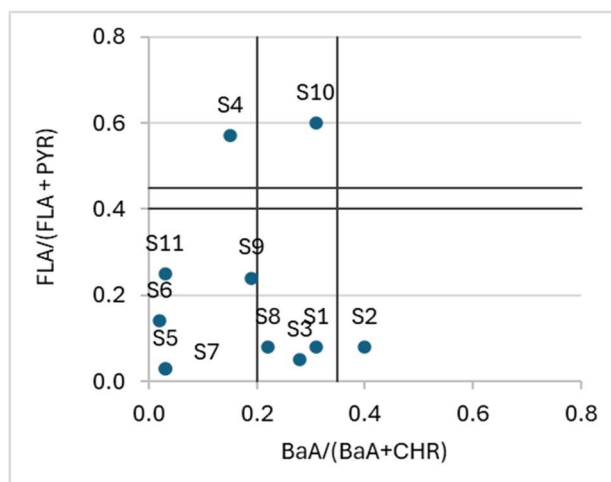
**Πίνακας 3.** Διαγνωστικοί λόγοι για την αναγνώριση της προέλευσης των PAHs σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης (AN: Anthracene, PHE: Phenanthrene, BaA: Benz(a)anthracene, CHR: Chrysene, FLA: Fluoranthene, PYR: Pyrene)

		AN/(AN+PHE)*	BaA/(BaA+CHR)*	FLA/(FLA + PYR)*
Οριακές τιμές	Πυρογενείς	>0.08	>0.35	>0.45
	Πετρογενείς	<0.08	<0.2	<0.4
	S1	0.42	0.31	0.08
	S2	0.35	0.40	0.08
	S3	0.08	0.28	0.05
	S4	0.05	0.15	0.57
	S5	0.05	0.03	0.03
	S6	0.01	0.02	0.14
	S7	0.12	0.03	0.03
	S8	0.08	0.22	0.08
	S9	0.05	0.19	0.24
	S10	0.16	0.31	0.60
	S11	0.05	0.03	0.25

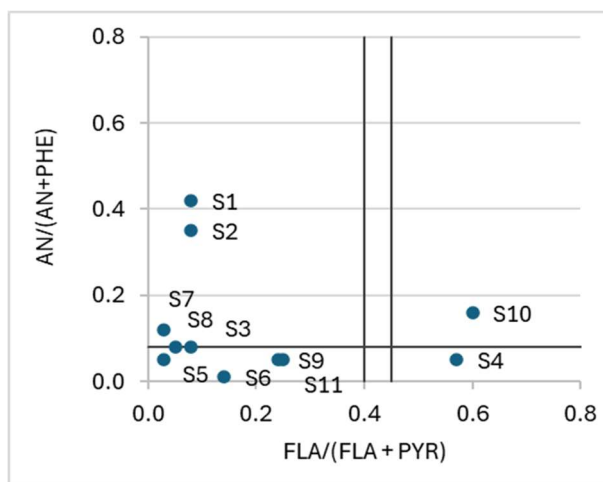
\* AN: Anthracene, PHE: Phenanthrene, BaA: Benz(a)anthracene, CHR: Chrysene, FLA: Fluoranthene, PYR: Pyrene

Παρά την επικράτηση των HMW PAHs σε όλη την περιοχή μελέτης, η εφαρμογή των διαγνωστικών λόγων αναγνωρίζει τη συνεισφορά και των πετρογενών PAHs στη διαμόρφωση των συνολικών συγκεντρώσεων. Συχνά η εφαρμογή των λόγων οδηγεί σε αντικρουόμενα ή ασαφή συμπεράσματα, λόγω των μη αποκλειστικών πηγών των διαφόρων ενώσεων. Για το λόγο αυτό οι τιμές τους συχνά συνεκτιμώνται ανά δύο [69, 70] (**Εικόνα 6**). Στην **Εικόνα 6** φαίνεται σαφώς η μικτή προέλευση των PAHs στα εδάφη γύρω από τη μονάδα ανακύκλωσης, γεγονός που πιθανόν αποτυπώνει την μακροχρόνια απόθεση πετρογενών PAHs που προέρχονται από την κυκλοφορία των οχημάτων, επί των οποίων προστέθηκαν πυρογενείς ενώσεις

από την πρόσφατη πυρκαγιά. Ο πετρογενής χαρακτήρας είναι πιο έκδηλος στα σημεία S5, S6, S7, S9 και S11 που βρίσκονται σε μικρότερη (S5, S6, S7) ή μεγαλύτερη (S9, S11) απόσταση περιμετρικά της μονάδας (**Error! Reference source not found.**). Αντίθετα, οι εκπομπές της καύσης φαίνεται να έχουν επηρεάσει περισσότερο τα δείγματα S1, S2, S4 και S10, με διαφορετικό όμως τρόπο. Τα δείγματα S1, S2 στη νότια περιφέρεια της μονάδας φέρουν υψηλές συγκεντρώσεις anthracene και των HMW PAHs benzo(b)fluoranthene, benzo(a)pyrene και indeno(1,2,3-cd) pyrene (ενώσεις 6 δακτυλίων), ενώ το δείγμα S4, σε κοντινή απόσταση στα βόρεια της μονάδας είναι ιδιαίτερα επιβαρυσμένο με phenanthrene, fluoranthene, chrysene και pyrene (ενώσεις ενδιάμεσου μεγέθους, 3-4 δακτυλίων). Στο σημείο αυτό καταγράφηκε και η υψηλότερη συνολική συγκέντρωση PAHs (ΣPAHs). Τέλος το δείγμα S10, που ελήφθη μέσα στον παρακείμενο οικισμό της Μόριας, εκτός από τις υψηλές συγκεντρώσεις στους ίδιους PAHs που εντοπίζονται στο δείγμα S4, φέρει και την υψηλότερη συγκέντρωση naphthalene, του μικρότερου υδρογονάνθρακα της σειράς των PAHs (2 δακτύλιοι) ενδεικτική πετρογενούς ρύπανσης (π.χ. διαρροές καυσίμων), που δεν αποκλείεται μέσα σε ένα οικιστικό περιβάλλον.



(α)



(β)

**Εικόνα 6.** Διάγραμμα διασταυρούμενης απεικόνισης (cross plot) των τιμών του λόγου  $FLA/(FLA + PYR)$  σε σχέση με τις τιμές του λόγου  $B[A]A/(B[A]A + CHR)$  (α), και του λόγου  $AN/(AN + PHE)$  σε σχέση με τις τιμές του λόγου  $FLA/(FLA + PYR)$  (β). Οι συνεχείς γραμμές δείχνουν τις οριακές τιμές των λόγων (βλ. **Πίνακας 3**).

Σε ότι αφορά στο δείγμα των αιωρούμενων ατμοσφαιρικών σωματιδίων που συλλέχθηκε, οι συγκεντρώσεις των PAHs που ανιχνεύθηκαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4**. Από τις 16 ενώσεις που προσδιορίστηκαν, μόνο 6 ανιχνεύθηκαν στα αιωρούμενα σωματίδια, από τους οποίους τις υψηλότερες συγκεντρώσεις είχαν οι naphthalene, acenaphthylene, και fluorene, ενώσεις δηλαδή χαμηλού μοριακού βάρους, με 2-3 δακτυλίους.

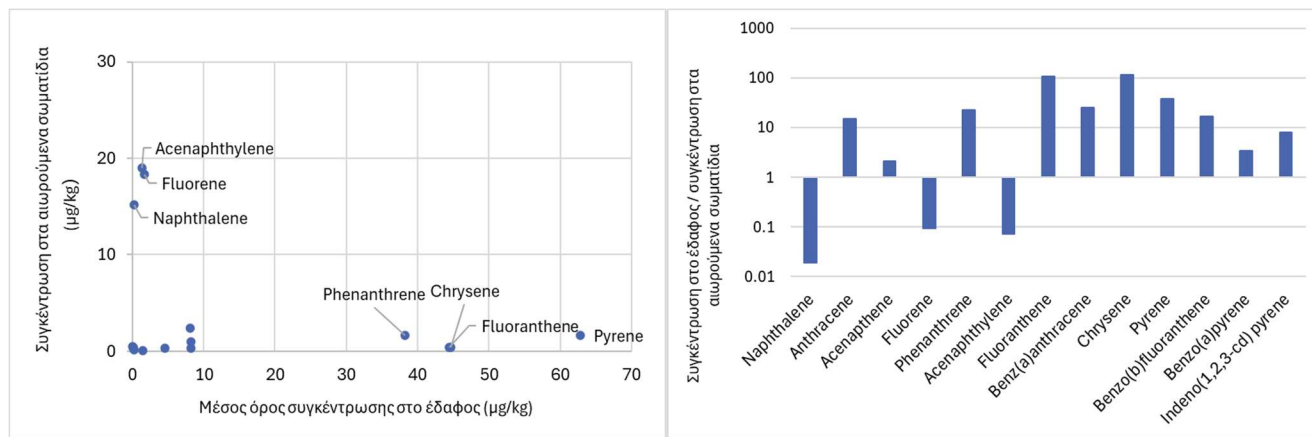
Οι PAHs υπάρχουν στην ατμόσφαιρα τόσο στη φάση των ατμών όσο και στη σωματιδιακή φάση. Γενικά, οι PAHs με χαμηλό μοριακό βάρος τείνουν να συγκεντρώνονται περισσότερο στη φάση των ατμών, ενώ εκείνοι με υψηλότερο μοριακό βάρος συνδέονται συχνά με τα σωματίδια [71]. Παρόλα αυτά, υψηλές συγκεντρώσεις naphthalene, fluorene και phenanthrene βρέθηκαν να υπερτερούν έναντι άλλων PAHs σε δείγματα στάχτης και οικιακής σκόνης μετά από μεγάλη δασική φωτιά στον Καναδά [72] υποδηλώνοντας ότι παρά το μικρό τους μέγεθος εμπλουτίζουν τα σωματιδιακά παράγωγα της καύσης. Επίσης phenanthrene,

και pyrene ήταν, μεταξύ άλλων, κυρίαρχοι PAHs σε ατμοσφαιρικά σωματίδια κατά τη διάρκεια της ελεγχόμενης πυρκαγιάς σε χωματερή, και το phenanthrene ήταν επίσης ο πιο άφθονος PAH σε πραγματική πυρκαγιά σε χωματερή στη Φινλανδία, Το phenanthrene και το naphthalene αναγνωρίστηκαν επίσης ως οι πιο άφθονοι PAHs σε πιλοτική δοκιμή πυρκαγιάς σε χωματερή στη Σουηδία [3].

**Πίνακας 4.** Συγκεντρώσεις PAHs στα αιωρούμενα ατμοσφαιρικά σωματίδια της περιοχής μελέτης, σε  $\mu\text{g}/\text{kg}$  ξηρής μάζας

	Αριθμός δακτυλίων	F1
Naphthalene	2	15.16
Anthracene	3	<0.61
Acenaphthene	3	<0.26
Fluorene	3	18.33
Phenanthrene	3	1.66
Acenaphthylene	3	19.00
Fluoranthene	4	<0.82
Benz(a)anthracene	4	<0.64
Chrysene	4	<0.76
Pyrene	4	1.65
Benzo(b)fluoranthene	5	<0.18
Benzo(a)pyrene	5	2.41
Benzo(k)fluoranthene	5	<1.07
Dibenzo(ah)anthracene	5	<0.62
Benzo(g,h,i)perylene	6	<0.77
Indeno(1,2,3-cd) pyrene	6	<2.03

Επομένως, το δακτυλικό αποτύπωμα των ενώσεων στα αιωρούμενα σωματίδια μετά την πυρκαγιά στη Λέσβο είναι σε συμφωνία με τα ευρήματα σε αντίστοιχες περιπτώσεις στο παρελθόν. Παράλληλα υποστηρίζει και τη διαπίστωση της συνεισφοράς και άλλων πηγών και διεργασιών στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων των PAHs στα εδάφη, καθώς η σχετική αφθονία των ενώσεων είναι σαφώς διαφορετική στα δύο περιβαλλοντικά μέσα, με PAHs 2-3 δακτυλίων να κυριαρχούν στην ατμόσφαιρά και 4–6 δακτυλίων στα εδάφη (**Εικόνα 7** **Error! Reference source not found.** (α) & (β)). Ενώ δηλαδή η σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων αποτυπώνει την πρόσφατη εκπομπή PAHs, ως αποτέλεσμα της πυρκαγιάς στη μονάδα διαχείρισης, οι συγκεντρώσεις στα εδάφη έχουν διαμορφωθεί όχι μόνο από την ατμοσφαιρική μεταφορά και απόθεση παραγώγων της καύσης από το πρόσφατο συμβάν, αλλά και από τη συσσώρευση από τις μακροχρόνιες εκπομπές από διάφορες πηγές, όπως και από τις διεργασίες που απομακρύνουν ή μετασχηματίζουν τις ενώσεις κατά την παραμονή τους στο έδαφος [64, 68].

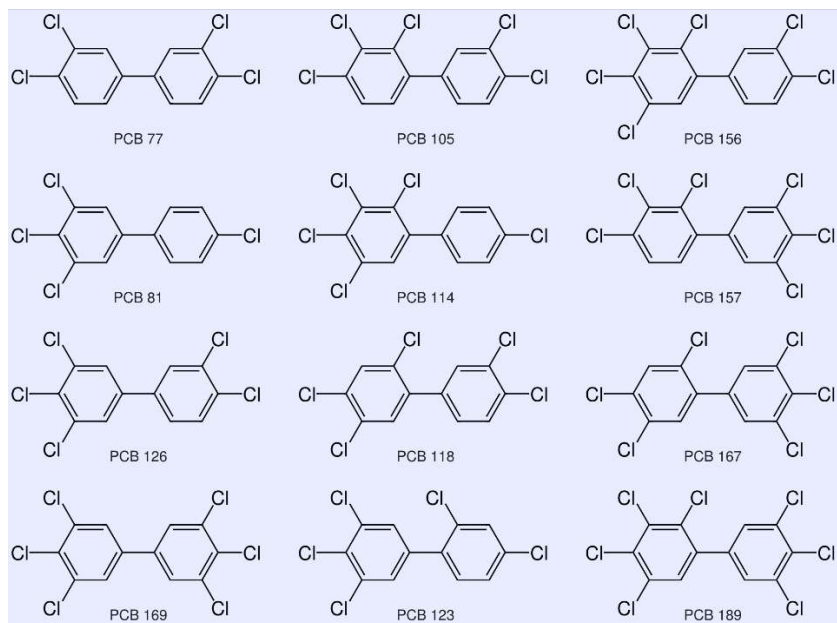


**Εικόνα 7.** (α) Συγκέντρωση PAHs στα ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια και στο έδαφος, σε µg/kg, και (β) λόγος συγκέντρωσης στο έδαφος προς τη συγκέντρωση τα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Για το έδαφος απεικονίζεται ο μέσος όρος των δειγμάτων.

### Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs)

Τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) είναι μια ομάδα συνθετικών οργανικών χημικών ενώσεων που μπορούν να προκαλέσουν διάφορες επιβλαβείς επιδράσεις. Δεν υπάρχουν γνωστές φυσικές πηγές των PCBs στο περιβάλλον. Είναι ελαιώδη υγρά ή στερεά, ορισμένα PCBs είναι πτητικά και μπορούν να υπάρχουν στον αέρα σε μορφή ατμού. Τα PCBs εισέρχονται στο περιβάλλον ως μίγματα που περιέχουν διάφορα χλωριωμένα διφαινύλια, γνωστά ως «συγγενή» (congeners) (**Εικόνα 8**), καθώς και προσμίξεις. Θεωρητικά μπορούν να παραχθούν 209 διακριτά συγγενή, ανάλογα με τον αριθμό και τη θέση των ατόμων χλωρίου στο διφαινυλικό μόριο, που ονομάζονται συνήθως σύμφωνα με ένα σύστημα συντομογραφικής ταξινόμησης κατά το οποίο κάθε συγγενής ένωση λαμβάνει έναν αριθμό από το 1 έως το 209 [73]. Από το σύνολο των συγγενών, επτά PCBs (CB28, 52, 101, 118, 153, 138 και 180) - γνωστά συνολικά ως ομάδα ICES-7 - έχουν προταθεί ως ενώσεις-δείκτες για περιβαλλοντική παρακολούθηση από το European Union Community Bureau of Reference. Τα συγκεκριμένα PCBs επελέγησαν λόγω των σχετικά υψηλών συγκεντρώσεών τους στα τεχνικά μίγματα και του ευρέος φάσματος χλωρίωσής τους [73].

Επειδή τα PCBs δεν καίγονται εύκολα και είναι καλά μονωτικά υλικά, χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως ψυκτικά και λιπαντικά σε μετασχηματιστές, πυκνωτές και άλλες ηλεκτρικές συσκευές. Η παραγωγή των PCBs στις ΗΠΑ σταμάτησε τον Αύγουστο του 1977, επειδή υπήρχαν ενδείξεις ότι συσσωρεύονται στο περιβάλλον και ενδέχεται να προκαλέσουν επιβλαβείς επιπτώσεις. Προϊόντα για καταναλωτές που μπορεί να περιέχουν PCBs περιλαμβάνουν παλιές λυχνίες φθορισμού, ηλεκτρικές συσκευές ή οικιακές συσκευές που περιέχουν πυκνωτές με PCBs (που έχουν παραχθεί πριν από το 1977), παλιά λάδια μικροσκοπίων και παλιά λάδια υδραυλικών μηχανισμών. Πριν από το 1977, τα PCBs εισέρχονταν στον αέρα, το νερό και το έδαφος κατά τη διάρκεια της παραγωγής και της χρήσης τους στις ΗΠΑ. Απόβλητα που περιείχαν PCBs συχνά απορρίπτονταν σε χωματερές, ενώ επιπλέον διαρροές και ατυχήματα συνέβαλλαν στη ρύπανση. Σήμερα, τα PCBs εξακολουθούν να απελευθερώνονται από ανεπαρκώς συντηρημένους χώρους επικίνδυνων αποβλήτων, παράνομη ή λανθασμένη απόρριψη, διαρροές από ηλεκτρικούς μετασχηματιστές που περιέχουν PCBs ή καύση απορριμμάτων.



**Εικόνα 8.** Χημική δομή μερικών PCBs

Μόλις εισέλθουν στο περιβάλλον, τα PCBs δεν διασπώνται εύκολα και μπορεί να παραμείνουν για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Μετακινούνται εύκολα ανάμεσα σε αέρα, νερό και έδαφος και γι' αυτόν τον λόγο, τα PCBs εντοπίζονται παγκοσμίως. Σε γενικές γραμμές, τα ελαφρύτερα PCBs μπορούν να μεταφερθούν πιο μακριά από την πηγή ρύπανσης. Στην ατμόσφαιρα υπάρχουν ως στερεά σωματίδια ή ατμοί και τελικά επιστρέφουν στο έδαφος και το νερό μέσω της σκόνης, της βροχής ή του χιονιού. Στο έδαφος, τα PCBs προσκολλώνται ισχυρά και συνήθως δεν διεισδύουν βαθιά με το νερό της βροχής. Δεν διασπώνται εύκολα και μπορεί να παραμείνουν για μήνες ή χρόνια. Όσο περισσότερα άτομα χλωρίου περιέχουν, τόσο πιο αργά αποδομούνται. Η εξάτμιση αποτελεί σημαντικό μηχανισμό απώλειας των ελαφρύτερων PCBs από το έδαφος. Ως αέρια, μπορούν να συσσωρευτούν στα φύλλα και στα επάνω μέρη των φυτών και καλλιεργειών [74].

Οι συγκεντρώσεις 20 PCBs στα δείγματα εδάφους περί την μονάδα διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών μετά την πυρκαγιά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5**. Στο δείγμα των αιωρούμενων ατμοσφαιρικών σωματιδίων όλα τα συγγενή ήταν μη ανιχνεύσιμα, δηλαδή σε συγκεντρώσεις χαμηλότερες από τα αντίστοιχα όρια ποσοτικοποίησης της αναλυτικής μεθόδου.

Όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 5**, μόνο μια ένωση (PCB 28) ανιχνεύθηκε σε όλα τα δείγματα, 13 ενώσεις δεν ανιχνεύθηκαν σε κανένα δείγμα, ενώ οι υπόλοιπες 6 ενώσεις ανιχνεύθηκαν σε 2 έως 6 από τα 11 δείγματα. Οι 5 ενώσεις που ανιχνεύθηκαν με τη μεγαλύτερη συχνότητα ανήκουν στην ομάδα ICES-7 η οποία περιλαμβάνει ουσίες με υψηλές συγκεντρώσεις σε διάφορα τεχνητά υλικά που μπορεί να περιέχουν PCBs [73]. Από την άλλη μεριά, οι περισσότερες ενώσεις (6-7) ανιχνεύθηκαν στα σημεία S1-S4, στην περίμετρο της μονάδας, 3 ενώσεις στο σημείο S5, σε σχετικά κοντινή απόσταση ενώ στα υπόλοιπα δείγματα ανιχνεύθηκαν 1 – 2 ενώσεις. Αντίστοιχη χωρική διακύμανση είχε και το άθροισμα των συγκεντρώσεων όλων των PCBs που προσδιορίστηκαν (ΣPCBs) (**Εικόνα 9**).

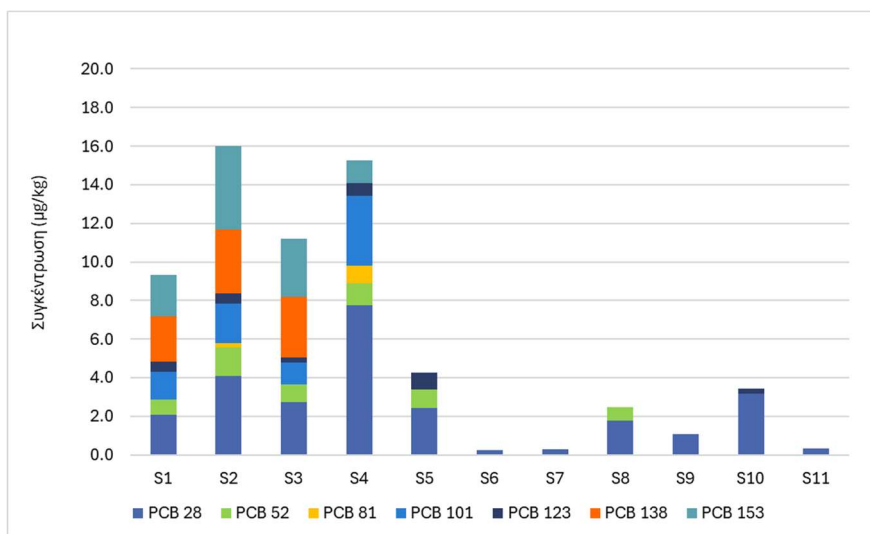
**Πίνακας 5.** Συγκεντρώσεις πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (PCBs) σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης, σε  $\mu\text{g}/\text{kg}$  ξηρού εδάφους

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
PCB 8	<0.029*	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029
PCB 28	2.07	4.07	2.73	7.77	2.43	0.233	0.30	1.77	1.08	3.15	0.350
PCB 52	0.818	1.50	0.905	1.14	0.960	<0.034	<0.034	0.695	<0.034	<0.034	<0.034
PCB 81	<0.113	0.235	<0.113	0.908	<0.113	<0.113	<0.113	<0.113	<0.113	<0.113	<0.113
PCB 77	<0.125	<0.125	<0.125	<0.125	<0.125	<0.125	<0.125	<0.125	<0.125	<0.125	<0.125
PCB 101	1.43	2.05	1.17	3.62	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033
PCB 105	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077
PCB 114	<0.159	<0.159	<0.159	<0.159	<0.159	<0.159	<0.159	<0.159	<0.159	<0.159	<0.159
PCB 118	<0.152	<0.152	<0.152	<0.152	<0.152	<0.152	<0.152	<0.152	<0.152	<0.152	<0.152
PCB 123	0.517	0.500	0.233	0.667	0.883	<0.035	<0.035	<0.035	<0.035	0.267	<0.035
PCB 126	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041
PCB 138	2.33	3.33	3.17	<0.056	<0.056	<0.056	<0.056	<0.056	<0.056	<0.056	<0.056
PCB 149	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033	<0.033
PCB 153	2.17	4.33	3.00	1.17	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041	<0.041
PCB 156	<0.144	<0.144	<0.144	<0.144	<0.144	<0.144	<0.144	<0.144	<0.144	<0.144	<0.144
PCB 157	<0.027	<0.027	<0.027	<0.027	<0.027	<0.027	<0.027	<0.027	<0.027	<0.027	<0.027
PCB 167	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031
PCB 169	<0.037	<0.037	<0.037	<0.037	<0.037	<0.037	<0.037	<0.037	<0.037	<0.037	<0.037
PCB 180	<0.048	<0.048	<0.048	<0.048	<0.048	<0.048	<0.048	<0.048	<0.048	<0.048	<0.048
PCB 189	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029
ΣPCBs**	9.86	16.49	11.73	15.76	4.87	0.86	0.92	3.07	1.71	4.02	0.97
ΣPCBs7***	8.92	15.38	11.07	13.82	3.56	0.42	0.48	2.63	1.27	3.33	0.53

\* η έκφραση «<τιμή» σημαίνει κάτω του αντίστοιχου ορίου ποσοτικοποίησης, καθώς η συγκέντρωση ήταν μη ανιχνεύσιμη

\*\* Άθροισμα των συγκεντρώσεων όλων των PCBs. Για τις μη ανιχνεύσιμες ενώσεις χρησιμοποιήθηκε το μισό του ορίου ποσοτικοποίησης

\*\*\* Άθροισμα των συγκεντρώσεων των ICES-7 PCBs



**Εικόνα 9.** Συγκεντρώσεις των PCBs που ανιχνεύθηκαν σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης (σε µg/kg ξηρού εδάφους)

Μια προσεκτική παρατήρηση της **Εικόνα 9** αποκαλύπτει ότι τα συγγενή με μεγαλύτερο μοριακό βάρος (PCB 123, PCB 138, PCB 153) ανιχνεύονται στα δείγματα κοντά στη μονάδα, ενώ ελαφρύτερα συγγενή (PCB 28, PCB 52) κατανέμονται σε μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες και αποτυπώνουν τον τρόπο απόθεσης των PCB στο έδαφος [75, 76]. Οι συγγενείς ενώσεις με λιγότερα άτομα χλωρίου, και επομένως μικρότερο μοριακό βάρος, μεταφέρονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή εκπομπής τους, λόγω του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής τους στην ατμόσφαιρα. Τα βαρύτερα PCB (τα πιο χλωριωμένα) τείνουν να προσροφώνται σε σωματίδια και να εναποτίθενται κοντά στις πηγές μέσω ξηρής ή υγρής απόθεσης. Έτσι, οι συγγενείς ενώσεις με λιγότερα άτομα χλωρίου επικρατούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τις πηγές [75].

Η απευθείας συσχέτιση της σχετικής αναλογίας των συγγενών με τις πηγές των PCBs είναι δύσκολη, δεδομένου ότι πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τη μεταφορά και την απόθεση των ενώσεων. Παρ' όλα αυτά, σχετικά ομοιογενής σύσταση συγγενών με διαφορετικό αριθμό ατόμων χλωρίου, όπως στην περίπτωση των σημείων S1-S3, είναι χαρακτηριστική βιομηχανικών περιοχών και μπορεί να υποδηλώνει διαρροές και εκπομπές από πηγές όπως μετασχηματιστές, χωματερές ή οικοδομικά υλικά που περιέχουν PCB που έχουν μεταφερθεί σε μικρή απόσταση [77]. Η μελέτη του σχηματισμού τοξικών ρύπων σε πυρκαγιές σε χώρους υγειονομικής ταφής αστικών αποβλήτων έδειξε ότι τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κατά ή τις επόμενες ημέρες μετά την πυρκαγιά ήταν εμπλουτισμένα με PCBs με 4 ή 5 άτομα χλωρίου, αν και η σύσταση του μίγματος των συγγενών εξαρτιόταν από το είδος των απορριμμάτων που κάηκαν [3]. Σε κάθε περίπτωση, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του χαμηλού μοριακού βάρους PCB 28 στα σημεία S1-S5 κοντά στη μονάδα αλλά και S10, στη Μόρια, πιθανότατα δηλώνει την ταχεία μεταφορά και απόθεση του μετά την πυρκαγιά, μαζί με άλλους ρύπους που σχετίζονται με αυτή την πηγή.

Το άθροισμα των συγκεντρώσεων των 7 PCBs (ΣPCBs) που μετρήθηκαν στο έδαφος στην περιοχή μελέτης συγκρίθηκε με δεδομένα από προηγούμενες έρευνες που προσδιόρισαν τα επίπεδα των ενώσεων αυτών στο έδαφος διαφόρων περιοχών στην Ευρώπη, που χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ανθρώπινες δραστηριότητες και επομένως και επίπεδα ρύπανσης (**Πίνακας 6**). Η σύγκριση έδειξε ότι το ΣPCBs από τη Λέσβο είναι μέσα στο εύρος των τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για περιοχές με μέτρια ή χαμηλά

επίπεδα ρύπανσης, ενώ απέχει κατά μια τάξη μεγέθους από σοβαρά ρυπασμένες βιομηχανικές ή αστικές περιοχές.

**Πίνακας 6.** Συγκεντρώσεις ΣPCBs (μg/kg) σε εδάφη από την περιοχή μελέτης και από περιοχές με διάφορες χρήσεις γης στην Ευρώπη

Περιοχή	Τύπος περιοχής	Αριθμός PCBs	Εύρος	Μέσος όρος ± τυπική απόκλιση	Αναφορά
Ελλάδα, Λέσβος, περιοχή μελέτης		7	0.42-15.4	5.58	
France, Honfleur	Υποβάθρου	7		10.8	[75]
France, Forest of Brotonne	Υποβάθρου	7		n.d.	[75]
France, Harfleur	Περιαστική	7		21.5	[75]
France, Bois-Guillaume	Περιαστική	7		0.09	[75]
France, Rouen	Αστική	7		1.49	[75]
France, Notre-Dame de Gravenchon	Βιομηχανική	7		150	[75]
France, Oissel	Βιομηχανική	7		50.3	[75]
Romania	Rural	9		4.0±2.5	[78]
Romania	Αστική	9		57.3±41.0	[78]
Romania	Βιομηχανική	9		23.1±17.3	[78]
Romania	Διάθεση απορριμάτων	9		63.2±35.3	[78]
Romania	Βιομηχανική	9		722.2	[78]
Italy, Milano	Αστική/ Βιομηχανική	16		30.5±37.9	[79]
Italy, Varese	Αστική/ Βιομηχανική	16		13.3±10.2	[79]
Italy, Lake Varese	Γεωργική	16		4.4±3.2	[79]
Italy, Campo dei Fiori	Γεωργική	16		15.0±15.6	[79]
Italy, Formazza Valley	Υποβάθρου	16		1.28±0.75	[79]
Italy, Anterselva Valley	Υποβάθρου	16		0.37±0.24	[79]
Portugal, Aveiro	Αστική	5	0.15-41	2.6	[77]
Scotland, Glasgow	Αστική	5	1.9-43	9.4	[77]
Slovenia, Ljubljana	Αστική	5	0.67-29	2.1	[77]
Italy, Torino	Αστική	5	0.72-86	6.6	[77]
Sweden, Uppsala	Αστική	5	0.54-47	2.3	[77]

### 3.2 Βαρέα μέταλλα στο έδαφος

Ο όρος «βαρέα μέταλλα» αναφέρεται σε στοιχεία με υψηλό ατομικό βάρος ή μεγάλη πυκνότητα, αλλά σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως για να περιγράψει μεταλλικά στοιχεία και μεταλλοειδή που είναι τοξικά για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ορισμένα ελαφρύτερα αλλά τοξικά στοιχεία (π.χ. σελήνιο, αρσενικό, αργίλιο) περιλαμβάνονται επίσης στην ομάδα. Κοινά βαρέα μέταλλα με πυκνότητα άνω των 5 g/cm<sup>3</sup> είναι τα τιτάνιο (Ti), βανάδιο (V), χρώμιο (Cr), μαγγάνιο (Mn), σίδηρος (Fe), κοβάλτιο (Co), νικέλιο (Ni), χαλκός (Cu), ψευδάργυρος (Zn), αρσενικό (As), μολυβδαίνιο (Mo), άργυρος (Ag), κάδμιο (Cd), κασσίτερος (Sn),

λευκόχρυσος (Pt), χρυσός (Au), υδράργυρος (Hg) και μόλυβδος (Pb). Τα βαρέα μέταλλα βρίσκονται φυσικά στον γήινο φλοιό, ωστόσο οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες έχουν αυξήσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις τους στο έδαφος και το νερό. Κύριες ανθρωπογενείς πηγές είναι η εξόρυξη και η τήξη μετάλλων, οι βιομηχανίες μεταλλουργίας, οι διαρροές από χωματερές και απορρίμματα, τα απόβλητα κτηνοτροφίας, οι απορροές από δρόμους και οχήματα, καθώς και η χρήση φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων και λιπασμάτων. Φυσικές πηγές περιλαμβάνουν ηφαιστειακή δραστηριότητα, διάβρωση του εδάφους, γεωλογικές διεργασίες και την επαναιώρηση ιζημάτων. Τα βαρέα μέταλλα εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω κατάποσης μολυσμένων τροφών, εισπνοής, πόσης μολυσμένου νερού ή μέσω δερματικής επαφής. Είναι μη βιοδιασπώμενα και συσσωρεύονται στους οργανισμούς (βιοσυσσώρευση), προκαλώντας διάφορες βιολογικές και φυσιολογικές διαταραχές. Ορισμένα είναι απαραίτητα σε μικρές ποσότητες, αλλά γίνονται τοξικά όταν οι συγκεντρώσεις τους αυξηθούν. Η εκτεταμένη χρήση τους στη γεωργία, τη βιομηχανία και την ιατρική έχει οδηγήσει στη διάχυσή τους στον αέρα, τα νερά και τα εδάφη. Τα μεταλλοειδή τείνουν να σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς, γεγονός που τους προσδίδει τοξικά χαρακτηριστικά. Οι δύο σημαντικότερες συνέπειες αυτής της ιδιότητας είναι ότι μπορούν να δεσμεύονται ομοιοπολικά με οργανικές ομάδες, σχηματίζοντας έτσι λιπόφιλες ενώσεις και ιόντα (π.χ. το οξειδίο του τριβουτυλοκασιτέρου και οι μεθυλιωμένες μορφές του αρσενικού), και ότι μπορούν να προκαλέσουν τοξικές επιδράσεις όταν δεσμεύονται με μη μεταλλικά στοιχεία μακρομορίων του κυττάρου (π.χ. πρόσδεση του μολύβδου και του υδραργύρου στις σουλφυδρυλικές ομάδες των πρωτεϊνών). Τα βαρέα μέταλλα μπορούν να εισέλθουν στα εδάφη τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές. Φυσικές πηγές περιλαμβάνουν γεωλογικές διεργασίες, όπως η διάβρωση πετρωμάτων και εδαφών, που απελευθερώνουν μέταλλα στο έδαφος, ενώ και η ηφαιστειακή δραστηριότητα αποτελεί σημαντική πηγή μετάλλων, όπως τα As, Cd, Pb, μέσω της έκλυσης τους στην ατμόσφαιρα και την εναπόθεση τους στα εδάφη. Οι ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνουν τη χρήση μη επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση, φυτοφάρμακων, κοπριάς και άλλων λιπασμάτων, απόβλητων ορυχείων, ιλύος μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, τις διαρροές πετρελαίου, και την εναπόθεση απορριμμάτων. Τα βαρέα μέταλλα είναι μη βιοαποδομήσιμα και ως εκ τούτου παραμένουν στο έδαφος για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η παρουσία τους διαταράσσει τα οικοσυστήματα και εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα, επηρεάζοντας τη ικανότητα βιοδιάσπασης άλλων, οργανικών, ρύπων. Προκαλούν κινδύνους για όλη τη βιόσφαιρα, καθώς προσλαμβάνονται από φυτά και οργανισμούς, αλλάζουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (pH, χρώμα, πορώδης, χημεία) και ρυπαίνουν τα νερά, υποβαθμίζοντας την ποιότητα του περιβάλλοντος [80, 81].

Η καύση απορριμμάτων αποτελεί σημαντική πηγή εκτός από οργανικών ρύπων και βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον [82, 6]. Τα αστικά στερεά απορρίμματα περιέχουν τεχνητά και φυσικά υλικά, όπως χαρτί, πλαστικά, υφάσματα, διάφορα οργανικά υλικά, καθώς και ανόργανα υλικά όπως γυαλί, μέταλλα και διάφορα άλλα συστατικά. Σχεδόν όλα αυτά τα υλικά περιέχουν κάποια ποσότητα βαρέων μετάλλων, τα οποία θεωρούνται ως τοξικά σε ορισμένες συγκεντρώσεις, όπως π.χ. Pb, Cd, Cr, Hg, Ni, Cu, Zn, Mn [82, 6].

Κάποια από τα πιο κοινά υλικά σε πυρκαγιές απορριμμάτων είναι και τα ελαστικά αυτοκινήτων που απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες Zn [6]. Τα καμένα απορρίμματα παράγουν υπολείμματα όπως τέφρα και σκωρία, τα οποία θεωρούνται επικίνδυνα απόβλητα. Η έκλυση ρύπων από αυτά αποτελεί σοβαρή απειλή για τα υπόγεια νερά, καθώς το έκπλυμα της καύσης είναι πιο ρυπογόνο από αυτό των ανεπεξέργαστων αποβλήτων λόγω της αυξημένης κινητικότητας των συστατικών τους. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της καύσης απελευθερώνονται ρύποι στην ατμόσφαιρα, είτε στην αέρια είτε στη σωματιδιακή

φάση. Ως συνέπεια των θερμικών διεργασιών κατά την καύση, η ποσότητα των βαρέων μετάλλων που περιέχεται στην τέφρα απορριμμάτων είναι πολλαπλάσια σε σχέση με τα φυσικά αστικά απορρίμματα των χωματερών [6]. Οι πληροφορίες που απαντώνται στη βιβλιογραφία σχετικά με την καύση απορριμμάτων αφορούν κυρίως είτε αποτέφρωση σε κατάλληλες μονάδες [82] είτε ελεγχόμενη καύση ή αυτανάφλεξη σε νόμιμες ή παράνομες χωματερές και χώρους υγειονομικής ταφής [6, 83, 36]. Η καύση των αστικών απορριμμάτων σε μονάδες αποτέφρωσης υπόκειται σε έλεγχο για τον περιορισμό της εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα ή στο έδαφος, αλλά ένας τέτοιος έλεγχος δεν είναι εφικτός σε περιπτώσεις πυρκαγιών απορριμμάτων σε χώρους διάθεσης ή αποθήκευσης απορριμμάτων [6]. Μια εκτενής μελέτη των ατμοσφαιρικών εκπομπών βαρέων μετάλλων κατά την ανεξέλεγκτη καύση αστικών στερεών αποβλήτων στην Κίνα έδειξε ότι οι εκπεμπόμενες ποσότητες ακολουθούν τη σειρά: Cd < Hg < Ni < Cr < Se < Pb < As < Cu < Zn [36]. Βέβαια οι συγκεντρώσεις μετάλλων στα ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια από την ανοιχτή καύση διαφορετικών ειδών αστικών αποβλήτων παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση. Ο Fe εκπέμπεται σε υψηλές συγκεντρώσεις από διάφορες κατηγορίες αποβλήτων. Αυξημένα επίπεδα Cu και Zn έχει βρεθεί ότι προέρχονται από την καύση πλαστικών, γεγονός που τα καθιστά χαρακτηριστικοί δείκτες αποτέφρωσης αστικών αποβλήτων, ενώ το χαρτί αποτελεί πηγή υψηλών συγκεντρώσεων Mn και Cr και Ni [84]. Υψηλές συγκεντρώσεις Zn, Ba και Mo καταγράφηκαν στην στάχτη που παραμένει μετά από την πυρκαγιά, σε πέντε διαφορετικές πυρκαγιές σε παράνομους χώρους αποθήκευσης αποβλήτων στην Πολωνία [83].

**Πίνακας 7.** Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης, σε mg/kg ξηρού εδάφους

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
<b>As</b>	9.41	10.4	18.3	11.5	14.9	11.1	21.2	12.1	13.1	13.1	10.6
<b>Al</b>	18535	21389	31919	7159	19688	25091	27771	18023	15685	8792	19832
<b>Cd</b>	0.31	0.35	0.36	0.73	0.34	0.20	0.16	0.27	0.21	0.55	0.20
<b>V</b>	33.1	37.5	50.8	20.8	47.3	42.7	44.2	36.5	31.2	24.2	40.1
<b>Cr</b>	46.6	48.0	41.0	80.5	83.5	73.1	28.4	26.8	129.7	62.7	44.4
<b>Cu</b>	33.9	44.5	43.3	274	34.6	28.4	20.5	27.7	25.7	323	24.0
<b>Mn</b>	463	537	661	449	512	694	669	461	681	319	539
<b>Pb</b>	33.5	46.5	51.9	361	20.7	27.0	20.7	22.8	18.2	185	29.3
<b>Co</b>	10.2	11.2	14.0	8.4	15.1	15.7	14.5	8.2	41.2	8.9	11.4
<b>Hg</b>	0.026	0.036	0.036	0.091	0.008	0.012	0.003	0.579	0.012	0.117	0.021
<b>Ni</b>	45.5	48.6	45.1	68.2	82.4	74.9	34.3	30.5	397	58.5	52.2
<b>Se</b>	0.14	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
<b>Ba</b>	173	198	217	281	162	246	199	105	131	290	186
<b>Mo</b>	0.483	0.783	0.788	3.20	0.567	0.814	0.729	0.794	0.449	1.21	0.515
<b>Zn</b>	114	163	109	795	65.8	796.5	49.8	72.7	71.5	399	71.8
<b>Fe</b>	12880	15100	18925	22065	17190	18109	17642	16064	28996	18741	15081

Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης φαίνονται στον **Πίνακα 7**. Πρέπει να διευκρινισθεί εδώ ότι οι τιμές αυτές δεν αντιστοιχούν στις ολικές συγκεντρώσεις των μετάλλων στο έδαφος, αλλά χαρακτηρίζονται ως ψευδο-ολικές καθώς αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα των μετάλλων που είναι διαθέσιμα για διεργασίες στο περιβάλλον, χωρίς να περιλαμβάνεται το κλάσμα των μετάλλων που μπορεί να είναι εγκλωβισμένα σε ανθεκτικά πυριτικά ορυκτά ή κρυσταλλικές δομές. Οι ψευδο-ολικές συγκεντρώσεις θεωρούνται σημαντικές, καθώς αντικατοπτρίζουν τα μέταλλα που μπορούν

να αλληλεπιδράσουν με το περιβάλλον ή να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα, δηλαδή τις βιοδιαθέσιμες και περιβαλλοντικά ευκίνητες μορφές. Οι ψευδο-ολικές συγκεντρώσεις χρησιμοποιούνται συχνά για τη σύγκριση επιπέδων ρύπανσης μεταξύ περιοχών και για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών κινδύνων των μετάλλων [85].

Αντίθετα με τους συνθετικούς ρύπους, τα μέταλλα είναι φυσικά συστατικά του στερεού φλοιού της Γης. Κατά συνέπεια, όλα τα εδάφη περιέχουν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό ολόκληρο το φάσμα των μετάλλων (και μεταλλοειδών) στον περιοδικό πίνακα, αλλά οι συγκεντρώσεις τους ποικίλλουν ευρέως και κάποια μπορεί να είναι μη ανιχνεύσιμα (π.χ. Cd, Hg) ενώ άλλων η αφθονία να εκφράζεται ως ποσοστό % επί της μάζας του εδάφους (π.χ. Al, Fe). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το συνολικό περιεχόμενο των βαρέων μετάλλων (και μεταλλοειδών) στο έδαφος προέρχεται τόσο από φυσικές πηγές (λιθογενετικές, δηλαδή τα ορυκτά του μητρικού πετρώματος από το οποίο παράγεται το έδαφος) όσο και από ανθρωπογενείς πηγές. Οι ανθρωπογενείς εισροές περιλαμβάνουν απόθεση ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων, βροχή που περιέχει μέταλλα, απευθείας εφαρμογές λιπασμάτων και αγροχημικών, καθώς και οργανικά απόβλητα όπως ιλύες από αποχετεύσεις, κοπριά, υπολείμματα τροφών και κομπόστ [86]. Έτσι η συγκέντρωση ενός μετάλλου στο έδαφος μπορεί να διαφέρει ακόμα και κατά τάξεις μεγέθους από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με το γεωλογικό υπόστρωμα και τις ανθρωπίνες δραστηριότητες και η ερμηνεία των συγκεντρώσεων απαιτεί συνυπολογισμό τόσο της φυσικής όσο και της ανθρωπογενούς συνιστώσας σε κάθε περιοχή μελέτης.

**Πίνακας 8.** Διάμεσες και μέγιστες (σε παρένθεση) συγκεντρώσεις μερικών βαρέων μετάλλων στα εδάφη της Ευρώπης και της Αμερικής και παγκόσμιος μέσος όρος (σε mg/kg)

	Europe	USA	World
As	6.0 (<27.3)	–	4.7
Ba	65.0 (<1,700)	–	362
Cd	0.145 (<14)	0.16 (<41)	1.1
Co	7.0 (<255)	7 (<347)	6.9
Cr	22.0 (<234)	24 (<4,107)	42
Cu	12 (<239)	17.3 (<1,836)	14
Hg	0.037 (<1.35)	0.075 (<3)	0.1
Mn	382 (<6,480)	372 (<8,071)	418
Mo	0.62 (<21.3)	–	1.8
Ni	14 (<2,560)	18.3 (<4,497)	18
Pb	15 (<886)	10.1 (<1,650)	25
Sb	0.6 (<31)	–	0.62
Se	–	–	0.7
V	33 (<281)	–	60
Zn	48 (<2,270)	56.5 (<6,173)	62

Οι προσδιορισμένες συγκεντρώσεις είναι χαρακτηριστικές των συγκεντρώσεων που απαντώνται σε εδάφη ανά τον κόσμο (Πίνακας 8). Επιπλέον είναι σε συμφωνία με τις συγκεντρώσεις που είχαν προσδιορισθεί πριν από περίπου μια δεκαετία (το 2016) στο έδαφος εντός και πέριξ της μονάδας κατά την περίοδο της κανονικής λειτουργίας της (πριν το επεισόδιο της πυρκαγιάς) [48]. Με βάση αυτό το δεδομένο, η εκδήλωση της πυρκαγιάς δεν φαίνεται να έχει προκαλέσει γενικά αξιοσημείωτη αύξηση στις συγκεντρώσεις των

βαρέων μετάλλων στο έδαφος στην περιοχή της μονάδας, αν και σημειακές διαφορές δεν μπορούν να αποκλεισθούν καθώς τα σημεία δειγματοληψίας στις δύο μελέτες διαφέρουν.

Για την αναγνώριση της διαφορετικής προέλευσης των μετάλλων στα εδάφη γύρω από τη μονάδα ανακύκλωσης εφαρμόστηκε η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Components Analysis, PCA). Η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA) είναι μια πολυμεταβλητή στατιστική τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μείωση της διάστασης ενός συνόλου δεδομένων. Ο στόχος είναι να μετασχηματιστούν οι αρχικές, πιθανώς συσχετισμένες μεταβλητές, σε ένα μικρότερο αριθμό αδιάστατων κύριων συνιστωσών, που διατηρούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας (διακύμανση) των αρχικών δεδομένων.

Η PCA υπολογίζει 4 κύριες συνιστώσες (PC) στα δείγματα εδάφους από την περιοχή μελέτης, που ερμηνεύουν αθροιστικά το 88% της διακύμανσης των συγκεντρώσεων των μετάλλων (**Πίνακας 9**).

**Πίνακας 9.** Κύριες συνιστώσες των συγκεντρώσεων των μετάλλων

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
As	-0.064	-0.018	<b>0.794</b>	0.019
Al	-0.568	-0.261	<b>0.713</b>	-0.262
Cd	<b>0.892</b>	-0.115	-0.184	0.176
V	-0.646	-0.281	<b>0.541</b>	-0.315
Cr	0.158	<b>0.893</b>	-0.233	-0.245
Cu	<b>0.905</b>	-0.006	-0.252	0.117
Mn	-0.415	0.369	<b>0.694</b>	-0.320
Pb	<b>0.949</b>	0.017	-0.184	0.080
Co	-0.320	<b>0.929</b>	0.139	-0.091
Hg	-0.050	-0.213	-0.141	<b>0.908</b>
Ni	-0.164	<b>0.980</b>	-0.070	0.005
Se	0.436	0.244	<b>0.560</b>	0.469
Ba	<b>0.856</b>	-0.183	0.116	-0.393
Mo	<b>0.899</b>	-0.019	-0.058	0.118
Zn	<b>0.779</b>	0.052	-0.001	-0.194
Fe	0.26	<b>0.922</b>	0.194	0.095

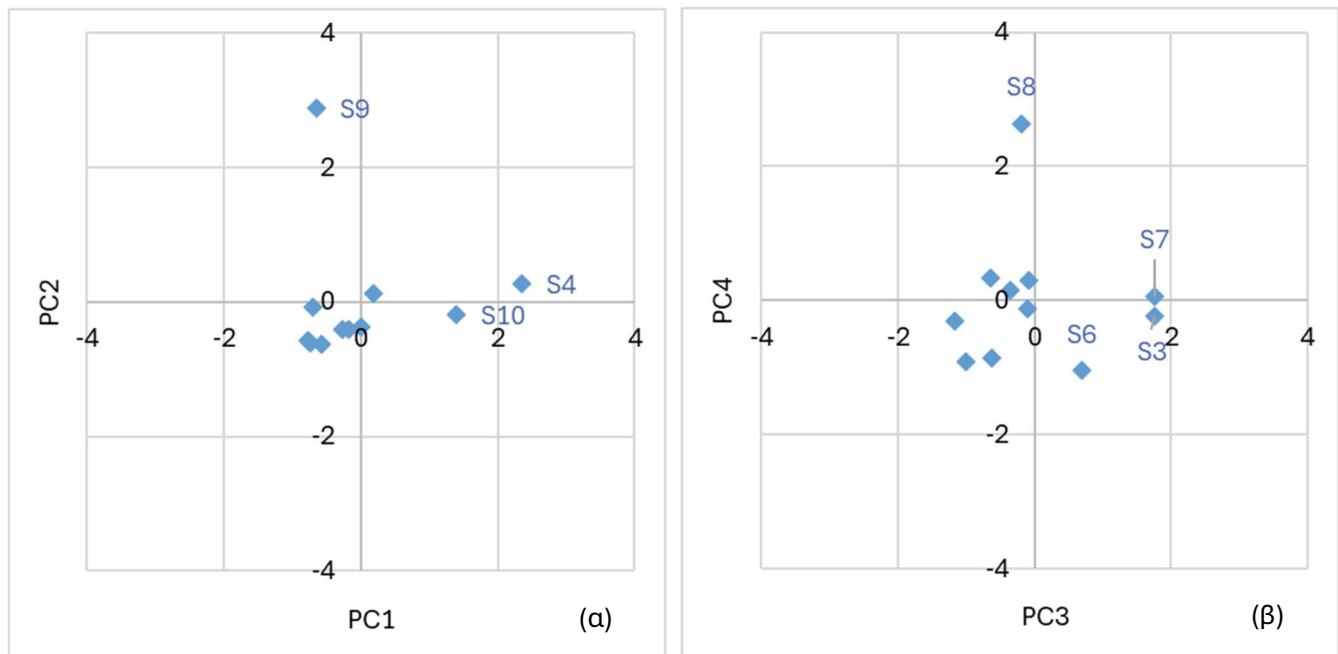
Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

Η πρώτη συνιστώσα (PC1), που ερμηνεύει το 41% της συνολικής διακύμανσης, φέρει υψηλά βάρη (loadings) από τα Cd, Cu, Pb, Ba, Mo, Zn, όλα μέταλλα που σχετίζονται με εκπομπές από πυρκαγιές απορριμμάτων [83, 36, 84]. Βέβαια, εμπλουτισμός του εδάφους με βαρέα μέταλλα εντός ή γύρω από τη μονάδα θα μπορούσε να αναμένεται και από την κανονική της λειτουργία της μονάδας, καθώς διαχειρίζεται μεγάλους όγκους μεταλλικών απορριμμάτων [48]. Επομένως η πρώτη συνιστώσα αντιπροσωπεύει την επίδραση της μονάδας ανακύκλωσης στα εδάφη της περιοχής. Η δεύτερη συνιστώσα (PC2, 25% της συνολικής διακύμανσης), φέρει υψηλά βάρη από τα μέταλλα Co, Cr, Ni, Fe. Ο συνδυασμός αυτών των μετάλλων δείχνει την επίδραση πετρωμάτων οφιολιθικού χαρακτήρα στη χημική σύσταση των εδαφών της περιοχής μελέτης [87]. Η τρίτη συνιστώσα (PC3, 13% της συνολικής διακύμανσης), συνδυάζει τα υψηλά

βάρος του Al, και As με τα μετρίως υψηλά των Se, Mn και V. Η παρουσία των Al και Mn – δύο κύριων λιθογενών στοιχείων – σε αυτή τη συνιστώσα υποδηλώνει τη συσχέτιση του As και του Se με την τοπική γεωλογία και τη λιθογενή τους προέλευση. Τέλος, η τέταρτη συνιστώσα (PC4, 9% της συνολικής διακύμανσης), χαρακτηρίζεται από το υψηλό βάρος μόνο του Hg, που διαφοροποιείται τελείως από τα άλλα μέταλλα που σχετίζονται με την πυρκαγιά.

Η γραφική απεικόνιση των προβολών (scores) των δειγμάτων πάνω στους κύριους άξονες (**Εικόνα 10**) επιτρέπει την αναγνώριση της προέλευσης των μετάλλων στην περιοχή μελέτης. Οι υψηλές προβολές των σημείων S4 και S10 στην πρώτη κύρια συνιστώσα υποδηλώνει ότι αυτά τα δύο σημεία δέχονται την



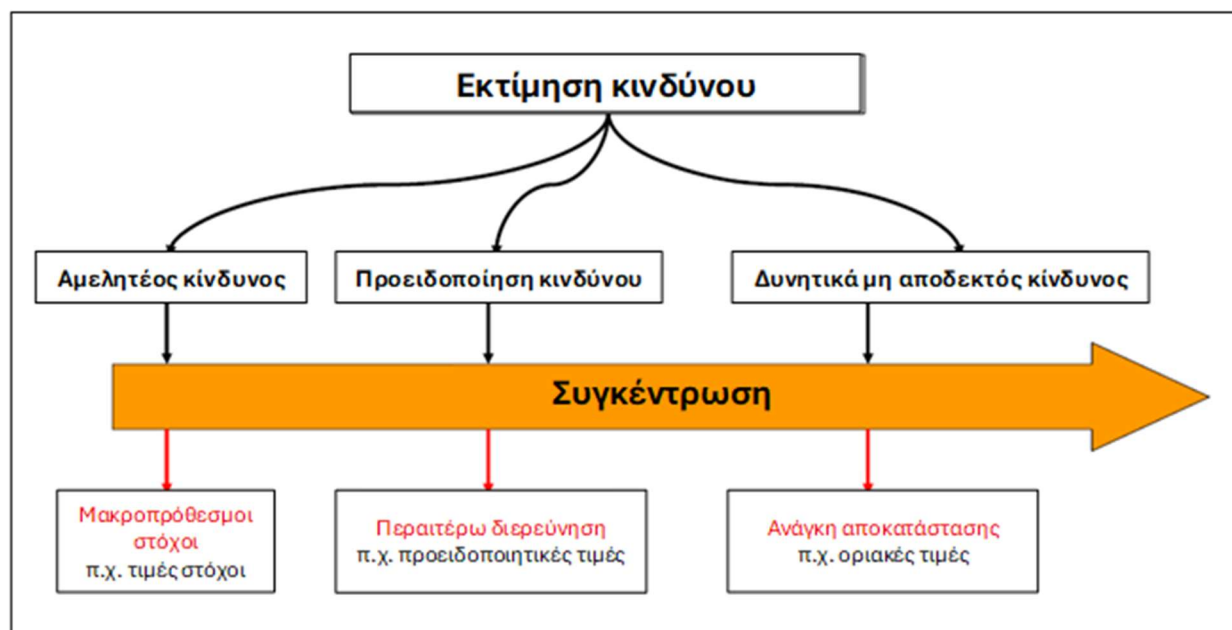
**Εικόνα 10.** Γραφική απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας επί των κυρίων συνιστωσών PC1 και PC2 (α), PC3 και PC4 (β). Σημειώνονται μόνο τα σημεία που ξεχωρίζουν.

επίδραση της μονάδας ανακύκλωσης. Καθώς το ένα σημείο βρίσκεται στην βόρεια παρυφή της μονάδας ενώ το άλλο στον οικισμό της Μόριας, σε μεγάλη απόσταση από τη μονάδα, και καθώς στα ίδια αυτά σημεία έχει εντοπισθεί και σημαντική επιβάρυνση από οργανικούς ρύπους (PAHs και PCBs), που σχετίστηκαν με εκπομπή κατά την πυρκαγιά, είναι πολύ πιθανό ότι και οι αυξημένες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα σημεία αυτά προέρχονται από το ίδιο συμβάν και ότι η κύρια συνιστώσα 1 αντιπροσωπεύει την επίδραση της πυρκαγιάς στα επίπεδα και τη χωρική κατανομή των μετάλλων που περιλαμβάνει. Αντίθετα, η γεωλογική προέλευση φαίνεται ότι καθορίζει τη σύσταση στο σημείο 9, στο δυτικότερο σημείο της περιοχής μελέτης, όπως υποστηρίζεται και από τη θέση του δείγματος στην περιοχή της υπο-οφιολιθικής ζώνης που γεωλογικού υποβάθρου της Ανατολικής Λέσβου [88]. Τα εδάφη στα γειτονικά σημεία S3 και S7, στα ανατολικά της μονάδας, και σε μικρότερο βαθμό το σημείο S6 στα νότια, φαίνεται ότι μοιράζονται παρόμοια χημική σύσταση καθοριζόμενη από την τοπική γεωλογία, ενώ το δείγμα S8 διαχωρίζεται από όλα τα υπόλοιπα λόγω της υψηλής συγκέντρωσης του Hg. Η τιμή αυτή είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους υψηλότερη από τα υπόλοιπα δείγματα της περιοχής μελέτης, με εξαίρεση τα σημεία S4 και S10, που έχουν επηρεαστεί από την πυρκαγιά, από τα οποία είναι υψηλότερη 5 και 6 φορές. Συνεπώς, δεν φαίνεται να σχετίζεται η προέλευση του Hg στο σημείο με την πυρκαγιά και είναι πιθανό ότι κάποια άλλη πηγή επιβαρύνει τοπικά και με μικρή έκταση το έδαφος της συγκεκριμένης περιοχής.

### 3.3 Εκτίμηση κινδύνου για τη δημόσια υγεία από τις αναλύσεις στο χώμα

Η περιβαλλοντική ρύπανση υπαγόρευσε την ανάγκη για παρακολούθηση της κατάστασης των εδαφών, με σκοπό τη μείωση της αρνητικής επίδρασης στην ανθρώπινη υγεία και στην κατάσταση των οικοσυστημάτων. Μέχρι σήμερα, υπάρχουν δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις για την ανάπτυξη επιπέδων μέγιστων επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων για χημικά στοιχεία. Η πρώτη προσέγγιση εστιάζει στα οικοσυστήματα ή/και σε ξεχωριστά συστατικά τους, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητας του εδάφους να διατηρεί την αυτοκαθαριστική του ικανότητα, ενώ η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιείται για την αποτροπή εισόδου επικίνδυνων δόσεων ουσιών στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της τροφής και του νερού [89, 90]. Σε αυτό το πλαίσιο, οι **Τιμές Ελέγχου Εδάφους (SSVs)** αποτελούν βασικά εργαλεία που καθορίζουν επίπεδα συγκέντρωσης ρύπων κάτω από τα οποία δεν αναμένονται δυσμενείς επιδράσεις. Χρησιμεύουν στον εντοπισμό πιθανής ρύπανσης, στην καθοδήγηση της λήψης μέτρων διαχείρισης και στη στήριξη του περιβαλλοντικού σχεδιασμού, καθώς προσαρμόζονται στις διαφορετικές χρήσεις γης. Παρέχουν ένα κοινό σημείο αναφοράς για τη σύγκριση μετρούμενων συγκεντρώσεων με κανονιστικά όρια και συμβάλλουν στον προσδιορισμό του εάν μια περιοχή είναι ασφαλής, αν απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση ή αν χρειάζεται αποκατάσταση [44].

Πολλές ευρωπαϊκές χώρες έχουν υιοθετήσει πολιτικές προστασίας του εδάφους, με συστήματα τριών επιπέδων που βασίζονται σε διάφορα επίπεδα κινδύνου, αμελητέου, ενδιάμεσου (προειδοποιητικού) και δυνητικά μη αποδεκτού κινδύνου, και αυτές οι τιμές μπορούν να εφαρμοστούν αντίστοιχα ως μακροπρόθεσμοι ποιοτικοί στόχοι, προειδοποιητικές τιμές (trigger values) και οριακές τιμές (που υποδεικνύουν ανάγκη αποκατάστασης) [44] (**Εικόνα 11**).



**Εικόνα 11.** Καθορισμός τιμών ελέγχου (screening values) με βάση διάφορα επίπεδα κινδύνου και οι διαφορετικές εφαρμογές των τιμών ελέγχου (προσαρμογή από [44])

Παρά την ανομοιογένεια στον σκοπό και την προοριζόμενη εφαρμογή αυτών των Τιμών Ελέγχου Εδάφους (SSVs), μπορούν γενικά να διακριθούν τρεις τύποι SSVs [44, 47]:

- **SSVs βασισμένες σε αμελητέο κίνδυνο**, που στοχεύουν στο να αποκλειστεί οποιοσδήποτε τύπος δυσμενούς επίδρασης ακόμη και στην πιο ευαίσθητη χρήση γης. Αυτός ο τύπος κινδύνου χρησιμοποιείται συνήθως για τον καθορισμό μακροπρόθεσμων περιβαλλοντικών στόχων.
- **Ενδιάμεσες (προειδοποιητικές) SSVs βασισμένες σε κίνδυνο**, για οικιστική χρήση γης, γνωστές επίσης ως τιμές ενεργοποίησης (trigger values), όπου ενδέχεται να εμφανιστούν δυνητικά δυσμενείς επιδράσεις σε οργανισμούς (δηλαδή είναι πιθανές επιβλαβείς επιδράσεις). Ουσιαστικά, αυτές οι τιμές είναι ακόμη ανεκτές, αλλά όταν υπερβαίνονται απαιτούνται περαιτέρω, ειδικές για την περιοχή, διερευνήσεις.
- **SSVs βασισμένες σε δυνητικά μη αποδεκτό κίνδυνο**, γνωστές επίσης ως τιμές αποκατάστασης ή καθαρισμού, που υποδεικνύουν σοβαρή ρύπανση και ξεκάθαρη ανάγκη για δράση απορρύπανσης.

Σήμερα, σε πολλές χώρες η προτιμώμενη χρήση των SSVs είναι αυτή των ενδιάμεσων (προειδοποιητικών) τιμών για οικιστική χρήση γης, που ενεργοποιούν περαιτέρω διερεύνηση, ειδική για την κάθε περιοχή [44]. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτή τη μελέτη. Οι προειδοποιητικές τιμές SSV για οργανικούς ρύπους που έχουν υιοθετηθεί σε διάφορες χώρες της ΕΕ παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10** και για τα βαρέα μέταλλα στον **Πίνακα 11**. Όπως διαπιστώνεται από τους **Πίνακα 10** και **Πίνακα 11**, οι τιμές SSV δεν είναι διαθέσιμες για όλες τις ενώσεις που παρακολούθηθηκαν στην παρούσα έρευνα, ενώ κάθε ευρωπαϊκή χώρα έχει ορίσει τιμές SSV για διαφορετικό αριθμό ρύπων. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι για την ίδια ένωση ή μέταλλο οι τιμές μπορεί να διαφέρουν μέχρι και αρκετές τάξεις μεγέθους, ως αποτέλεσμα των διαφορετικών επιστημονικών προσεγγίσεων και πολιτικών αντιλήψεων που έχουν διαμορφωθεί σε κάθε χώρα.

Στην **Εικόνα 12** παρουσιάζεται γραφικά η σύγκριση με τις προειδοποιητικές τιμές SSV των συγκεντρώσεων των PAHs που ανιχνεύθηκαν έστω και σε ένα δείγμα στην περιοχή μελέτης (και για τους οποίους υπήρχαν διαθέσιμες τιμές) καθώς και του ΣPCBs. Στην **Εικόνα 13** αποτυπώνεται η αντίστοιχη σύγκριση για τα βαρέα μέταλλα. Τόσο από τον **Πίνακα 10** και **Πίνακα 11** όσο και από την **Εικόνα 12** είναι σαφές ότι τα επίπεδα των PAHs και των PCBs στην περιοχή μελέτης είναι εν γένει τάξεις μεγέθους χαμηλότερα από τα προειδοποιητικά όρια πιθανού κινδύνου για τη δημόσια υγεία όταν η χρήση γης στην περιοχή αφορά οικιστική δραστηριότητα. Μόνο το δείγμα S4 πλησιάζει το αυστηρότερο όριο για το σύνολο των PAHs (ΣPAHs), παραμένοντας όμως χαμηλότερο από αυτό. Σύμφωνα με αυτή τη διαπίστωση, ακόμη και το αυστηρότερο νομοθετικό πλαίσιο σε Ευρωπαϊκή χώρα δεν θα επέβαλε τη λήψη μέτρων εξυγίανσης του εδάφους σε κανένα σημείο της περιοχής περί τη μονάδα διαχείρισης ανακυκλώσιμων υλικών καθώς δεν διαφαίνεται κίνδυνος για την υγεία των κατοίκων.

Ωστόσο, η εικόνα σχετικά με τα βαρέα μέταλλα είναι πιο σύνθετη (**Εικόνα 13**). Ενώ για τα Mo, Se και V οι συγκεντρώσεις σε όλα τα δείγματα είναι σημαντικά χαμηλότερες από όλα τις διαθέσιμες προειδοποιητικές SSVs, για βαρέα μέταλλα όπως τα As, Cr, Pb, Ni, Co, Cu, Zn παρατηρούνται υπερβάσεις που αφορούν και λιγότερο αυστηρές SSVs, άλλοτε σημειακές (Pb, Cu, Zn, Co) και άλλοτε σε μεγαλύτερο αριθμό σημείων (As, Cr, Ni). Στις περισσότερες περιπτώσεις οι υπερβάσεις αφορούν τα σημεία S4 και S10 και μπορούν να αποδοθούν την πυρκαγιά, καθώς το σημείο S10 βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τη μονάδα και δεν μπορεί να συσχετισθεί με την κανονική λειτουργία της. Η υπέρβαση στο απομακρυσμένο δείγμα S9 είναι συνέπεια της γεωλογικής προέλευσης του εδάφους. Τα τοξικά μέταλλα Cd και Hg υπερβαίνουν μόλις την αυστηρότερη SSV παραμένοντας σημαντικά χαμηλότερα από το σύνολο των υπολοίπων προειδοποιητικών

τιμών, και ενώ η υπέρβαση για το Cd μπορεί να συσχετισθεί με τη μονάδα, ο εμπλουτισμός του Hg σε ένα μόνο δείγμα σε απόσταση από αυτή πιθανόν να οφείλεται σε άλλα αίτια.

**Πίνακας 10.** Προειδοποιητικές τιμές SSV για οργανικούς ρύπους (mg/kg ξηρού εδάφους)

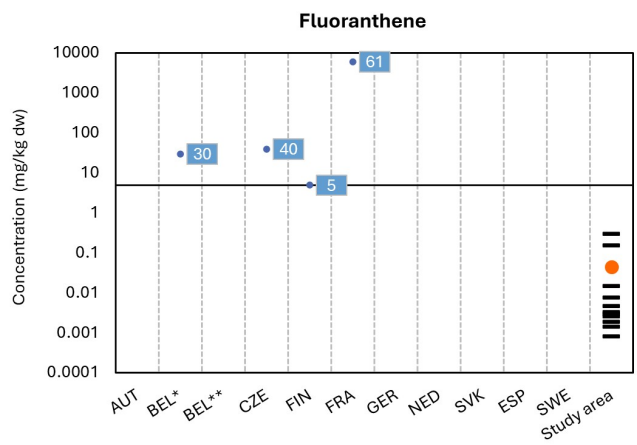
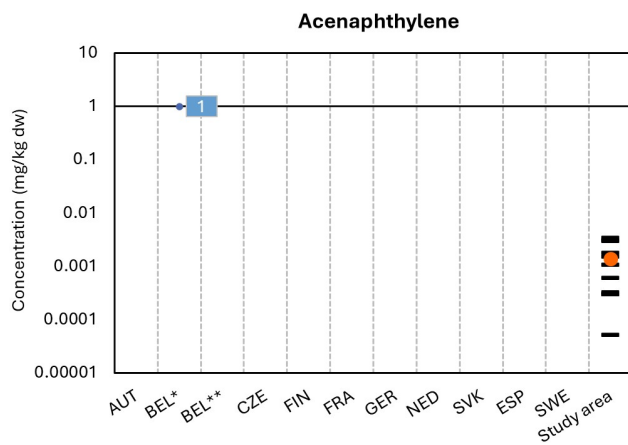
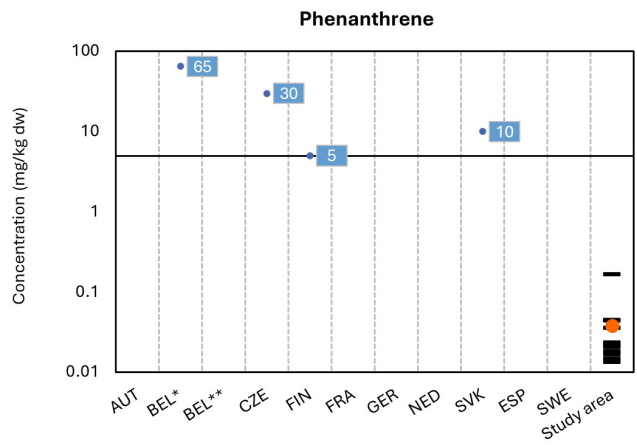
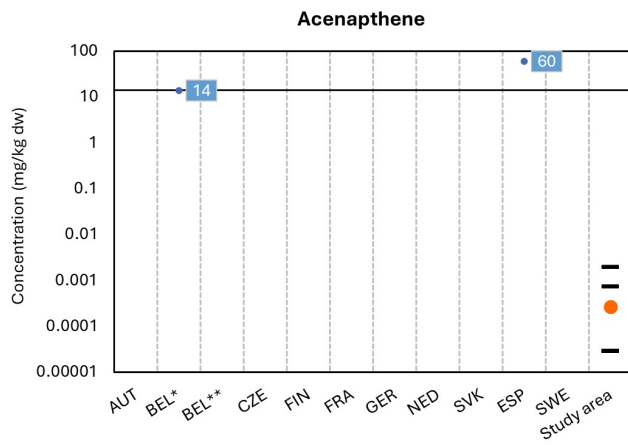
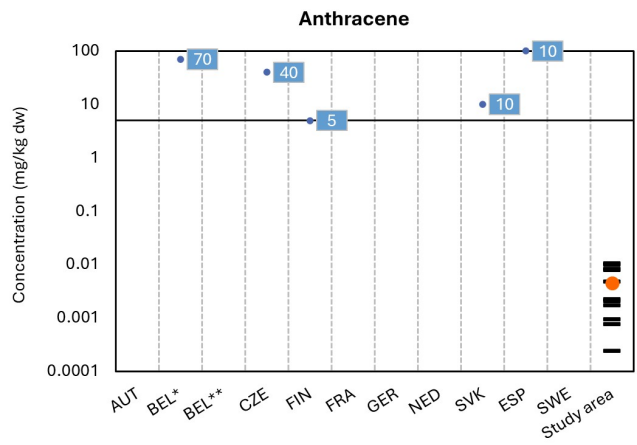
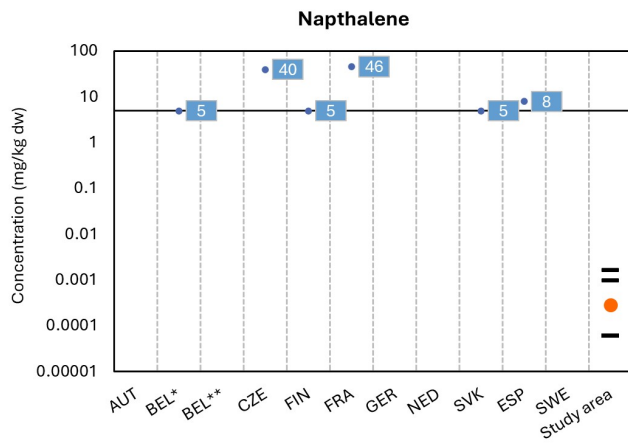
	AUT	BEL*	BEL**	CZE	FIN	FRA	GER	NED	SVK	ESP	SWE
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)											
Naphthalene		5		40	5	46			5	8	
Anthracene		70		40	5				10	100	
Acenaphthene		14								60	
Acenaphthylene		1									
Phenanthrene		65		30	5				10		
Fluoranthene		30		40	5	6100					
Pyrene		395		40						60	
Benzo(a)anthracene		10.5	5	4	5	13.9			5	2	
Chrysene		180		25		10350			5	100	
Benzo(a)pyrene	0.5	1.5	1	1.5	2	7	4		1	0.2	
Benzo(k)fluoranthene		11.5	13			900					
Benzo(g,h,i)perylene		3920	15	20					10		
Indeno(1,2,3-cd)		20				16.1					
ΣPAHs(total)	1			190	15			6.8	20	47	7
PCBs (total)	0.2	0.9		2.5	0.1		0.8	0.04	1	0.08	4

AUT: Αυστρία, BEL\*: Βέλγιο, Βρυξέλλες και Φλάνδρα, BEL\*\*: Βέλγιο, Βαλλωνία, CZE: Τσεχία, FIN: Φινλανδία, FRA: Γαλλία, GER: Γερμανία, NED: Ολλανδία, SVK: Σλοβακία, ESP: Ισπανία, SWE: Σουηδία

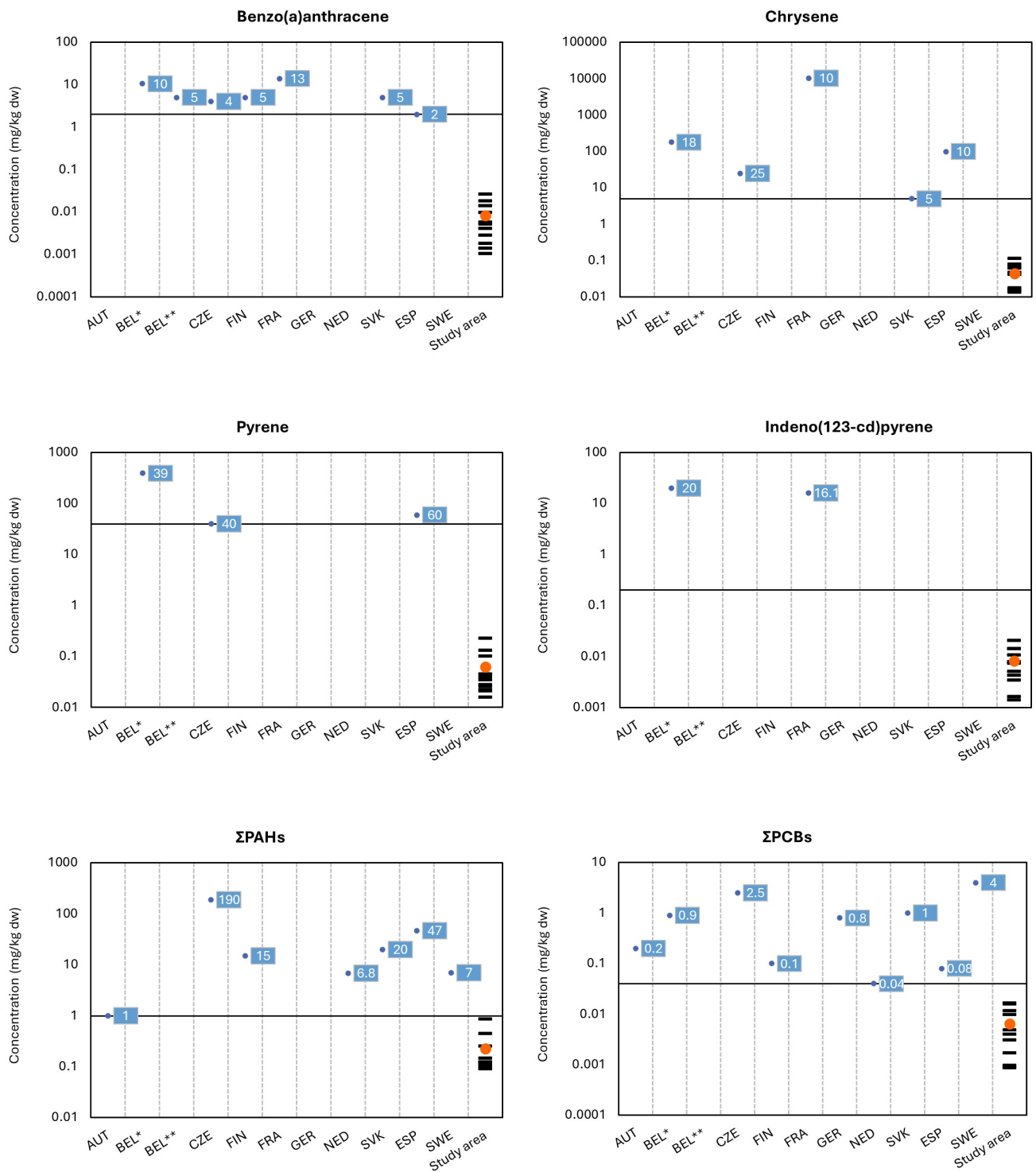
**Πίνακας 11.** Προειδοποιητικές τιμές SSV για βαρέα μέταλλα (mg/kg ξηρού εδάφους)

	AUT	BEL*	BEL**:	CZE	DNK	FIN	FRA	GER	SVK	SWE	GBR
As	20	110	40	65	20	5	37	50	30	15	32
Cd	2	6	3	10	0.5	1	20	20	5	1	10
Co				180		20			50	200	
Cr	50		125	450	500	100	130	400	250	250	130
Cu	100	400	110	500	500	100	190		100		
Hg	2	15	9	2.5	1	0.5	7	20	2	5	10
Pb	100	700	195	250	40	60	400	400	150	300	450
Mo				50	5				40		
Ni	70	470	150	180	30	50	140	140	100	150	130
Se									5		
V				340		100			200	200	
Zn		1000	230	1500	500	200	9000		500	700	

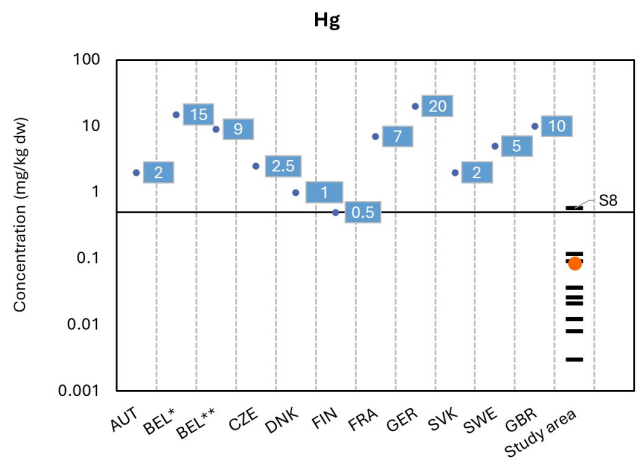
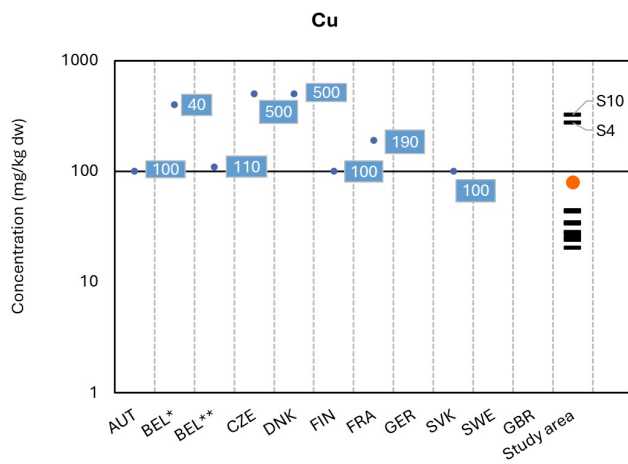
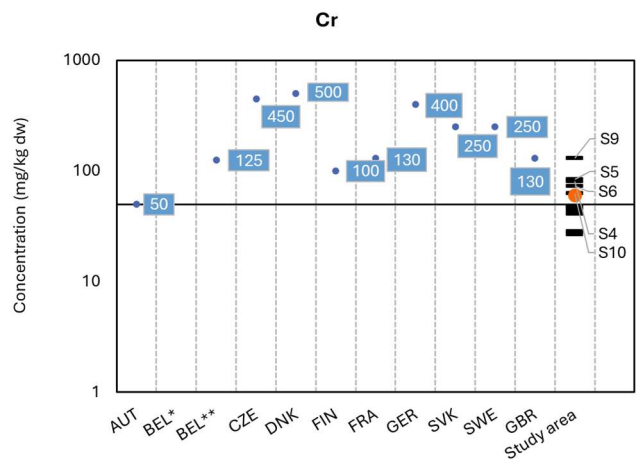
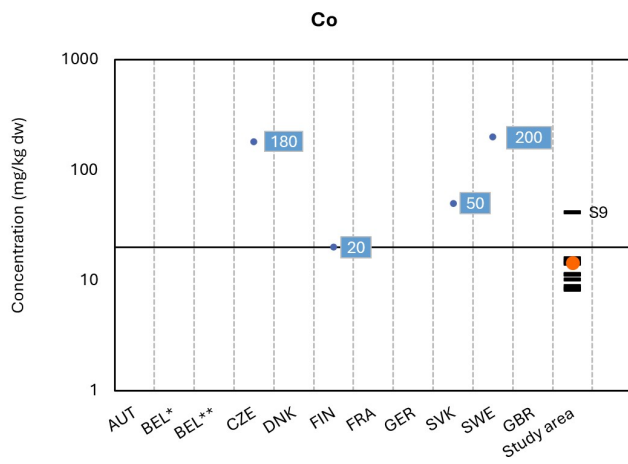
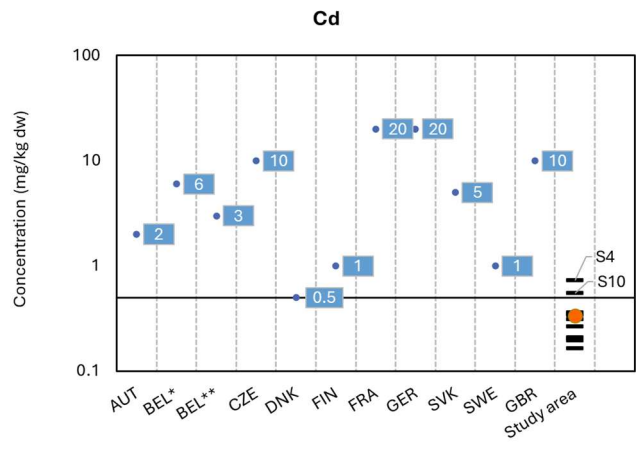
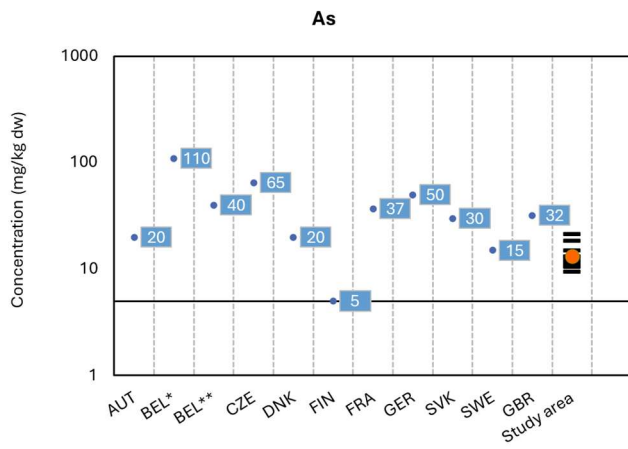
AUT: Αυστρία, BEL\*: Βέλγιο, Βρυξέλλες και Φλάνδρα, BEL\*\*.: Βέλγιο, Βαλλωνία, CZE: Τσεχία, DNK: Δανία, FIN: Φινλανδία, FRA: Γαλλία, GER: Γερμανία, SVK: Σλοβακία, ESP: Ισπανία, SWE: Σουηδία, GBR: Ηνωμένο Βασίλειο



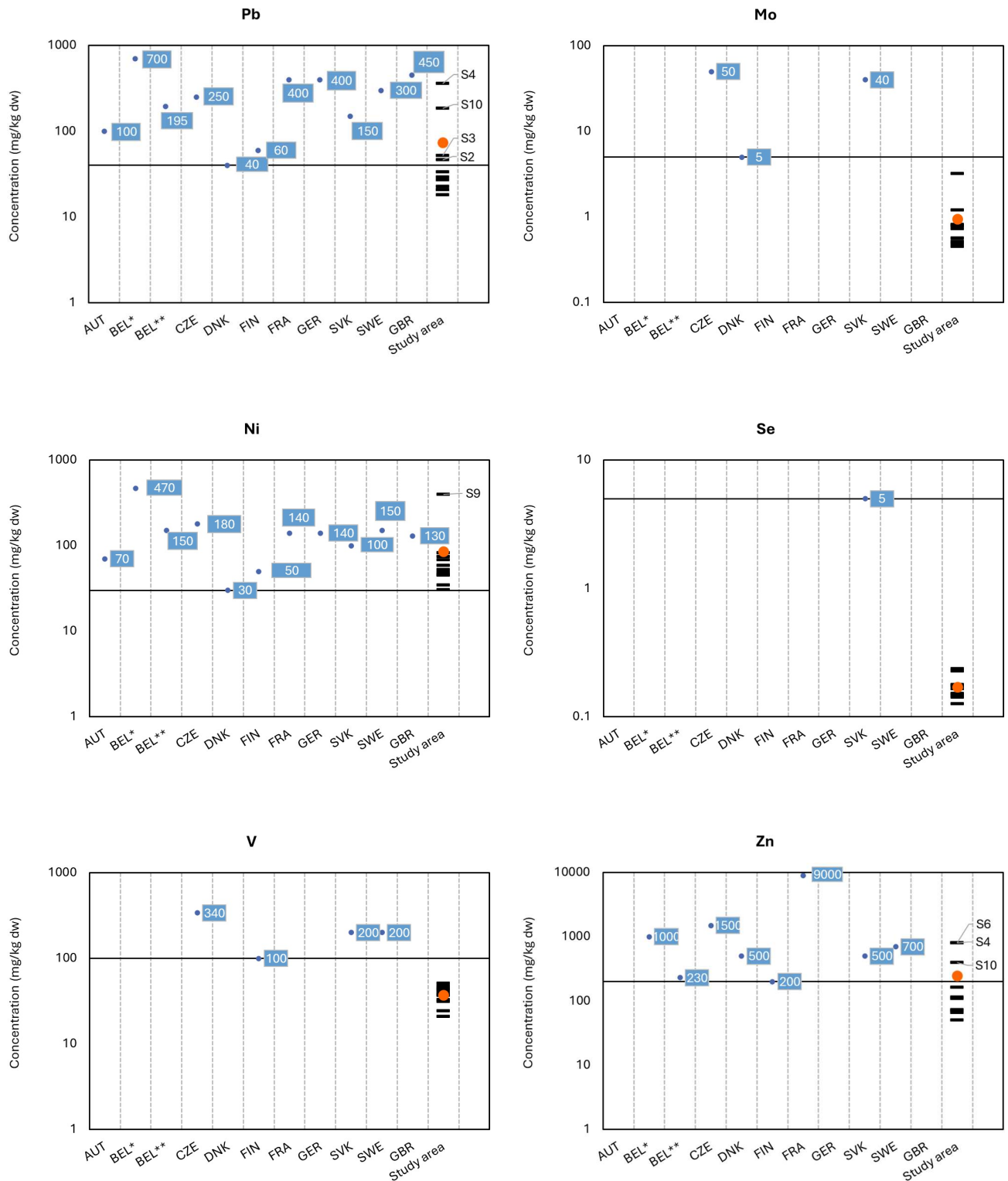
Εικόνα 12. (συνεχίζεται)



**Εικόνα 12.** Προειδοποιητικές τιμές SSV σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και μετρημένες συγκεντρώσεις PAHs και PCBs στην περιοχή μελέτης (οι μαύρες γραμμές δείχνουν τη συγκέντρωση σε κάθε σημείο δειγματοληψίας και ο πορτοκαλί κύκλος το μέσο όρο τους). Ο άξονας της συγκέντρωσης είναι σε λογαριθμική κλίμακα σε όλα τα γραφήματα. Όλες οι τιμές σε mg/kg ξηρού εδάφους.



Εικόνα 13 (συνεχίζεται)



**Εικόνα 13.** Προειδοποιητικές τιμές SSV σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και μετρημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην περιοχή μελέτης (οι μαύρες γραμμές δείχνουν τη συγκέντρωση σε κάθε σημείο δειγματοληψίας και ο πορτοκαλί κύκλος το μέσο όρο τους). Ο άξονας της συγκέντρωσης είναι σε λογαριθμική κλίμακα σε όλα τα γραφήματα. Όλες οι τιμές σε mg/kg ξηρού εδάφους.

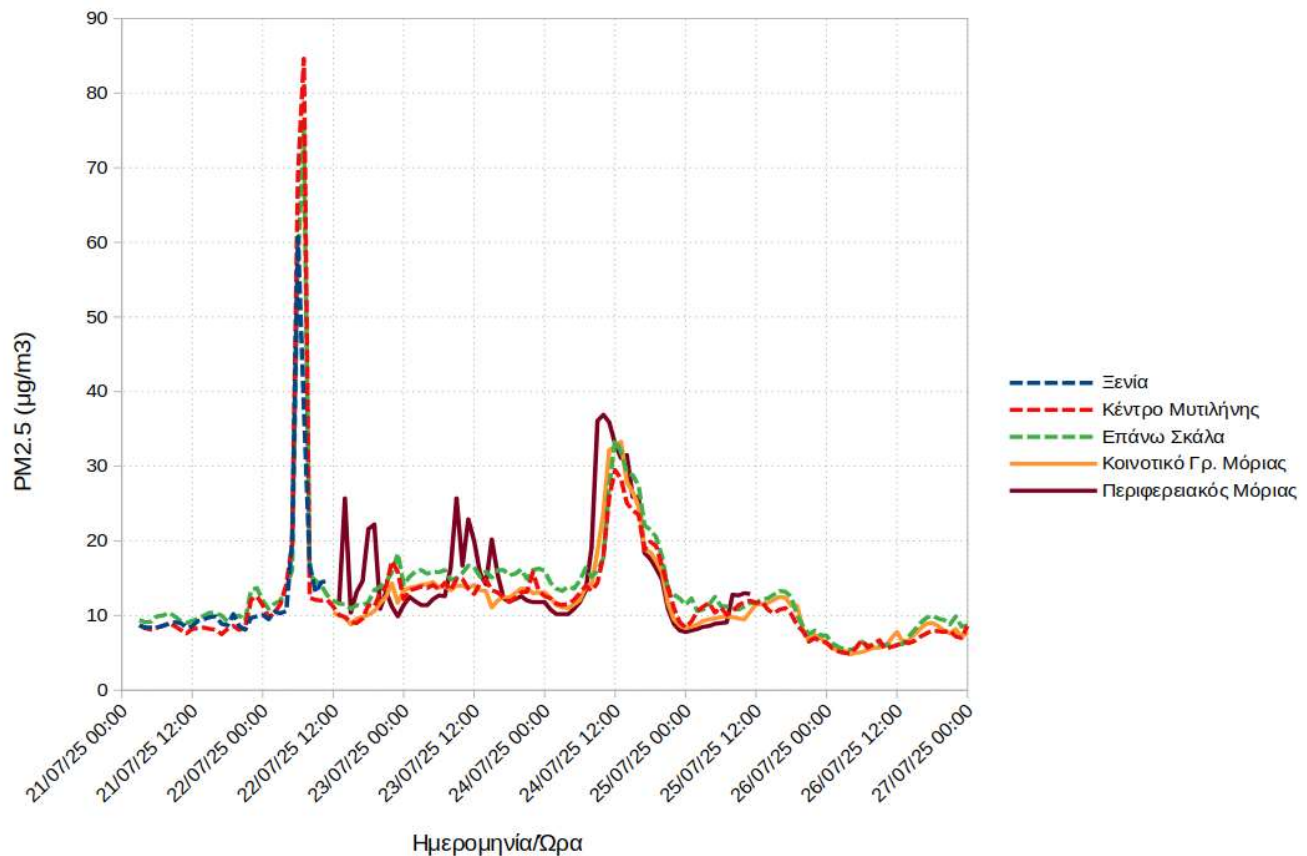
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα νομοθετικά πλαίσια που ισχύουν σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες προβλέπουν ότι η υπέρβαση των προειδοποιητικών τιμών SSV αποτελεί παράγοντα ενεργοποίησης για την κατάσταση σχεδίου εκτίμησης κινδύνου ειδικά προσαρμοσμένη σε μια συγκεκριμένη περιοχή (site-specific risk assessment). Λαμβάνοντας υπόψη τις υπερβάσεις των αντίστοιχων τιμών για μια σειρά βαρέων μετάλλων, όπως περιγράφονται παραπάνω, η συστηματική παρακολούθηση των συγκεντρώσεων τους μια φορά το χρόνο σε έδαφος και υπόγεια νερά στην περιοχή πέριξ των εγκαταστάσεων της μονάδας θα μπορέσει να επιτρέψει την εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων, τόσο από την κανονική λειτουργία της όσο και από την πρόσφατη πυρκαγιά ή ενδεχόμενο άλλο ατύχημα διαρροών ρύπων στο μέλλον.

### 3.4 Μετρήσεις ατμοσφαιρικών σωματιδίων

Σε ό,τι αφορά στα αποτελέσματα των μετρήσεων ατμοσφαιρικών σωματιδίων, επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις που είναι διαθέσιμες και παρουσιάζονται στη συνέχεια υποεκτιμούν τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς καθώς δεν υπήρχαν εγκατεστημένοι σταθμοί μέτρησης στη μονάδα ανακύκλωσης και στους κοντινούς οικισμούς.

Κατά τη διάρκεια του συμβάντος της πυρκαγιάς καθώς και τις επόμενες ώρες ήταν εγκατεστημένα στην πόλη της Μυτιλήνης (Επάνω Σκάλα, Κέντρο, Ξενία) 3 όργανα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>. Αυτά κατέγραψαν στις 06:00 και στις 07:00 το πρωί της 22ας Ιουλίου ιδιαίτερα υψηλές μέσες ωριαίες τιμές συγκέντρωσης (έως και 84.6 μg/m<sup>3</sup>). Στη συνέχεια, οι τιμές έπεσαν με αποτέλεσμα η μέση τιμή της 22ας Ιουλίου να είναι κοντά στα 20 μg/m<sup>3</sup>.

Στο παρακάτω διάγραμμα (**Εικόνα 14**) απεικονίζεται με διακεκομμένες γραμμές η εξέλιξη της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> στους σταθμούς της Μυτιλήνης. Συγκεκριμένα, με μπλε διακεκομμένη στο κτήριο Ξενία (Τμήμα Περιβάλλοντος), με κόκκινη διακεκομμένη στο κέντρο της πόλης, και με πράσινη διακεκομμένη στην Επάνω Σκάλα. Η τιμή υποβάθρου πριν την πυρκαγιά ήταν ~11 μg/m<sup>3</sup>, οι μέγιστες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν στο Ξενία στις 06:00 της 22ας Ιουλίου στα 60.7 μg/m<sup>3</sup>, στο κέντρο στις 07:00 στα 84.6 μg/m<sup>3</sup>, στην Επάνω Σκάλα στις 07:00 στα 75.2 μg/m<sup>3</sup>, ενώ μετά υπήρξε αποκλιμάκωση. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3, στις 10:00 της 22ας Ιουλίου το όργανο του Ξενία αποσυνδέθηκε και μεταφέρθηκε στη Μόρια, όπου και εγκαταστάθηκε μαζί με ένα αντίστοιχο όργανο στον Περιφερειακό Δρόμο Μόριας και στο Κοινοτικό Γραφείο της Μόριας (Εικόνα 13). Η εξέλιξη των συγκεντρώσεων σε αυτά τα σημεία απεικονίζεται με τις καφέ και πορτοκαλί συνεχείς γραμμές, αντίστοιχα.



**Εικόνα 14.** Μετρήσεις σωματιδίων PM2.5 στο Κτίριο Ξενία (Τμήμα Περιβάλλοντος), στο κέντρο της Μυτιλήνης, στην Επάνω Σκάλα, στο Κοινοτικό Γραφείο Μόριας και στον Περιφερειακό Δρόμο Μόριας για το διάστημα 21.7.2025 (10:00) έως και 27.7.2025 (00:00)

Σύμφωνα με την **Εικόνα 14** στο σημείο Περιφερειακός Δρόμος Μόριας μετρήθηκαν τιμές σωματιδίων PM2.5 μεταξύ 10 και 26 µg/m<sup>3</sup> μεταξύ 12:00 της 22ας Ιουλίου και 12:00 της 23<sup>ης</sup> Ιουλίου. Την 24η Ιουλίου, τα καιόμενα υλικά απλώθηκαν και καταβράχηκαν ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα αναζωπύρωσης. Αυτό πιθανότατα συνετέλεσε στην εκ νέου παραγωγή καπνού και τις παροδικά αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM2.5 την ίδια ημέρα και στα δύο σημεία της Μόριας όπου είχαν τοποθετηθεί τα όργανα μέτρησης. Από το βράδυ της 24ης Ιουλίου οι συγκεντρώσεις επανήλθαν στα ίδια επίπεδα με πριν την πυρκαγιά.

Θα πρέπει να αναφερθεί πως η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει όριο για τη μέση ετήσια συγκέντρωση PM2.5 στα 20 µg/m<sup>3</sup> ενώ δεν υπάρχει όριο για 24-ωρες μέσες τιμές ή για ωριαίες μέσες τιμές. Επιπλέον, στη νέα Οδηγία 2024/2881 της 23.10.2024 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, αναφέρονται όρια ενημέρωσης του κοινού και συναγερμού για την αέρια ρύπανση, τα οποία αντιστοιχούν σε ημερήσια βάση, επί τρεις συνεχείς ημέρες. Στην περίπτωση των PM2.5, τα όρια συναγερμού και ενημέρωσης ταυτίζονται και ανέρχονται σε 50 µg/m<sup>3</sup>.

Κανένας 24ωρος μέσος όρος δεν ξεπέρασε τα όρια συναγερμού και ενημέρωσης των 50 µg/m<sup>3</sup>. Συγκεκριμένα, οι 24ωροι μέσοι όροι για τις 3 θέσεις δίνονται στον παρακάτω πίνακα, σε µg/m<sup>3</sup>.

**Πίνακας 12.** Μέσοι όροι συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών σωματιδίων PM2.5 (μg/m<sup>3</sup>) στις θέσεις δειγματοληψίας

Ημερομηνία	Ξενία	Κέντρο Μυτιλήνης	Επάνω Σκάλα	Κοινοτικό Γραφείο Μόριας	Περιφερειακός Δρόμος Μόριας
20.7.2025	8.6	8.2	9.3	-	-
21.07.2025	9.0	8.7	10.0	-	-
22.07.2025	19.0	17.5	17.6	10.8	15.0
23.07.2025		13.6	15.7	13.4	14.5
24.07.2025		17.0	19.3	17.9	19.2
25.07.2025		10.1	11.1	9.8	10.0

## 4. Συμπεράσματα και προτάσεις

- Σε σύγκριση με τα επίπεδα σε περιοχές ανά τον κόσμο, το σύνολο (άθροισμα) των συγκεντρώσεων των PAHs στην περιοχή μελέτης δεν υποδηλώνει σοβαρή περιβαλλοντική επιβάρυνση. Στα σημεία S4, στη βόρεια παρυφή της μονάδας ανακύκλωσης και S10, στον οικισμό της Μόριας (σε απόσταση από τη μονάδα) σημειώθηκαν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του αθροίσματος των PAHs.
- Σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν, οι υψηλού μοριακού βάρους PAHs κυριαρχούν έναντι των χαμηλού μοριακού βάρους, σε ποσοστά από 66% έως 89%, φανερώνοντας την επίδραση των εκπομπών της καύσης οργανικών υλικών σε όλη την περιοχή μελέτης.
- Παρά την επικράτηση των υψηλού μοριακού βάρους PAHs σε όλη την περιοχή μελέτης, η εφαρμογή διαγνωστικών κριτηρίων (λόγων συγκεντρώσεων) αναγνωρίζει τη συνεισφορά και των πετρογενών PAHs στη διαμόρφωση των συνολικών συγκεντρώσεων. Η μικτή προέλευση των PAHs στα εδάφη γύρω από τη μονάδα ανακύκλωσης πιθανόν αποτυπώνει την μακροχρόνια απόθεση πετρογενών PAHs που προέρχονται από την κυκλοφορία των οχημάτων, επί των οποίων προστέθηκαν πυρογενείς ενώσεις από την πρόσφατη πυρκαγιά.
- Στο δείγμα των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων ανιχνεύθηκαν PAHs χαμηλού μοριακού βάρους, με 2 -3 δακτυλίους. Η σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων αποτυπώνει την πρόσφατη εκπομπή PAHs, ως αποτέλεσμα της πυρκαγιάς στη μονάδα διαχείρισης, και υποστηρίζει την υπόθεση ότι οι συγκεντρώσεις στα εδάφη της περιοχής έχουν διαμορφωθεί όχι μόνο από την ατμοσφαιρική μεταφορά και απόθεση παραγώγων της καύσης από το πρόσφατο συμβάν, αλλά και από τη συσσώρευση από τις μακροχρόνιες εκπομπές από διάφορες πηγές, όπως και από τις διεργασίες που απομακρύνουν ή μετασχηματίζουν τις ενώσεις κατά την παραμονή τους στο έδαφος.
- Το άθροισμα των συγκεντρώσεων των 7 PCBs (ΣPCBs) που μετρήθηκαν στο έδαφος στην περιοχή μελέτης αντιστοιχεί σε τιμές από περιοχές με μέτρια ή χαμηλά επίπεδα ρύπανσης, ενώ απέχει κατά μια τάξη μεγέθους από σοβαρά ρυπασμένες βιομηχανικές ή αστικές περιοχές.
- Κοντά στην μονάδα ανιχνεύονται PCBs με μεγαλύτερο μοριακό βάρος, ενώ ελαφρύτερα συγγενή κατανέμονται σε μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης. Η σχετικά ομοιογενής σύσταση συγγενών με διαφορετικό αριθμό ατόμων χλωρίου, στα σημεία S1-S3 κοντά τις εγκαταστάσεις είναι χαρακτηριστική βιομηχανικών περιοχών και μπορεί να υποδηλώνει διαρροές κατά τη λειτουργία της μονάδας, πριν από την πυρκαγιά. Από την άλλη μεριά, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του χαμηλού μοριακού βάρους PCB 28 στα σημεία S1-S5 κοντά στη μονάδα αλλά και S10, στη Μόρια, πιθανότατα δηλώνει την ταχεία μεταφορά και απόθεση του μετά την πυρκαγιά, μαζί με άλλους ρύπους που σχετίζονται με αυτή την πηγή.
- Η σύγκριση των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς με προηγούμενες τιμές από την περίοδο της κανονικής της λειτουργίας δείχνει ότι η πυρκαγιά δεν φαίνεται να έχει οδηγήσει σε πρόδηλη αύξηση των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στο έδαφος κοντά στη μονάδα. Περιορισμένη επιβάρυνση από Cd, Cu, Pb, Ba, Mo και Zn καταγράφεται στα σημεία S4 και S10, όπως και για τους οργανικούς ρύπους, γεγονός που επιτρέπει τη συσχέτιση της εκπομπής των μετάλλων αυτών με την πυρκαγιά.

- Τα επίπεδα των PAHs και των PCBs στην περιοχή μελέτης είναι εν γένει τάξεις μεγέθους χαμηλότερα ακόμα και από τις αυστηρότερες προειδοποιητικές τιμές πιθανού κινδύνου για τη δημόσια υγεία που θέτει η διεθνής νομοθεσία, όταν η χρήση γης στην περιοχή αφορά οικιστική δραστηριότητα. Για τα βαρέα μέταλλα As, Cr, Pb, Ni, Co, Cu, Zn παρατηρούνται σημειακές υπερβάσεις που αφορούν και λιγότερο αυστηρές προειδοποιητικές τιμές. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι υπερβάσεις αφορούν τα σημεία S4 και S10. Σύμφωνα με το διεθνές περιβαλλοντικό δίκαιο, οι υπερβάσεις αυτές υποδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης των πιθανών επιπτώσεων της πυρκαγιάς αλλά και της κανονικής λειτουργίας της μονάδας (βλ. παρακάτω).
- Οι μετρήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης που παρουσιάζονται στην παρούσα έκθεση υποεκτιμούν τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς καθώς εκείνη την χρονική περίοδο δεν υπήρχαν εγκατεστημένοι σταθμοί μέτρησης στη μονάδα ανακύκλωσης και στους κοντινούς οικισμούς της Μόριας και της Παναγιούδας. Οι μετρήσεις από σταθμούς της πόλης δείχνουν σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων τις πρωινές ώρες μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Με τα διαθέσιμα δεδομένα, σε κανέναν όμως σταθμό δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση των ημερήσιων ορίων ενημέρωσης του κοινού και συναγερμού για την αέρια ρύπανση όπως ορίζονται από την ευρωπαϊκή νομοθεσία.
- Για την έγκαιρη ενημέρωση των κατοίκων σε παρόμοια μελλοντικά περιστατικά και για τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας προτείνεται η εγκατάσταση σταθμών μέτρησης αιωρούμενων ατμοσφαιρικών σωματιδίων εντός του χώρου της εταιρείας, στους παρακείμενους οικισμούς Μόριας, Παναγιούδας, Αφάλωνα και στην Κλειστή Ελεγχόμενη Δομή (Κ.Ε.Δ.) Λέσβου. Καθώς σήμερα οι πλησιέστεροι σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικών σωματιδίων βρίσκονται στην πόλη της Μυτιλήνης, ενώ παράλληλα οι Μονάδες Ανακύκλωσης θεωρούνται χώροι υψηλού κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιών, η υφιστάμενη υποδομή παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κρίνεται ανεπαρκής.
- Επίσης, για την εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων, τόσο από την κανονική λειτουργία της όσο και από την πρόσφατη πυρκαγιά ή ενδεχόμενο άλλο ατύχημα διαρροών ρύπων στο μέλλον, προτείνεται η συστηματική παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων σε έδαφος και υπόγεια νερά, σε επιλεγμένο δίκτυο σταθμών δειγματοληψίας, με ετήσια συχνότητα.
- Προτείνεται επίσης η ανάπτυξη από την Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας της Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου ενός πρωτοκόλλου παρακολούθησης της περιβαλλοντικής ποιότητας το οποίο θα μπορεί να εφαρμόζεται άμεσα μετά την εκδήλωση παρόμοιων περιστατικών πυρκαγιάς σε χώρους διαχείρισης απορριμμάτων και ανακυκλώσιμων υλικών.

## 5. Βιβλιογραφία

- [1] J. Øygaard, A. Måge, E. Gjengedal & T. Svane, «Effect of an uncontrolled fire and the subsequent fire fight on the chemical composition of landfill leachate» *Waste Manag*, 25, 712–718, 2005.
- [2] S. Moqbel, «Characterizing Spontaneous Fires in Landfills» 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://stars.library.ucf.edu/etd/3855>. [Πρόσβαση 7.11.2025].
- [3] P. Ruokojärvi, J. Ruuskanen, M. Ettala, P. Rahkonen & J. Tarhanen, «Formation of polyaromatic hydrocarbons and polychlorinated organic compounds in municipal waste landfill fires» *Chemosphere*, 31, 3899–3908, 1995.
- [4] J. Białowicz, W. Rogula-Kozłowska, A. Krasuski & Z. Salamonowicz, «The critical factors of landfill fire impact on air quality» *Environ. Res. Lett.*, 16, 104026, 2021.
- [5] B. Šedová, «On causes of illegal waste dumping in Slovakia» *J. Environ. Plan. Manag.*, 59, 1277–1303, 2016.
- [6] D. Dabrowska, W. Rykala & V. Nourani, «Causes, types and consequences of municipal waste landfill fires—Literature review» *Sustainability*, 15, 5713, 2023.
- [7] I. Vassiliadou, A. Papadopoulos, D. Costopoulou, S. Vasiliadou, S. Christoforou & L. Leondiadis, «Dioxin contamination after an accidental fire in the municipal landfill of Tagarades, Thessaloniki, Greece» *Chemosphere*, 74, 879–884, 2009.
- [8] S. Morales, A. Toro, L. Morales & G. Leiva, «Landfill fire and airborne aerosols in a large city: Lessons learned and future needs» *Air Qual. Atmos. Health*, 11, 111–121, 2018.
- [9] E. Raudonytė-Svirbutavičienė, R. Stakėnienė, K. Jokšas, D. Valiulis, S. Byčėnkienė & A. Žarkov, «Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in soil following a large tire fire incident: A case study» *Chemosphere*, 286, 131556, 2022.
- [10] J. Białowicz, «Waste fires in Poland and some of Their Environmental Implications—A Ten-Year Perspective» *J. Ecol. Eng.*, 23, 147–157, 2022.
- [11] W.-Y. Juan, C.-L. Wu, F.-W. Liu & W.-S. Chen, «Fires in Waste Treatment Facilities: Challenges and Solutions from a Fire Investigation Perspective» *Sustainability*, 15, 9756, 2023.
- [12] P. Lemieux, C. Lutesb & D. Santoianni, «Emissions of organic air toxics from open burning: A comprehensive review» *Prog. Energy Combust. Sci.*, 30, 1–32, 2004.
- [13] P. White, «The genotoxicity of priority polycyclic aromatic hydrocarbons in complex mixtures» *Mutat. Res.—Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.*, 515, 85–98, 2002.
- [14] W. Rykala, M. Fabiańska & D. Dąbrowska, «The Influence of a Fire at an Illegal Landfill in Southern Poland on the Formation of Toxic Compounds and Their Impact on the Natural Environment» *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 13613, 2022.

- [15] M. Fayad, W. Alani, H. Dhahad & J. Zheng, «Diminution of air pollution from NOX and smoke/soot emitted from alcohols/diesel blends in diesel engine and influence of the exhaust gas recirculation (EGR)» *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.*, 31, 103–112, 2023.
- [16] H. Dhahad & M. Fayad, «Role of Different Antioxidants Additions to Renewable Fuels on NOX Emissions Reduction and Smoke Number in Direct Injection Diesel Engine» *Fuel*, 279, 118384, 2020.
- [17] R. Oleniacz, T. Gorzelnik & K. Grzesik, «Transboundary air pollution caused by waste fires in Poland. In Proceedings of the» *σε XIIIth International Scientific Conference Air Protection in Theory and Practice*, Zakopane, Poland, 18–21 October 2022.
- [18] H. Dhahad, M. Fayad, M. Chaichan, A. Abdulhady Jaber & T. Megaritis, «Influence of Fuel Injection Timing Strategies on Performance, Combustion, Emissions and Particulate Matter Characteristics Fueled with Rapeseed Methyl Ester in Modern Diesel Engine» *Fuel*, 306, 121589, 2021.
- [19] M. Molina & L. Molina, «Megacities and Atmospheric Pollution» *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 54, 644–680, 2004.
- [20] J. Samet & Y. Chung, «Air Quality, Atmosphere, and Health» *Air Qual. Atmos. Health*, 1, 1–2, 2008.
- [21] K. Martin, I. Hanigan, G. Morgan, S. Henderson & F. Johnston, «Air Pollution from Bushfires and Their Association with Hospital Admissions in Sydney, Newcastle and Wollongong, Australia 1994–2007» *Aust. N. Z. J. Public Health*, 37, 238–243, 2013.
- [22] P. Roy & A. Sardar, «SO<sub>2</sub> emission control and finding a way out to produce sulphuric acid from industrial SO<sub>2</sub> emission» *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 6, 1000230, 2015.
- [23] O. Adetona, O. Ozoh, T. Oluseyi, Q. Uzoegwu, J. Odei & M. Lucas, «An exploratory evaluation of the potential pulmonary, neurological and other health effects of chronic exposure to emissions from municipal solid waste fires at a large dumpsite in Olusosun, Lagos, Nigeria» *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, 30885–30892, 2020.
- [24] J. Kodros, C. Wiedinmyer, B. Ford, R. Cucinotta, R. Gan, S. Magzamen & J. Pierce, «Global burden of mortalities due to chronic exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> from open combustion of domestic waste» *Environ. Res. Lett.*, 11, 124022, 2016.
- [25] P. Maciejczyk, L.-C. Chen & G. Thurston, «The Role of Fossil Fuel Combustion Metals in PM<sub>2.5</sub> Air Pollution Health Associations» *Atmosphere*, 12, 1086, 2021.
- [26] L. Jia, P. Cheng, Y. Yu, S. Chen, C. Wang, L. He, H. Nie, J. Wang, J. Zhang, B. Fan et al., «Regeneration Mechanism of a Novel High-Performance Biochar Mercury Adsorbent Directionally Modified by Multimetal Multilayer Loading» *J. Environ. Manag.*, 326, 116790, 2023.
- [27] M. A. Ashraf, M. Maah & I. Yusoff, «Soil Contamination, Risk Assessment and Remediation» in Hernandez-Soriano M. C. (Ed.) *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, 2014.

- [28] C. Moeckel, K. Breivik, T. Nøst, A. Sankoh, K. Jones & A. Sweetman, «Soil Pollution at a Major West African E-Waste Recycling Site: Contamination Pathways and Implications for Potential Mitigation Strategies» *Environ. Int.*, 137, 105563, 2020.
- [29] E. Kim, J. Oh & Y. Chang, «Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAHs in soil» *Sci. Total Environ.*, 311, 177–189, 2003.
- [30] M. Bundt, M. Krauss, P. Blaser & W. Wilcke, «Forest fertilization with wood ash: Effect on the distribution and storage of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs)» *J. Environ. Qual.*, 30, 1296–1304, 2001.
- [31] A. Perčin, H. Hefer, Ž. Zgorelec, M. Galić, D. Rašić & I. Kisić, «Evaluation of Agricultural Soil Quality and Associated Human Health Risks Following Plastic Fire Incidents: Insights from a Case Study» *Land*, 14, 2137, 2025.
- [32] K. Parris, «Impact of Agriculture on Water Pollution in OECD Countries: Recent Trends and Future Prospects» *Int. J. Water Resour. Dev.*, 27, 33–52, 2011.
- [33] F. Masi, A. Rizzo & M. Regelsberger, «The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm» *J. Environ. Manag.*, 216, 275–284, 2017.
- [34] J. Hawley, «Assessment of Health Risk from Exposure to Contaminated Soil. Risk Analysis» 5, 289-302, 1985.
- [35] Department of Environment and Conservation (Western Australia), «Assessment Levels for Soil, Sediment and Water, Version 4, revision 1» Contaminated Sites Management Series, 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://library.dbca.wa.gov.au/FullTextFiles/070909.pdf>. [Πρόσβαση 7.11.2025].
- [36] Y. Wang, K. Cheng, W. Wu, H. Tian, P. Yi, G. Zhi, J. Fan & S. Liu, «Atmospheric Emissions of Typical Toxic Heavy Metals from Open Burning of Municipal Solid Waste in China» *Atmospheric Environment*, 152, 6–15, 2017.
- [37] USEPA, «Risk Assessment Guidance for Superfund Volume 1: Human Health Evaluation Manual - Part A (EPA/540/1-89/002)» 1989. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags\\_a.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags_a.pdf) [Πρόσβαση 7.11.2025].
- [38] European Commission, «Technical guidance document on risk assessment, Part I. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities» 2003. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC23785/EUR%2020418%20EN-1.pdf>. [Πρόσβαση 07.11.2025].
- [39] USEPA, «Soil Screening Guidance: Technical Background Document, 2nd edition» 1996. [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/100025LM.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995+Thru+1999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&>

QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=.  
[Πρόσβαση 07.11.2025].

[40] USEPA, «Child-Specific Exposure Factors Handbook» 2002. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/300025DV.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=.](https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/300025DV.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=)

[Πρόσβαση 07.11.2025].

[41] USEPA, «About Risk Assessment» 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.epa.gov/risk/about-risk-assessment>. [Πρόσβαση 07.11.2025].

[42] National Environment Protection Council (NEPC), «Schedule B3: Guideline on laboratory analysis of potentially contaminated soils. National Environment Protection (Assessment of Site Contamination) Measure» 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nepc.gov.au/sites/default/files/2022-09/schedule-b3-guideline-laboratory-analysis-potentially-contaminated-soils-sep10.pdf>. [Πρόσβαση 03.11.2025].

[43] (UK) Environment Agency, «Using Soil Guideline Values Better Regulation Science Programme Science report: SC050021/SGV» 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/297676/scho0309bpm-e-e.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/297676/scho0309bpm-e-e.pdf). [Πρόσβαση 07 11 2025].

[44] C. Carlton, «Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization. EUR 22805-EN» European Commission, Joint Research Centre, Ispra, 2007.

[45] European Communities, «Soil protection - The story behind the Strategy» 2006. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/soillight.pdf>. [Πρόσβαση ,7 11 2025].

[46] Council of the EU, «Council adopts new rules for healthier and more resilient European soils» 29 09 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils/>. [Πρόσβαση 07 11 2025].

[47] J. Provoost, C. Cornelis & F. Swartjes, «Comparison of Soil Clean-up Standards for Trace Elements Between Countries: Why do they differ?» *Journal of Soils and Sediments*, 6, 173 – 181, 2007.

[48] O. Tzoraki, E. Zkeri, M. Lasithiotakis & P. Sinioros, «Trace metals' contamination in water and soils in the vicinity of a small-medium waste electrical and electronic equipment recycling plant» *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 39, e13343, 2020.

[49] E. Stogiannidis & R. Laane, «Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: An overview of possibilities» in D. Whitacre (Ed.) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 234, Springer Cham, 2014, pp. 49–133.

- [50] S. Yang, D. Connell, D. Hawker & S. Kayal, «Polycyclic aromatic hydrocarbons in air, soil and vegetation in the vicinity of an urban roadway» *Science of the Total Environment*, 102, 229–240, 1991.
- [51] E. Morillo, A. Romero, L. Madrid, J. Villaverde & C. Maqueda, «Characterization and sources of PAHs and potentially toxic metals in urban environments of Sevilla (Southern Spain)» *Water Air Soil Pollut*, 187, 41–51, 2008.
- [52] M. Zakaria, H. Takada, S. Tsutsumi, K. Ohno, J. Yamada, E. Kound & H. Kumata, «Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rivers and estuaries in Malaysia: a widespread input of petrogenic PAHs» *Environ Sci Technol*, 36, 1907–1918, 2002.
- [53] M. Venkatesan, «Occurrence and possible sources of perylene in marine sediments—a review» *Mar Chem*, 25, 1–27, 1988.
- [54] S. Ou, J. Zheng, J. Zheng, B. Richardson & L. P.K.S., «Petroleum hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons in the surficial sediments of Xiamen Harbour and Yuan Dan Lake China» *Chemosphere*, 56, 107–112, 2004.
- [55] S. Mitra, T. Dellapenna & R. Dickhut, «Polycyclic aromatic hydrocarbon distribution within Lower Hudson River estuarine sediments: physical mixing vs sediment geochemistry» *Estuar Coast Shelf Sci*, 49, 311–326, 1999.
- [56] A. Gogou, I. Bouloubassi & E. Stephanou, «Marine organic geochemistry of the Eastern Mediterranean: 1. Aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in Cretan Sea surficial sediments» *Mar Chem*, 68, 265–282, 2000.
- [57] D. Page, P. Boehm, G. Douglas, A. Bence, W. Burns & P. Mankiewicz, «Pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments record past human activity: a case study in Prince William Sound, Alaska» *Mar Pollut Bull*, 38, 247–260, 1999.
- [58] R. Larsen & J. Baker, «Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods» *Environ Sci Technol*, 37, 1873–1881, 2003.
- [59] B. Simoneit, «Application of molecular marker analysis to vehicular exhaust for source reconciliations» *Int J Environ Anal Chem*, 22, 203–233, 1985.
- [60] L. Marr, T. Kirchstetter, R. Harley, A. Miguel, V. Sussane & K. Hammond, «Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in motor vehicle fuels and exhaust emissions» *Environ Sci Technol*, 33, 3091–3099, 1999.
- [61] E. Boll, J. Christensen & P. Holm, «Quantification and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment, soil, and water spinach from Hanoi, Vietnam» *J Environ Monit*, 10, 261–269, 2008.
- [62] A. Hoffer, B. Jancsek-Turóczi, Á. Tóth, G. Kiss, A. Naghiu, E. A. Levei, L. Marmureanu, A. Machon & A. Gelencsér, «Emission factors for PM<sub>10</sub> and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from illegal

burning of different types of municipal waste in households» *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 16135–16144, 2020.

- [63] B. Maliszewska-Kordybach, B. Smreczak, A. Klimkowicz-Pawlas & H. Terelak, «Monitoring of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in arable soils in Poland» *Chemosphere*, 73, 1284-1291, 2008.
- [64] W. Wang, S. Simonich, M. Xue, J. Zhao, N. Zhang, R. Wang, J. Cao & S. Tao, «Concentrations, sources and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils from Beijing, Tianjin and surrounding areas, North China» *Environmental Pollution*, 158, 1245-1251., 2010.
- [65] J. Ribeiro, T. Silva, J. Mendonça Filho & D. Flores, «Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in burning and non-burning coal waste piles» *Journal of Hazardous Materials*, 199-200, 105–110, 2012.
- [66] J. Farrington, N. Frew, P. Gschwend & B. Tripp, «Hydrocarbons in cores of Northwestern Atlantic coastal and continental margin sediments» *Estuar Coast Mar Sci*, 5, 793–808, 1977.
- [67] B. James, C. Reddy, M. Hahn, R. Nelson, A. de Vos, L. Aluwihare, T. Wade, A. Knap & G. Bera, «Fire and Oil Led to Complex Mixtures of PAHs on Burnt and Unburnt Plastic during the M/V X-Press Pearl Disaster» *ACS Environmental Au*, 3, 319-335, 2023.
- [68] M. Tobiszewski & J. Namieśnik, «PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources» *Environmental Pollution*, 162, 110–119, 2012.
- [69] C. Pies, B. Hoffmann, J. Petrowsky, Y. Yang, T. Ternes & T. Hofmann, «Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils» *Chemosphere*, 72, 1594-1601, 2008.
- [70] T. Agarwal, P. Khillare, V. Shridhar & S. Ray, «Pattern, sources and toxic potential of PAHs in the agricultural soils of Delhi, India» *Journal of Hazardous Materials*, 163, 1033-1039, 2009.
- [71] H. Guo, S. Lee, K. Ho, X. Wang & S. Zou, «Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong» *Atmospheric Environment*, 37, 5307-5317, 2003.
- [72] L. Kohl, M. Meng, J. de Vera, B. Bergquist, C. Cooke, S. Hustins, B. Jackson, C.-W. Chow & A. Chan, «Limited Retention of Wildfire-Derived PAHs and Trace Elements in Indoor Environments» *Geophysical Research Letters*, 46, 383-391, 2019.
- [73] L. Webster, P. Roose, B. Bersuder, M. Kotterman, M. Haarich & K. Vorkamp, «Determination of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediment and biota. ICES Techniques in Marine Environmental Sciences No. 53» 2013.
- [74] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), «Public Health Statement for Polychlorinated Biphenyls (PCBs)» U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2000.

- [75] A. Motelay-Massei, D. Ollivon, B. Darban, M. Teil, M. Blanchard & M. Chevreuil, «Distribution and spatial trends of PAHs and PCBs in soils in the Seine River basin, France» *Chemosphere*, 55, 555–565, 2004.
- [76] M. Preda, V. Mocanu & V. Tănase, «Polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Danube Delta» *AgroLife Scientific Journal*, 13, 210-217, 2024.
- [77] A. Cachada, L. Lopes, A. Hursthouse, M. Biasioli, H. Grčman, E. Otabbong, C. Davidson & A. Duarte, «The variability of polychlorinated biphenyls levels in urban soils from five European cities» *Environmental Pollution*, 157, 511–518, 2009.
- [78] A. Covaci, C. Hura & P. Schepens, «Selected persistent organochlorine pollutants in Romania » *Science of the Total Environment*, 280, 143–152, 2001.
- [79] V. Notarianni, M. Calliera, P. Tremolada, A. Finizio & M. Vighi, «PCB distribution in soil and vegetation from different areas in Northern Italy» *Chemosphere*, 37, 2839–2845, 1998.
- [80] J. Briffa, E. Sinagra & R. Blundell, «Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans» *Heliyon*, 5, e04691, 2020.
- [81] O. Dagdag, T. Quadri, R. Haldhar, S.-C. Kim, W. Daoudi, E. Berdimurodov, E. Akpan & E. Ebenso, «An Overview of Heavy Metal Pollution and Control» in D. K. Verma, C. Verma & P. K. Mahish (Eds) *Heavy Metals in the Environment: Management Strategies for Global Pollution.*, 1456, Washington, DC: ACS Symposium Series, 2023, 3-24.
- [82] F. Hasselriis & A. Licata, «Analysis of heavy metal emission data from municipal waste combustion» *Journal of Hazardous Materials*, 47, 77–102, 1996.
- [83] Ł. Kuta, J. Hachoł, A. Wdowczyk & J. Hochman, «Impact of fires at illegal waste storage sites on soil contamination—A study of five cases from Poland» *Sustainability*, 15, 15645, 2023.
- [84] B. S. Ramadan, R. T. Rosmalina, Syafrudin, Munawir, H. Khair, A. Widiyanti, I. Rachman & T. Matsumoto, «Potential exposure to metals-bound particulate during open burning of different waste materials» *Environmental Monitoring and Assessment*, , 197, 495, 2025.
- [85] USEPA, «Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils (Revision 1)» Washington, DC., 2007.
- [86] B. Alloway, *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability.*, Springer Dordrecht, 2013.
- [87] G. Pe-Piper, D. J. W. Piper, D. Matarangas & M. Varti-Mataranga, «The sub-ophiolite mélange of the Island of Lesbos, Greece» *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 6, 241–260, 2001.
- [88] G. Pe-Piper, D. J. W. Piper, N. Zouros & G. Anastasakis, «Age, stratigraphy, sedimentology and tectonic setting of the Sigri pyroclastic Formation and its fossil forests, early Miocene, Lesbos, Greece» *Basin Research*, 31, 1178–1197, 2019.

- [89] I. N. Semenov, T. V. Koroleva, A. V. Sharapova & E. V. Terskaya, «Standard Rates of Content of Chemical Elements in the Soil: International Experience and Use for Western Siberia» *Geogr. Nat. Resour.* , 41, 9–17, 2020.
- [90] I. Semenov & T. Koroleva, «International Environmental Legislation on the Content of Chemical Elements in Soils: Guidelines and Schemes» *Eurasian Soil Sc.*, 52, 1289–1297, 2019.
- [91] M. Chattha, M. Hassan, L. Barbanti, M. Chattha, I. Khan, M. Usman, A. Ali & M. Nawaz, «Composted Sugarcane By-Product Press Mud Cake Supports Wheat Growth and Improves Soil Properties» *Int. J. Plant Prod.*, 13, 241–249, 2019.
- [92] I. Campos, N. Abrantes, P. Pereira, A. Micaelo, C. Vale & J. Keizer, «Forest fires as potential triggers for production and mobilization of polycyclic aromatic hydrocarbons to the terrestrial ecosystem» *Land Degrad. Dev.*, 30, 2360–2370, 2019.
- [93] I. Campos, N. Abrantes, T. Vidal, A. Bastos, F. Goncalves & J. Keizer, «Assessment of the toxicity of ash-loaded runoff from a recently burnt eucalypt plantation» *Eur. J. For. Res.*, 131, 1889–1903, 2012.
- [94] R. S. L. S. K. Jakhar, «A comprehensive study of the impact of waste fires on the environment and health» *Sustainability*, 15, 14241, 2023.
- [95] K. Ravindra, R. Sokhi & R. Van Grieken, «Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation» *Atmos Environ*, 42, 2895–2921, 2008.
- [96] W.-L. Ma, Y.-F. Li, D.-Z. Sun & H. Qi, «Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in topsoils of Harbin, China» *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 57, 670–678, 2009.