



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Συγκριτική μελέτη της άμεσης φωτομετρικής μέτρησης της σκόνης σε ορυχεία με τη συμβατική βαρυτομετρική μέθοδο

Διπλωματική Εργασία

Φανή Γ. Δρούγκα

Εξεταστική Επιτροπή

Μιχάλης Γαλετάκης, Αναπληρωτής καθηγητής (επιβλέπων)

Κων/νος Κομνίτσας, Καθηγητής

Γεώργιος Αλεβίζος, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά

Ιούλιος, 2014

Περίληψη

Η σκόνη είναι δυνητικά επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, επιβαρύνει τον εργασιακό χώρο και επιδρά δυσμενώς στην παραγωγικότητα του λατομείου-μεταλλείου. Η σκόνη παράγεται μέσω μιας σειράς διεργασιών που ξεκινούν από την εξόρυξη, την κατάτμηση (θραύση-λειτουργίβηση), τη μεταφορά και απόθεση των ορυκτών πρώτων υλών. Για την εκτίμηση του κινδύνου των εργαζομένων λόγω της έκθεσής τους σε υψηλές συγκεντρώσεις σκόνης, αλλά και για την επιλογή των κατάλληλων μέτρων ελέγχου, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει η δυνατότητα της ακριβούς μέτρησης αφενός της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης της σκόνης και αφετέρου της διακύμανσής της εντός του οκταώρου εργασίας.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών μέτρησης διαφόρων ορυκτών αιωρούμενων σωματιδίων, που συναντώνται σε λατομικούς και μεταλλευτικούς χώρους, μέσω ειδικά σχεδιασμένων εργαστηριακών μετρήσεων. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ειδικά διαμορφωμένο εργαστηριακό χώρο με τη βοήθεια των παρακάτω τεχνικών:

- Συνεχής καταγραφή της συγκέντρωσης της σκόνης (mg/m^3) με φωτομετρικό καταμετρητή (TSI DustTrak Airborne Particle Monitor 8520) για ένα κοκκομετρικό κλάσμα σκόνης κάθε φορά.
- Συνεχής καταγραφή του αριθμού των αιωρούμενων σωματιδίων (αριθμός σωματιδίων $/\text{m}^3$) με φωτομετρικό απαριθμητή σωματιδίων (TSI AeroTrak Particle Counter 9306) για πέντε κοκκομετρικά κλάσματα της σκόνης ταυτόχρονα.
- Υπολογισμός της μέσης συγκέντρωσης της σκόνης (mg/m^3) με τη χρήση της βαρυτομετρικής μεθόδου (μέθοδος διαφοράς βάρους φίλτρου).

Διαπιστώθηκε ότι και οι τρεις χρησιμοποιηθείσες μέθοδοι μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, με πιο αποτελεσματική αυτή του φωτομετρικού μετρητή συνεχούς καταγραφής (πρώτη τεχνική). Η τεχνική αυτή κρίνεται ως ιδιαίτερα κατάλληλη για μετρήσεις της συγκέντρωσης της σκόνης σε ιδιαίτερα επιβαρυσμένα εργασιακά περιβάλλοντα, αφού εκτιμά με ικανοποιητική ακρίβεια, τόσο τη μέση τιμή του 8ωρου, όσο και τη διακύμανση.

Η δεύτερη μέθοδος (καταγραφή αριθμού σωματιδίων για πέντε κοκκομετρικά κλάσματα της σκόνης ταυτόχρονα), είναι περισσότερη ευαίσθητη της πρώτης, δίνει

πληροφορίες για την κοκκομετρική σύνθεση, παρουσιάζει όμως μειωμένη ακρίβεια σε εργασιακά περιβάλλοντα με μεγάλες συγκεντρώσεις σκόνης, λόγω της αδυναμίας της να διαχωρίσει συσσωματώματα σωματιδίων. Επιπλέον η ακριβής μετατροπή των τιμών της συγκέντρωσης που δίνει (αριθμός σωματιδίων/m³) σε mg/m³, που επιβάλλει η νομοθεσία, μπορεί να γίνει μόνο μετά από συσχέτιση με την πρώτη τεχνική.

Η τρίτη τεχνική (βαρυτομετρική μέθοδος) είναι πλέον αξιόπιστη από όλες, απαιτεί όμως μεγάλης χρονικής διάρκειας μετρήσεις και δίνει μόνο τη μέση τιμή του οκταώρου χωρίς να παρέχει πληροφορίες για τη διακύμανση της συγκέντρωσης εντός του εργασιακού χρόνου.

Πρόλογος – ευχαριστίες

Η μελέτη των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί καίριο αίτημα της επιστημονικής κοινότητας, αλλά και σημαντικό πρόβλημα του μεταλλευτικού και λατομικού κλάδου, λόγω των δυσμενών επιπτώσεων των σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τα αιωρούμενα σωματίδια, ως ερευνητικό αντικείμενο μελέτης, εξετάζονται συστηματικά τις τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, τα αποτελέσματα των οποίων παραμένουν επίκαιρα, λόγω του ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, που παρουσιάζεται για το συγκεκριμένο ζήτημα από το ευρύτερο κοινωνικό σύνολο. Αυτό καταδεικνύεται και από το γεγονός ότι πληθώρα σχετικών μελετών δημοσιεύεται στον επιστημονικό - και όχι μόνον - τύπο. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών δίνουν στους εργαζόμενους τη δυνατότητα έγκυρης ενημέρωσής τους, σχετικά με τα θέματα της ποιότητας του αέρα στον οποίο εκτίθενται, καθώς και τους τρόπους με τους οποίους μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την προσωπική τους έκθεση στους αερομεταφερόμενους σωματιδιακούς ρύπους. Παράλληλα, αποτελούν εργαλείο για τους υπεύθυνους των επιχειρήσεων, προκειμένου να λαμβάνουν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας του απασχολούμενου προσωπικού, σε ιδιαίτερα επιβαρυνμένα περιβάλλοντα εργασίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Γαλετάκη Μιχαήλ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση του θέματος και για την αμέριστη βοήθειά του για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζει στην οικογένειά μου, που με στήριξε και με στηρίζει πάντα, προσφέροντάς μου αφειδώς όλα τα απαραίτητα εφόδια προκειμένου να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές για τα όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Πρόλογος – ευχαριστίες.....	iii
Κατάλογος εικόνων.....	vi
Κατάλογος πινάκων	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Ιστορική αναδρομή	1
1.2 Επαγγελματικός κίνδυνος στη σύγχρονη εποχή	1
1.3 Εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΚΟΝΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΤΟΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	5
2.1 Γενικά για την αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη.....	5
2.2 Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων	6
2.3 Εκπομπές-συμπεριφορά σκόνης	7
2.4 Κριτήρια ταξινόμησης σκόνης συναρτήσει της ανθρώπινης υγείας.....	9
2.5 Επιπτώσεις	14
2.6 Προστασία της υγείας	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ.....	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2 Μέθοδοι δειγματοληψίας χημικών παραγόντων.....	19
3.2.1 Μέθοδοι αναλυτικής δειγματοληψίας.....	19
3.2.2 Μέθοδοι απευθείας μέτρησης	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΔΕΙΓΜΑΤΑ	28
4.1 Διαδικασία πειράματος	28
4.2 Τα όργανα μέτρησης σκόνης	30
4.2.1 Όργανο άμεσης μέτρησης συγκέντρωσης σκόνης τύπου DustTrak Particle Monitor	30

4.2.2 Το όργανο άμεσης μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων τύπου AeroTrak Particle Counter.....	34
4.2.3 Αναλυτική μέθοδος μέτρησης (βαρυτομετρική) συγκέντρωσης της σκόνης	37
4.3 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της σκόνης.....	39
4.3.1 Παιπάλη ασβεστολιθικού πετρώματος (CaCO_3)	39
4.3.2 Υδράσβεστος (Ca(OH)_2).....	40
4.3.3 Γη διατόμων	41
4.3.4 Υπέρλεπτο τσιμέντο (μικροτσιμέντο).....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	44
5.1 Μεθοδολογία σύγκρισης των μετρήσεων	44
5.2 Σύγκριση μεθόδων απευθείας μέτρησης με την αναλυτική.....	61
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΓΙΑ ΟΡΥΚΤΕΣ ΣΚΟΝΕΣ	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	71

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων	6
Εικόνα 2.2: Χρόνος αιώρησης σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους	8
Εικόνα 2.3: Σωματιδιακή διείδυση σε σχέση με την αεροδυναμική διάμετρο	11
Εικόνα 2.4: Διεισδυτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό	13
Εικόνα 2.5: Μάσκα προσώπου μίας χρήσης με βαλβίδα εκπνοής	18
Εικόνα 2.6: Μάσκα με φίλτρα ολόκληρου προσώπου	18
Εικόνα 2.7: Προστατευτικά γυαλιά	18
Εικόνα 2.8: Προστατευτικά γάντια	18
Εικόνα 3.1: Ατομικός δειγματολήπτης	20
Εικόνα 3.2: Βαθμονόμηση αντλίας με φυσσαλιδόμετρο και έλεγχος σταθερότητας της παροχής	23
Εικόνα 3.3: Βαθμονόμηση αντλίας με ροόμετρο	23
Εικόνα 3.4: Πλαστική κεφαλή δειγματοληψίας	24
Εικόνα 3.5: Φίλτρο μεμβράνης	25
Εικόνα 4.1: Ειδικά διαμορφωμένος χώρος για τη διεξαγωγή του πειράματος και όργανα μέτρησης τοποθετημένα στο χώρο αυτό	28
Εικόνα 4.2: Monitor DustTrak 8520	31
Εικόνα 4.3: Λειτουργία οργάνου DustTrak	31
Εικόνα 4.4: TSI 8520 DustTrack Airborne Particle Monitor (σχηματική παράσταση λειτουργίας)	32
Εικόνα 4.5: Σύνδεση του κυκλώνα με το όργανο	33
Εικόνα 4.6: Ρύθμιση του ροόμετρου	33
Εικόνα 4.7: Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων σκόνης δύο διαφορετικών μετρήσεων με τη βοήθεια του οργάνου DustTrak	34
Εικόνα 4.8: Όργανο μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων TSI AeroTrak	35
Εικόνα 4.9: Σκέδαση Mie, κατά την οποία το μήκος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μικρότερο ή συγκρίσιμο με τη διάμετρο των σκεδαστών, δηλαδή της μετρούμενης σκόνης	36
Εικόνα 4.10: Λειτουργία AeroTrak Particle Counter	37
Εικόνα 4.11: Ατομικός δειγματολήπτης με κυκλώνα για το αναπνεύσιμο κλάσμα των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων	38
Εικόνα 4.12: Ατομικός δειγματοσυλλέκτης με αντλία PCXR8	39
Εικόνα 4.13: Δείγμα παιπάλης	39
Εικόνα 4.14: Δείγμα υδρασβέστου	40
Εικόνα 4.15: Δείγμα γης διατόμων	42
Εικόνα 4.16: Δείγμα τσιμέντου	42
Εικόνα 5.1: Σύγκριση μεθόδων άμεσης μέτρησης για το κλάσμα PM_{10} σκόνης από παιπάλη ασβεστολιθικού πετρώματος	45

Εικόνα 5.2: Μεταβολή των τιμών της μέτρησης συγκέντρωσης της σκόνης από παιπάλη ασβεστολιθικού πετρώματος για το κλάσμα PM_{10} μετά από παρέλευση μίας ώρας	46
Εικόνα 5.3: Διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για το κλάσμα των PM_{10} παιπάλης ασβεστολιθικού πετρώματος	47
Εικόνα 5.4: Σύγκριση μεθόδων άμεσης μέτρησης για το κλάσμα PM_{10} σκόνης από υδράσβεστο	48
Εικόνα 5.5: Μεταβολή των τιμών της μέτρησης συγκέντρωσης της σκόνης από υδράσβεστο για το κλάσμα PM_{10} μετά από παρέλευση 15 λεπτών	48
Εικόνα 5.6: Διαχρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης της σκόνης από υδράσβεστο για το κλάσμα $PM_{2.5}$ όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak	49
Εικόνα 5.7: Διαχρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης της σκόνης από υδράσβεστο για το κλάσμα PM_1 όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak	49
Εικόνα 5.8: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από υδράσβεστο για το κλάσμα PM_1 , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak, μετά από παρέλευση μισής ώρας	50
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για το κλάσμα των $PM_{2.5}$ υδρασβέστου	50
Εικόνα 5.10: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα PM_{10} , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak.	52
Εικόνα 5.11: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα $PM_{2.5}$, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak.	53
Εικόνα 5.12: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα $PM_{2.5}$, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak, μετά από παρέλευση μίας ώρας	53
Εικόνα 5.13: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα PM_1 , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak.	54
Εικόνα 5.14: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα PM_1 , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak, μετά από παρέλευση μίας ώρας	54
Εικόνα 5.15: Διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για το κλάσμα των $PM_{2.5}$ λεπτόκοκκου τσιμέντου	55
Εικόνα 5.16: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM_{10} , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak.	56
Εικόνα 5.17: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM_{10} , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak, μετά από παρέλευση μισής ώρας	57
Εικόνα 5.18: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα $PM_{2.5}$, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak.	57

Εικόνα 5.19: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα $PM_{2.5}$, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak, μετά από παρέλευση 20 min	58
Εικόνα 5.20: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM_1 , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak.	58
Εικόνα 5.21: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM_1 , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από AeroTrak, μετά από παρέλευση μίας ώρας	59
Εικόνα 5.22: Διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για το κλάσμα των $PM_{2.5}$ γης διατόμων	60
Εικόνα 5.23: Συγκεντρωτικό διάγραμμα σύγκρισης των συντελεστών συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα και όλα τα είδη των σκονών που εξετάστηκαν.	61

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 5.1: Απόσπασμα υπολογισμών από μετρήσεις οργάνου AeroTrak.	44
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης για την συσχέτιση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης από υδράσβεστο για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα.	51
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης για την συσχέτιση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης από τσιμέντο για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα.	55
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης για την συσχέτιση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης από γη διατόμων για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα.	59
Πίνακας 5.5: Μέση τιμή της συγκέντρωσης της σκόνης με διαφορετικές μεθόδους μέτρησης	62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η εξέλιξη της ανθρωπότητας έχει άμεση σχέση με τα ορυκτά και ιδιαίτερα κατά την εποχή του χαλκού (3200-1050 π. Χ.), εποχή η οποία συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη μεταλλουργικών τεχνικών εξόρυξης του χαλκού από φυσικά κοιτάσματα. Η ύπαρξη ορυχείων και μεταλλείων έχει αποτυπωθεί επίσης και στα αρχαία κείμενα, με ονομαστά αυτά των λατομείων της Πεντέλης, των ορυχείων της Θάσου, των μεταλλείων της Λαυρίου. Ωστόσο και παρά την έλλειψη τεχνολογικών υποδομών, τα θέματα υγιεινής και ασφάλειας εργασίας και γενικότερα του επαγγελματικού κινδύνου αποτελούσε αντικείμενο εξέτασης.

Ο Όμηρος (9ος ή 8ος αιώνας π. Χ.) στην Οδύσσεια αναφέρεται στο Λαέρτη, ο οποίος «γύρω από τις κνήμες του είχε δεμένες κνημίδες για να αποφύγει τις αμυχές, επίσης φορούσε χειρόκτια στα χέρια του για προστασία από τα αγκάθια», όταν ασχολούνταν με αγροτικές εργασίες. Στην Αρχαία Ελλάδα, ο Ιπποκράτης (460-377π.Χ.) διατύπωσε τις πρώτες σκέψεις για τις νόσους, που οφείλονταν στην επαγγελματική δραστηριότητα του ανθρώπου, αναφέροντας περιπτώσεις νόσων επαγγελματικού χαρακτήρα, που εκδηλώθηκαν σε εργάτες ορυχείων. Ο Πλάτωνας (427-347 π. Χ.) αναφέρει τις παραμορφώσεις που προέρχονται από την επαγγελματική απασχόληση και δίνει εξηγήσεις για το μηχανισμό της εμφάνισής τους, ενώ ο Αριστοτέλης (384-322 π. Χ.) περιγράφει για πρώτη φορά τα εργατικά ατυχήματα.

Με την πάροδο των χρόνων, γίνεται αναφορά για επαγγελματικό κίνδυνο στις αρχές του 16^{ου} αιώνα. Ο Παράκελσος (1493-1541) γεννήθηκε στην Ελβετία, αλλά μεγάλωσε στην Αυστρία δουλεύοντας σε ορυχεία. Σπούδασε Ιατρική στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης και με αφορμή τις εμπειρίες από την εργασία του, μελέτησε την επίδραση της ποιότητας των εργασιακών χώρων στην υγεία των εργαζομένων, παρατηρώντας ότι πολλοί εργάτες μεταλλωρυχείων έπασχαν από παθήσεις των πνευμόνων.

1.2 Επαγγελματικός κίνδυνος στη σύγχρονη εποχή

Η περίοδος της βιομηχανικής επανάστασης χαρακτηρίστηκε ως η απαρχή ραγδαίων μεταβολών σε τεχνολογικό, οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο, περίοδο κατά την οποία ξεκινά η έρευνα και η ρύθμιση της επαγγελματικής ασφάλειας και υγείας, ως απάντηση στις ανησυχίες των εργαζομένων από τη ραγδαία εξέλιξη της βιομηχανίας. Το 1919, η

ίδρυση της Διεθνούς Οργάνωσης Εργασίας (ΔΟΕ) απετέλεσε ορόσημο για τη βελτίωση των εργασιακών συνθηκών στα βιομηχανικώς αναπτυγμένα κράτη της εποχής εκείνης. Σημεία από το προοίμιο του Καταστατικού της ΔΟΕ παραμένουν επίκαιρα, όπως για παράδειγμα η ρύθμιση των ωρών εργασίας ημερησίως και του ανώτατου ορίου εργάσιμων ημερών την εβδομάδα, η προστασία των εργαζομένων κατά των κινδύνων, ασθενειών και τραυματισμών που προκύπτουν από την εργασία κ.ά.

Στην Ελλάδα, η πρώτη προσπάθεια ύπαρξης σχετικής νομοθεσίας για την προστασία των εργαζομένων, έγινε με την έκδοση του Νόμου ΧΗ'/1861 "Περί μεταλλείων", που πρόβλεπε την περίθαλψη των εργατών μεταλλείων και των οικογενειών τους σε περίπτωση δυστυχήματος και αργότερα με το Νόμο ΒΩΜΑ'/1901 "Περί περιθάλψεως των εν μεταλλείοις και μεταλλουργείοις παθόντων και των οικογενειών αυτών", που κωδικοποιήθηκε με το Προεδρικό Διάταγμα της 23ης Μαρτίου 1925. Ορόσημο για την προστασία των εργαζομένων στην εξορυκτική βιομηχανία αποτελεί η Υπουργική Απόφαση 82374/10419/Δ 3036/1966 «Κανονισμός Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών», στο άρθρο 28 του οποίου αναφέρεται για πρώτη φορά η υποχρέωση χορήγησης *«ειδικής προσωπίδος εις έκαστον των εργαζομένων εις θέσεις εις τας οποίας αιωρείται κόνις επικίνδυνος για την υγεία του ανθρώπου»*.

Αναφορικά με την κάλυψη των επαγγελματικών κινδύνων σε λοιπούς εργασιακούς χώρους, σταθμό-αφετηρία απετέλεσε ο Ν.1568/85 «Υγιεινή και ασφάλεια των εργαζομένων» για τη δημιουργία ενός σύγχρονου νομοθετικού πλαισίου, με τις μετέπειτα Υπουργικές Αποφάσεις, Προεδρικά Διατάγματα και Νόμους. Επιστέγασμα όλων αυτών αποτελεί ο Ν.3850/2010 «Κύρωση του κώδικα νόμων για την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων», που αποτελεί την κωδικοποίηση όλης της σχετικής νομοθεσίας και νομολογίας στον τομέα αυτό.

Τέλος, με την τελευταία Υπουργική Απόφαση Δ7/Α/οικ. 12050/2223/2011 «Κανονισμός Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (Κ.Μ.Λ.Ε.)» εκσυγχρονίστηκε πλήρως το νομοθετικό πλαίσιο για τις μεταλλευτικές και λατομικές εργασίες, ώστε να ανταποκρίνεται στα σύγχρονα τεχνολογικά δεδομένα. Ειδικότερα στο άρθρο 22 «Προστασία των εργαζομένων από αιωρούμενες σκόνες, αέρια, ατμούς, καπνούς και λοιπούς χημικούς παράγοντες» ορίζεται ότι σε κάθε θέση εργασίας που υπάρχει έκθεση των εργαζομένων σ' ένα ή περισσότερα από τα είδη σκόνης ή αερίων ή ατμών ή

καπνών, που αναγράφονται στους σχετικούς πίνακες, οι «οριακές τιμές έκθεσης» και οι «ανώτατες οριακές τιμές έκθεσης» δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις αναφερόμενες στον πίνακα του Παραρτήματος Α οριακές τιμές.

1.3 Εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου

Η εκτίμηση του επαγγελματικού κινδύνου είναι μια συστηματική εξέταση όλων των φάσεων της εκτελούμενης εργασίας προς εντοπισμό των υφιστάμενων πηγών κινδύνου, με σκοπό την αποτελεσματική σχεδίαση και υλοποίηση του προγράμματος λήψης μέτρων προστασίας της υγείας και ασφάλειας των εργαζομένων.

Τα βασικά στάδια της εκτίμησης του επαγγελματικού κινδύνου είναι (ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., 2001):

Βήμα 1. Προσδιορισμός των πηγών κινδύνων

Ο εντοπισμός των πηγών κινδύνων στον εργασιακό χώρο επιτυγχάνεται: α) με συστηματική εξέταση όλων των φάσεων και των διαδικασιών της εργασίας και αποτύπωσή τους σε σχετικό διάγραμμα ροής παραγωγικών διαδικασιών, β) με εξέταση όλων των πηγών κινδύνου με μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία, όπως είναι τα υψηλά επίπεδα θορύβου ή η έκθεση σε βλαπτικούς παράγοντες (αέρια, ατμοί, σκόνες κλπ) και γ) με εξέταση των τηρουμένων αρχείων στην επιχείρηση ή με ανάλυση των στατιστικών στοιχείων του κλάδου, σχετικά με ατυχήματα ή προβλήματα υγείας των εργαζομένων αναζητώντας πληροφορίες από άλλες πηγές, όπως εγχειρίδια οδηγιών και δελτία δεδομένων, ιστοσελίδες, κ.ά, χρησιμοποιώντας μεθόδους στατιστικής και πιθανοτήτων.

Βήμα 2. Αξιολόγηση της επικινδυνότητας και καθορισμός προτεραιοτήτων

Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας μπορεί να επιτευχθεί με την αποτύπωση για κάθε κίνδυνο ξεχωριστά:

- της πιθανότητας εκδήλωσής του
- της σοβαρότητας της τυχόν βλάβης
- της συχνότητας ή διάρκειας έκθεσης των εργαζομένων

Βήμα 3. Λήψη αποφάσεων σχετικά με προληπτική δράση

Η λήψη προληπτικών και προστατευτικών μέτρων πρέπει να συνδυαστεί με την εξέταση του βαθμού πρόληψης του κινδύνου σε συνάρτηση με το εάν κάθε δραστηριότητα ή

εργασία είναι απαραίτητη, με την απομάκρυνση της πηγής κινδύνου, ή/και με τη χρήση διαφορετικών μεθόδων ή διαδικασιών εργασίας.

Σε περίπτωση που οι κίνδυνοι δεν μπορούν να αποφευχθούν ή να προληφθούν, η λήψη προληπτικών και προστατευτικών μέτρων πρέπει να συνδυαστεί τον τρόπο με τον οποίο θα μειωθούν οι κίνδυνοι σε ένα επίπεδο, στο οποίο δεν θα διακυβεύεται η υγεία και η ασφάλεια των ατόμων που εκτίθενται σε αυτούς.

Κατά τη χάραξη μιας στρατηγικής για τη μείωση και τον έλεγχο των κινδύνων, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω γενικές αρχές πρόληψης:

- αντιμετώπιση του κινδύνου στην πηγή του
- προσαρμογή της εργασίας στον άνθρωπο, ειδικότερα όσον αφορά τη διαμόρφωση των θέσεων εργασίας, καθώς και την επιλογή του εξοπλισμού και των μεθόδων εργασίας
- αντικατάσταση του επικίνδυνου με το ασφαλές ή το λιγότερο επικίνδυνο
- χάραξη συνολικής πολιτικής πρόληψης, η οποία θα καλύπτει την τεχνολογία, την οργάνωση και τις συνθήκες εργασίας, τις κοινωνικές σχέσεις και την επίδραση των παραγόντων που σχετίζονται με το εργασιακό περιβάλλον
- λήψη συλλογικών προστατευτικών μέτρων έναντι ατομικών (λ.χ. αντιμετώπιση της έκθεσης σε αέρια με επιτόπιο σύστημα εξαερισμού και όχι με ατομικούς αναπνευστήρες), παροχή κατάλληλων οδηγιών προς όλους τους εργαζομένους.

Για τις αποφάσεις σχετικά με τον έλεγχο του κινδύνου, θα πρέπει να γίνεται χρήση των προδιαγραφών, της εθνικής νομοθεσίας, των εθνικών και διεθνών πρότυπων, των δημοσιευμένων έγγραφων καθοδήγησης από τις αρμόδιες αρχές κ.λπ.

Βήμα 4. Ανάλυση δράσης

Για την αποτελεσματική ανάλυση δράσης απαιτείται να καθορισθούν τα μέτρα που πρόκειται να εφαρμοστούν, τα διαθέσιμα μέσα (χρόνος, έξοδα κ.λπ.), ποιος θα κάνει τι και πότε, καθώς και την ημερομηνία αναθεώρησης των μέτρων ελέγχου.

Βήμα 5. Παρακολούθηση και αναθεώρηση

Η εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου πρέπει να συνοδεύεται από ρυθμίσεις για την παρακολούθηση και την αναθεώρηση των προστατευτικών και προληπτικών μέτρων, καθώς και για τον έλεγχο εμφάνισης ενδεχόμενων νέων κινδύνων, ώστε να διασφαλίζεται η αποτελεσματικότητα των μέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΚΟΝΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΤΟΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

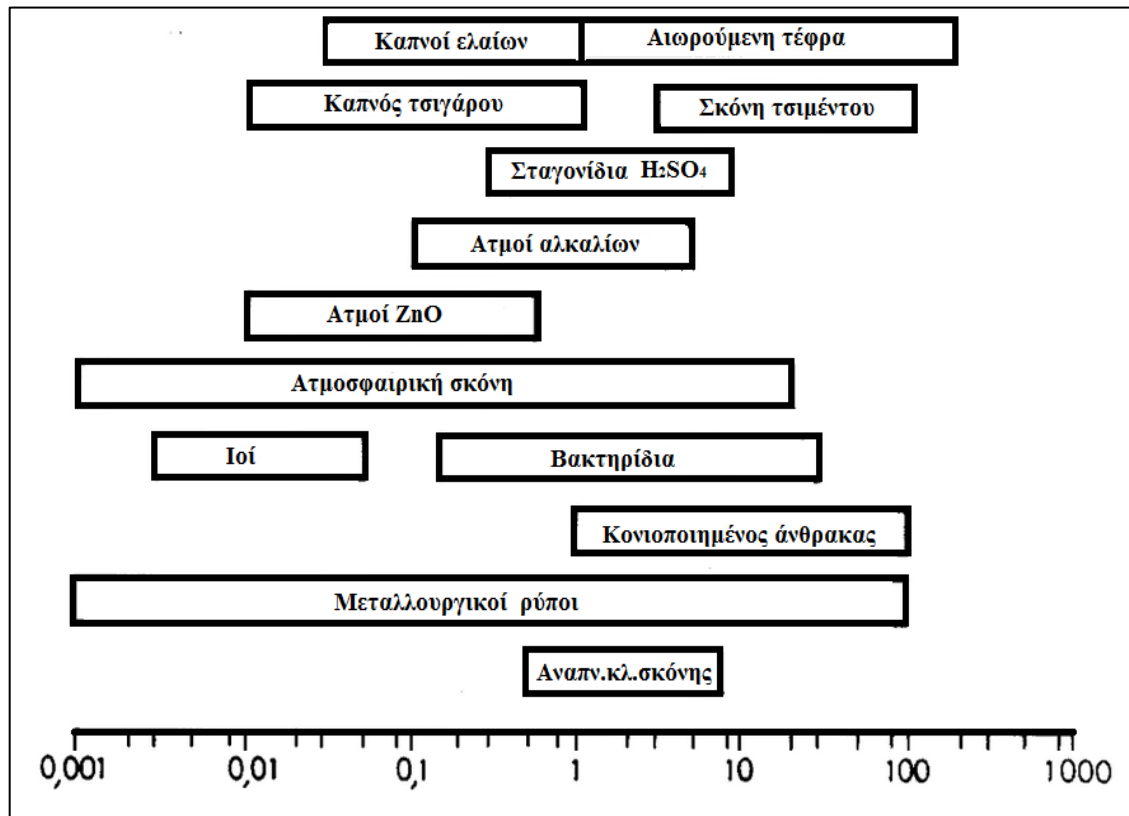
2.1 Γενικά για την αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη

Η έκθεση των εργαζομένων στις χημικές ουσίες, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία, αλλά και δημιουργούνται απ' αυτήν, εγκυμονεί κινδύνους για την υγεία τους. Η συνολική παγκόσμια παραγωγή χημικών ουσιών έχει αυξηθεί από 1 εκατομμύριο τόνους το 1930 σε 400 εκατομμύρια σήμερα. Συγκεκριμένα, το Chemical Abstracts Service (CAS Registry) της American Chemical Society το 1977 είχε ταξινομήσει 4.039.907 χημικές ενώσεις, ενώ σήμερα ο συνολικός αριθμός αυτών των χημικών ουσιών ανέρχεται στα $\approx 20.000.000$. Επίσης εκτιμάται ότι περίπου 4.000 νέες χημικές ενώσεις, προστίθενται καθημερινά στον κατάλογο απογραφής (CAS Registry). Σημαντικός παράγοντας για την ανθρώπινη υγεία αποτελούν οι Οριακές Τιμές Έκθεσης (Threshold Limit Values) σε χημικές ουσίες, γεγονός το οποίο ώθησε το Αμερικανικό Συνέδριο Κυβερνητικών Υγιεινολόγων Βιομηχανίας (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) το 1996 να προσδιορίσει TLVs για περίπου 7.000 χημικές ουσίες, που χρησιμοποιούνται στις παραγωγικές διαδικασίες.

Σε ελληνικό επίπεδο, ουσιαστική προσέγγιση για το θέμα αποτέλεσε το Π.Δ 307/86 «Προστασία της Υγείας των εργαζόμενων που εκτίθενται σε ορισμένους χημικούς παράγοντες κατά τη διάρκεια της εργασίας τους», με το οποίο θεσπίζονται Οριακές Τιμές Έκθεσης για 38 χημικές ουσίες, ενώ γίνεται αναφορά για αιωρούμενες χημικές ουσίες, που βρίσκονται στον αέρα του χώρου εργασίας.

Ο όρος που περιγράφει τις αιωρούμενες χημικές ουσίες είναι η «αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη» (particulate matter, PM) ή αλλιώς «αιωρούμενα σωματίδια». Τα σωματίδια αυτά βρίσκονται διεσπαρμένα στον αέρα, σε στερεά ή υγρή μορφή, με μέγεθος μεγαλύτερο από αυτό των απλών μορίων (περίπου $2 \cdot 10^{-4}$ μm σε διάμετρο), αλλά μικρότερο από 500 μm . Τα αιωρούμενα σωματίδια αυτά προέρχονται από μια μεγάλη ποικιλία πηγών και έχουν να σημαντικό εύρος διαφορετικών μορφολογικών, χημικών, φυσικών και θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών. Στην ατμόσφαιρα έχουν ανιχνευθεί συγκεντρώσεις αιωρουμένων σωματιδίων ως προς τη μάζα από μερικά $\mu\text{g}/\text{m}^3$ έως και αρκετές εκατοντάδες $\mu\text{g}/\text{m}^3$ σε ατμοσφαιρικά επιβαρυμένες περιοχές (Seinfeld & Pandis 2006, Wark et al. 1998, Manahan 1994, Chaloulakou et al. 2003).

Στην εικόνα 2.1. αποτυπώνονται διάφορες κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων, που δημιουργούνται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή φυσικές διεργασίες.



Εικόνα 2.1: Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων (Πηγή: Environmental engineering in S.A. mines, 1989)

2.2 Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες μεγάλες ομάδες με βάση τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά:

α. Σωματιδιακοί αερομεταφερόμενοι ρύποι

Στην ομάδα αυτή κατατάσσονται οι σκόνες και οι ίνες, οι καπνοί και τα νέφη (ομίχλες). Οι σωματιδιακοί αερόφερτοι ρύποι είναι χημικές ουσίες, που παρουσιάζονται με τη μορφή αιωρημάτων στερεών ή υγρών σωματιδίων στον αέρα. Η αεροδυναμική συμπεριφορά των στερεών και των υγρών σωματιδιακών αιωρημάτων ταυτίζεται, με τη διαφορά ότι τα υγρά σωματιδιακά αιωρήματα έχουν σχήμα πάντοτε σφαιρικό, ενώ το σχήμα των στερεών σωματιδιακών αιωρημάτων ποικίλλει. Η αεροδυναμική συμπεριφορά των σωματιδιακών αιωρημάτων σχετίζεται άμεσα με το χρόνο καθίζησης των σωματιδίων και εξαρτάται από την αεροδυναμική διάμετρο και την πυκνότητά

τους. Η έννοια αυτή αναφέρεται στη διάμετρο μιας νοητής σφαίρας μοναδιαίας πυκνότητας (1gr/m^3) που έχει την ίδια ταχύτητα πτώσης στον αέρα με το υπό εξέταση σωματίδιο.

β. Αερόμορφοι ρύποι

Στην ομάδα αυτή συμπεριλαμβάνονται τα αέρια και οι ατμοί. Οι αερόμορφοι ρύποι είναι χημικές ουσίες, που βρίσκονται διάχυτες στον ατμοσφαιρικό αέρα υπό τη μορφή αερίων ή ατμών. Η συγκεκριμένη μορφή των ρύπων εξαρτάται από τη σχέση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος με την κρίσιμη θερμοκρασία της ουσίας. Ως κρίσιμη θερμοκρασία μίας ουσίας ορίζεται η τιμή της θερμοκρασίας πάνω από την οποία δεν είναι δυνατή η υγροποίηση ενός αερίου με συμπίεση. Εάν η κρίσιμη θερμοκρασία της αερόμορφης ουσίας είναι υψηλότερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, τότε έχουμε παρουσία ατμών. Εάν η κρίσιμη θερμοκρασία της αερόμορφης ουσίας είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, τότε έχουμε παρουσία αερίων.

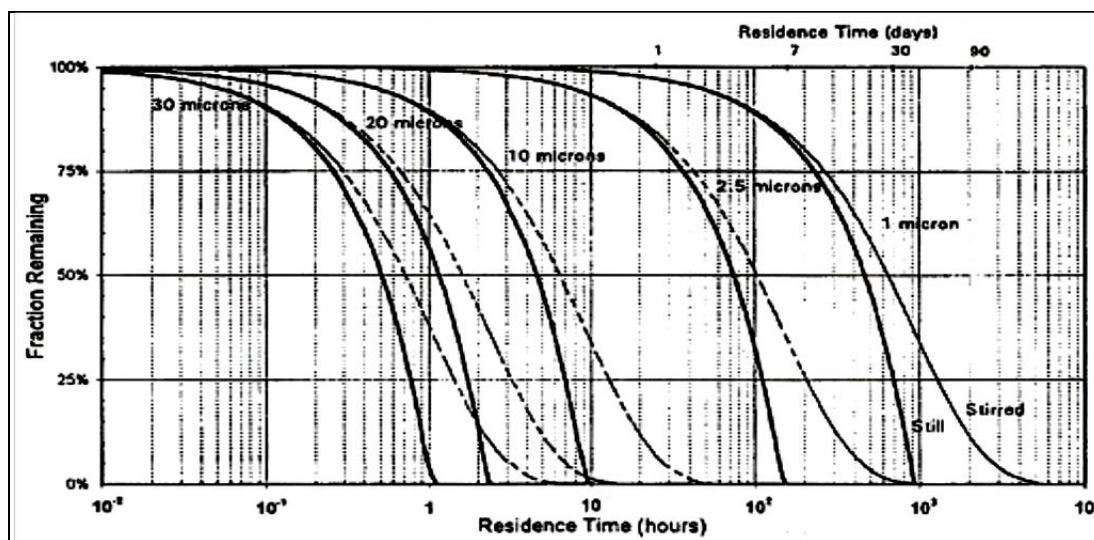
2.3 Εκπομπές-συμπεριφορά σκόνης

Οι σκόνες αποτελούνται από στερεά σωματίδια, τα οποία λόγω της σχέσης μεταξύ της διαμέτρου και της πυκνότητάς τους, μπορούν να αιωρούνται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Δημιουργούνται κατά τη μηχανική κατεργασία στερεών σωμάτων ή αποτελούν το τελικό προϊόν της εκφυλιστικής διαδικασίας υλικών. Ειδικότερα σε ένα υπαίθριο ορυχείο, η θραύση, η λειοτρίβηση, η κοσκίνιση, η διακίνηση και φόρτωση του υλικού με χωματουργικά μηχανήματα, καθώς και η μεταφορά και απόθεση του με χωματουργικά αυτοκίνητα αποτελούν τις κυριότερες γενεσιουργές αιτίες των εκπομπών σκόνης. Ωστόσο, οι εκπομπές σκόνης επηρεάζονται από τις ιδιότητες του υλικού, όπως η σκληρότητα, η κατανομή μεγέθους σωματιδίων, η πυκνότητα των σωματιδίων, η υγρασία, καθώς επίσης και από τις παραμέτρους της διαδικασίας, όπως ο μηχανισμός θραύσης-λειοτρίβησης, η ενέργεια που δαπανάται για τη διαδικασία, ο ρυθμός τροφοδοσίας και η διάρκεια της (Liu et al., 1999, Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, 1999).

Η σύνθεση των παραγόμενων αιωρούμενων σωματιδίων δεν είναι απαραίτητα η ίδια με εκείνη του μητρικού πετρώματος, αφού μπορεί να διαφοροποιηθεί ανάλογα με τη διαδικασία θραύσης-λειοτρίβησης (π.χ. εκλεκτική λειοτρίβηση) (Petavratzi et al., 2005). Ως εκπομπή σκόνης θεωρείται η διαδικασία κατά την οποία η σκόνη

ανυψώνεται από την επιφάνεια για να αιωρηθεί στην ατμόσφαιρα. Αυτό απαιτεί μία ποσότητα ενέργειας για να ξεπεραστούν, τόσο οι βαρυτικές, όσο και οι δυνάμεις συνοχής που ασκούνται στα σωματίδια της σκόνης. Η ικανότητα των αιωρούμενων σωματιδίων για διασπορά προσδιορίζεται από την ικανότητα των σωματιδίων σκόνης να παραμείνουν στον αέρα, επηρεαζόμενη από το βάρος των σωματιδίων και τις μεταξύ τους δυνάμεις συνοχής, καθώς και από τη ροή του αέρα (Liu et al., 1999).

Στην εικόνα 2.2 αποτυπώνεται ο χρόνος αιώρησης σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους. Τα στοιχεία αναφέρονται σε μέγιστο ύψος 100 m και στις περιπτώσεις: α. ακίνητου αέρα (still) και β. αναδευόμενου αέρα (stirred)



Εικόνα 2.2: Χρόνος αιώρησης σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους (Πηγή: Watson et al., 1997).

Η εκπομπή σκόνης επηρεάζεται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Οι βροχοπτώσεις μειώνουν τη διασπορά σκόνης, λόγω της διαβροχής της επιφάνειας των υλικών, όσο και λόγω της αύξησης του ρυθμού με τον οποίο η αερομεταφερόμενη σκόνη απομακρύνεται από τον αέρα. Αντίθετα, ο ξηρός αέρας μπορεί να αυξήσει το ρυθμό με τον οποίο η σκόνη ανυψώνεται από μια επιφάνεια και συμπαρασύρεται στον αέρα, οπότε έχουμε την εξάπλωση σκόνης σε ευρύτερες γεωγραφικές περιοχές. Εκτός από τις εκπομπές σκόνης που οφείλονται στις καιρικές συνθήκες, η ορυκτολογία του υλικού είναι μια επιπλέον παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί, αφού διαφορετικοί τύποι ορυκτών αναπτύσσουν διαφορετικές τιμές εκπομπών σκόνης (Petavratzi et al., 2005).

2.4 Κριτήρια ταξινόμησης σκόνης συναρτήσει της ανθρώπινης υγείας

Η ταξινόμηση της σκόνης, με βάση την επίδραση της στον ανθρώπινο οργανισμό, μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια, όπως το μέγεθος των σωματιδίων που επιδρά σε αυτόν, καθώς και με βάση το βαθμό διεισδυτικότητας στον ανθρώπινο οργανισμό.

2.4.1 Ταξινόμηση με βάση το μέγεθος

Τα σωματίδια παρουσιάζουν διαφοροποίηση ως προς το μέγεθος και το σχήμα, συνεπώς είναι αδύνατη η έκφραση κοινής παραμέτρου μεγέθους, αφού πολλές ιδιότητες των σωματιδίων εξαρτώνται από αυτό (όγκο, μάζα, ταχύτητα εναπόθεσης). Το μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί ίσως την πιο θεμελιώδη παράμετρο για την περιγραφή των αεροζόλ. Στις κατανομές κατά μέγεθος, ως κριτήριο κατάταξης χρησιμοποιείται το μέγεθος της «ισοδύναμης διαμέτρου» ή αλλιώς «διάμετρος ισοδύναμου όγκου» του σωματιδίου. Ως μέγεθος είναι χρήσιμη για σωματίδια μεγαλύτερα των 0,5 μm και θεωρείται κατάλληλη για συγκεκριμένου τύπου μεθόδους μέτρησης, όπως για την ανάλυση δεδομένων από κυκλώνα, από διαχωριστές πρόσκρουσης σε σειρά (cascade impactor) ή από έναν κατανομέα μεγέθους αεροδυναμικών σωματιδίων. Τα σύμβολα d , d_p ή D είναι αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως για το συμβολισμό της αεροδυναμικής διαμέτρου των σωματιδίων. Το μέγεθος του σωματιδίου εκφράζεται σε μικρόμετρα (μm) και σε νανόμετρα (nm) για σωματίδια μικρότερα από 0,1 μm (Ruzer & Harley, 2005).

Μία από τις κατηγοριοποιήσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για την εκτίμηση και το διαχωρισμό του μεγέθους των σωματιδίων είναι αυτή που τα διαχωρίζει σε λεπτά (fine particles) και αδρά (coarse particles). Η επίσημη ορολογία για το χαρακτηρισμό των συγκεντρώσεων σωματιδιακής μάζας περιλαμβάνει τα ονομαζόμενα κλάσματα $\text{PM}_{2.5}$ και PM_{10} . Το κλάσμα $\text{PM}_{2.5}$ (λεπτά σωματίδια) αποτελεί τη συγκέντρωση μάζας σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm . Αντίστοιχα, το κλάσμα PM_{10} αποτελεί τη συγκέντρωση μάζας σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10 μm . Γενικότερα ακολουθείται η κατηγοριοποίηση (Morawska & Salthammer, 2003):

- **Αδρά σωματίδια:** Σωματίδια μεγαλύτερα από 2,5 μm
- **Λεπτά σωματίδια:** Σωματίδια μικρότερα από 2,5 μm
- **Υπερ-λεπτά σωματίδια:** Σωματίδια μικρότερα από 0,1 μm

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος τους και με την επίδραση τους στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου (ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, 1999). Έτσι:

- στο ρινοφάρυγγα εναποτίθενται με κατακράτηση από το αναπνευστικό βλεννογόνο τα σωματίδια διαμέτρου > 15 μέχρι και $30\mu\text{m}$ καθώς και οι ίνες με διάμετρο $> 3\mu\text{m}$,
- στον τραχειοβρογχικό δένδρο εναποτίθενται με καθίζηση τα σωματίδια διαμέτρου > 5 μέχρι και $15\mu\text{m}$,
- στα κυψελιδικό-τριχοειδικά συμπλέγματα των πνευμόνων εναποτίθενται με καθίζηση και διάχυση τα σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου $> 0,5$ μέχρι $5\mu\text{m}$, καθώς και οι ίνες διαμέτρου $< 3\mu\text{m}$. Αυτά στη Βιομηχανική Υγιεινή ονομάζονται «αναπνεύσιμο κλάσμα», γιατί επικάθονται στην περιοχή εναλλαγής αερίων και
- τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο $< 0,5 \mu\text{m}$ φθάνουν στην περιοχή εναλλαγής αερίων, αλλά δεν εναποτίθενται και αποβάλλονται με την εκπνοή.

2.4.2 Ταξινόμηση με βάση τη διεισδυτικότητα στον ανθρώπινο οργανισμό

Η είσοδος των χημικών ενώσεων σωματιδίων στον άνθρωπο πραγματοποιείται δια μέσου:

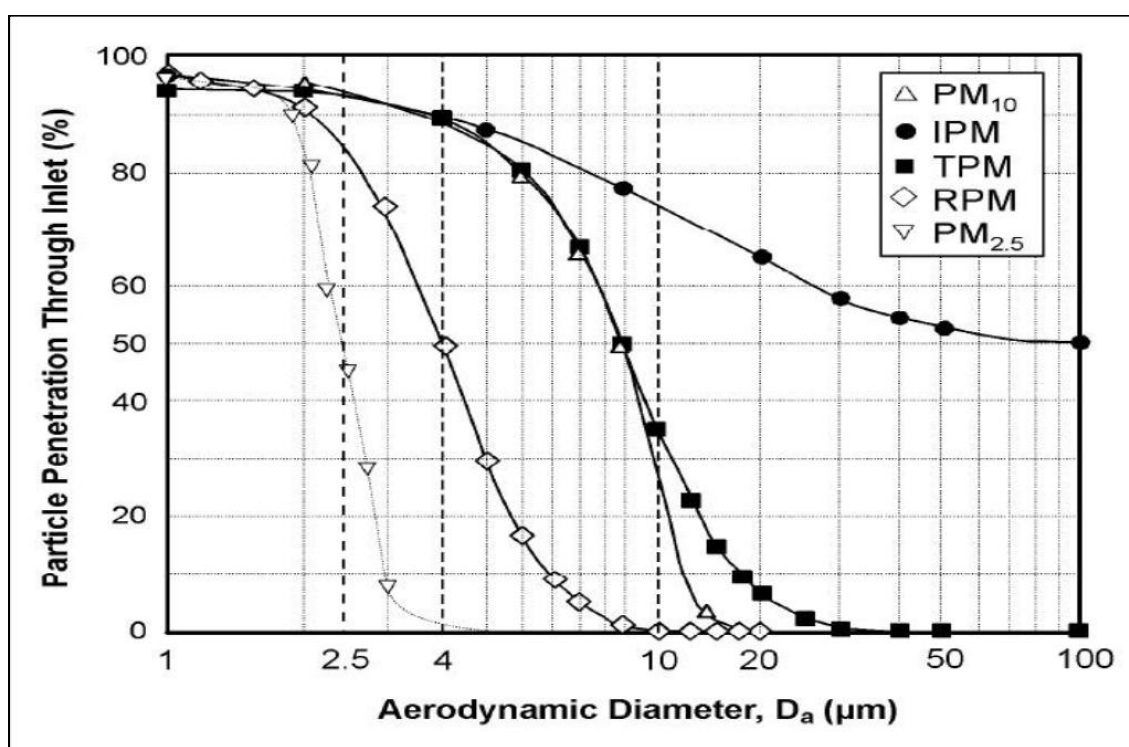
- Της εισπνοής
- Της δερματικής επαφής
- Της κατάποσης

2.4.2.1 Είσοδος διαμέσου του αναπνευστικού συστήματος

Πριν γίνει αναφορά στις κατηγορίες κλασμάτων, αξίζει να τονιστεί η έννοια του κλάσματος PM_{10} , κλάσμα που ορίστηκε βάσει της κατάταξης των ολικών αιωρουμένων σωματιδίων κατά μέγεθος (χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα) σε συσχέτιση με τη διεισδυτικότητά του στον ανθρώπινο οργανισμό.

Τα PM_{10} , όπως ορίζονται από την Environmental Protection Agency (EPA), αναφέρονται στα σωματίδια που συλλέγονται από δειγματολήπτες με ένα ανώτερο σημείο διαχωρισμού των $10\mu\text{m}$. Οι μετρητές που καταγράφουν σωματίδια αυτού του μεγέθους βασίζουν τη δειγματοληψία τους στην αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων.

Η συμπεριφορά των σωματιδίων μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό (αναπνευστικό σύστημα, στομάχι) είναι θέμα που έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα, και το οποίο ακόμη μελετάται. Ωστόσο, βάσει των πιο πρόσφατων συμπερασμάτων της η κοινότητα της εργασιακής υγείας όρισε τρεις υποομάδες των συνολικά αιωρούμενων σωματιδίων, ήτοι σε εσπνεύσιμα (IMP), θωρακικά (TPM) και αναπνεύσιμα (RPM), συναρτώμενα όλα από τη διάμετρό τους. Τα αναπνεύσιμα σωματίδια αποτελούν ένα υποσύνολο των θωρακικών που έχει περισσότερες πιθανότητες να φτάσει στην περιοχή ανταλλαγής αερίων του πνεύμονα. Οι καμπύλες που ορίζουν τις τρεις κατηγορίες σωματιδίων φαίνονται στην εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Σωματιδιακή διείσδυση σε σχέση με την αεροδυναμική διάμετρο. Οι καμπύλες σωματιδιακής διείσδυσης αναφέρονται στα εσπνεύσιμα (IMP), θωρακικά (TPM) και στα αναπνεύσιμα (RPM) κλάσματα (Πηγή: EPA, 2004)

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, θα μπορούσε εύκολα να θεωρηθεί ότι τα κλάσματα PM₁₀ αποτελούν έναν καλό δείκτη για τα θωρακικά σωματίδια (TPM). Επίσης από το διάγραμμα φαίνεται ότι οι καμπύλες των δύο αυτών παραμέτρων έχουν το ίδιο σημείο αποκοπής (cut point) για το 50% του κλάσματος. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ότι αποτελεί σημείο συλλογής του 50% των σωματιδίων με μέγεθος κάτω ή εντός ενός αεροδυναμικού εύρους. Ωστόσο παρατηρείται ότι η καμπύλη για το

θωρακικό κλάσμα δεν έχει την ίδια απότομη κλίση με αυτήν του κλάσματος των PM_{10} , συνεπώς το πρώτο περιέχει κάποια σωματίδια διαμέτρου μεταξύ 10 και $30\mu m$, κλάσματα που εξαιρούνται από το δεύτερο.

Η επιλογή των PM_{10} ως δείκτη βασίστηκε σε λόγους σχετικούς με την υγεία και είχε σκοπό να στρέψει το ενδιαφέρον των επιστημόνων στα σωματίδια αυτά, τα οποία λόγω του μεγέθους τους, είναι σε θέση να φθάσουν στη θωρακική περιοχή του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος. Ο ορισμός των PM_{10} ως δείκτη για τα θωρακικά σωματίδια είναι ένας συμβιβασμός που έγινε μεταξύ της επιθυμίας για συλλογή όλων των σωματιδίων, που μπορεί να μουν στη θωρακική περιοχή και της ανάγκης για σχεδίαση ενός οργάνου, του οποίου η δειγματοληψία να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του σωματιδίου ή την ταχύτητα του αέρα. Το πλεονέκτημα που ανακύπτει από τη διαφορά που παρατηρήθηκε παραπάνω μεταξύ των δύο καμπυλών είναι ο περιορισμός του προβλήματος της πεπερασμένης απόδοσης συλλογής όπως αυτή καθορίζεται από την καμπύλη για τη θωρακική διείσδυση για σωματίδια μεγαλύτερα από την αεροδυναμική διάμετρο των $10\mu m$ (EPA, 2004).

Οι τρεις υποομάδες των αιωρούμενων σωματιδίων με βάση τη διείσδυση τους στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα είναι:

α. Εισπνεύσιμα σωματίδια (inhalable particles)

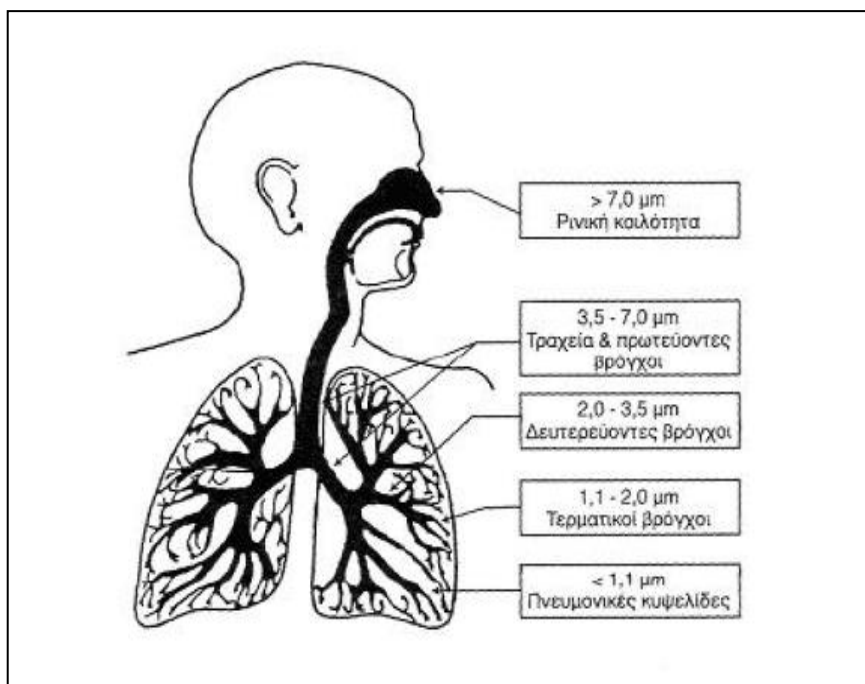
Εισπνεύσιμα σωματίδια είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εισέρχονται στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Περιλαμβάνουν σωματίδια με διάμετρο έως $10\mu m$, καθώς η πλειοψηφία των σωματιδίων με διαμέτρους μεγαλύτερες από $10\mu m$ κατακρατούνται στη στοματική και τη ρινική κοιλότητα.

β. Θωρακικά σωματίδια (thoracic particles)

Τα θωρακικά σωματίδια αποτελούν το κλάσμα των εισπνεύσιμων σωματιδίων που καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Θεωρείται ότι έχουν μέγεθος μικρότερο από $7\mu m$.

γ. Αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable particles)

Το σωματιδιακό κλάσμα με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερο από $2,5\mu m$ είναι το πιο σημαντικό από άποψη επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία. Τα σωματίδια αυτά καταφέρνουν γενικά να διεισδύσουν έως τα βάθη των πνευμόνων και γι' αυτό καλούνται αναπνεύσιμα (E.C. Technical Working Group on Particles 1996, Natural Resources Defense Council 1996b, Paterson 1995).



Εικόνα 2.4: Διεσδυτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό (Πηγή: Παπαγεωργίου, 2012)

2.4.2.2 Είσοδος διαμέσου του δέρματος

Οι χημικές ουσίες που μπορεί να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό διαμέσου του δέρματος και είναι σχεδόν όλες σε υγρή μορφή. Αντίθετα με τις υγρές, οι στερεές χημικές ουσίες, αέρια και ατμοί, δεν εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό διαμέσου αυτού. Μπορούν να εισέλθουν μόνο με την επίδραση της υγρασίας που υπάρχει στην επιφάνεια του δέρματος όταν διαλυθούν από αυτή.

Το δέρμα είναι η δεύτερη βασική οδός, διαμέσου της οποίας οι χημικές ουσίες που υπάρχουν στο εργασιακό περιβάλλον, μπορεί να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό. Το δέρμα αποτελείται από διάφορα στρώματα, βαθμίδες διαμερισμάτων συχνά συνδεδεμένων κυτάρων, τα οποία σχηματίζουν ένα εμπόδιο κατά των μολύνσεων, του νερού και μερικών χημικών ουσιών. Αυτό αποτελεί το εξωτερικό μέρος της επιδερμίδας και καλείται στρώμα κερατίνης.

Στο στρώμα κερατίνης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό η αντίσταση της εισόδου του νερού στον ανθρώπινο οργανισμό. Συμβάλλει επίσης στην αντίσταση της εισόδου των ασθενών οξέων και είναι λιγότερο αποτελεσματικό για οργανικούς διαλύτες και μερικές ανόργανες χημικές ουσίες. Οι χημικές ουσίες μπορούν να εισέλθουν στον

οργανισμό από σκασίματα, γδαρσίματα ή γραντζουνίσματα του δέρματος ευρισκόμενα στο προστατευτικό στρώμα.

2.4.2.3 Είσοδος διαμέσου του πεπτικού συστήματος

Όλες οι μορφές των χημικών ουσιών μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό διαμέσου του πεπτικού συστήματος. Οι χημικές ουσίες μπορεί να εισέλθουν στο στομάχι, είτε με την κατάποση μολυσμένης βλέννας η οποία έχει αποβληθεί από τους πνεύμονες ή τρώγοντας και πίνοντας μολυσμένες τροφές. Το φαγητό και το ποτό πολύ συχνά επιβαρύνονται από την επαφή με χέρια που δεν έχουν πλυθεί ή από την έκθεση τους στο εργασιακό περιβάλλον.

2.5 Επιπτώσεις

2.5.1 Επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό

Τα προβλήματα υγείας που αφορούν τους εργαζομένους στον μεταλλευτικό και λατομικό κλάδο, εστιάζονται στα σχετίζονται κυρίως με το αναπνευστικό σύστημα. Όπως είναι γνωστό, μη ειδικά συμπτώματα του αναπνευστικού, όπως ελάττωση αναπνευστικής λειτουργίας και μειωμένη ευαισθησία των αεραγωγών, αποτελούν πρώιμες απαντήσεις του αναπνευστικού στην επίδραση των εξωτερικών αιτιών που σχετίζονται με επαγγελματική έκθεση σε παράγοντες επικινδυνότητας.

Οι πνεύμονες είναι τα μόνα εσωτερικά όργανα του σώματος που έρχονται απ' ευθείας σε επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον, εισπνέοντας καθημερινά περίπου 12000 L αέρα. Στον αέρα αυτόν υπάρχουν διάφορες ουσίες, οι οποίες υπό ορισμένες συνθήκες, ιδίως επαγγελματικές, είναι αρκετά επιβλαβείς. Ο τρόπος και ο βαθμός αντίδρασης του πνευμονικού παρεγχύματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες της εισπνεόμενης ουσίας
- Ο χρόνος συνολικής έκθεσης
- Η ένταση της έκθεσης στην ουσία (πυκνότητα ουσίας στον αέρα)
- Η ικανότητα της ουσίας να εναποτίθεται στους πνεύμονες (αεροδυναμική διάμετρος των σωματιδίων)
- Η ύπαρξη αθροιστικής ή και πολλαπλασιαστικής συνέργειας με άλλους παράγοντες
- Η «ευπάθεια» του ατόμου

- Η λήψη ή μη προστατευτικών μέτρων

Ανάλογα με τα αίτια πρόκλησης των επαγγελματικών νοσημάτων των πνευμόνων, αλλά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, αυτά διακρίνονται σε 3 βασικούς τύπους (ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, 2007):

α. Νοσήματα που οφείλονται σε ανόργανες κόνεις. Αυτά ποικίλουν ως προς τη σοβαρότητα, από τις πιο ήπιες αλλοιώσεις, που προκαλούνται από τις μη ερεθιστικές και αδρανείς κόνεις (σίδηρος, βάριο, αντιμόνιο) ως τις πιο σοβαρές που οφείλονται σε κόνεις που προκαλούν ίνωση (πυρίτιο, τάλκης, αμίαντος).

β. Νοσήματα που οφείλονται σε αέρια και καπνούς (αμμωνία, φωσγένιο, χλωρίνη, διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου και καπνοί διαφόρων μετάλλων). Αυτά προκαλούν χημικό ερεθισμό στα τελικά βρογχιόλια και τις κυψελίδες και συνήθως προκαλούν πνευμονικό οίδημα, ενώ είναι δυνατή και η δευτεροπαθής λοίμωξη. Δεν έχει τεκμηριωθεί κατά πόσο η χρόνια έκθεση σε αυτά τα αέρια μπορεί να συνδέεται άμεσα με τη χρόνια βρογχίτιδα.

γ. Πνευμονική και υπεζωκοτική κακοήθεια. Το μεσοθηλίωμα του υπεζωκότα μπορεί να σχετίζεται με τον αμίαντο, ενώ ο βρογχογενής καρκίνος με το ουράνιο, το αρσενικό, τον αμίαντο, το ραδόνιο, το χρώμιο, το νικέλιο.

Η σκόνη που εισπνέεται συγκεντρώνεται στους πνεύμονες και προκαλεί αντίδραση των ιστών. Αυτή η ασθένεια των πνευμόνων ονομάζεται πνευμονοκονίαση. Αποτελεί ακόμα και σήμερα την πιο κοινή επαγγελματική ασθένεια που προκαλεί ανικανότητα προς εργασία. Η συνεχής έκθεση στη σκόνη αυξάνει το μέγεθος της προσβληθείσας περιοχής των πνευμόνων και βλάπτεται η αναπνευστική του ικανότητα. Σωματίδια διαμέτρου άνω των 10 μm εναποτίθενται στις αεροφόρους οδούς, έπειτα από πρόσκρουση ή καθίζηση και σπάνια φθάνουν στις κυψελίδες. Η μέγιστη εναπόθεση στις κυψελίδες αφορά σωματίδια διαμέτρου 1 - 2 μm . Μικρότερα σωματίδια (0,5 μm) απομακρύνονται με τον εκπνεόμενο αέρα και μικρός μόνο αριθμός τους διαχέεται και εναποτίθεται στις κυψελίδες. Η δομή των κυψελίδων σε αυτές τις περιοχές μπορεί να εκφυλισθεί σε "ινώδη μορφή" και να παραμείνει έτσι σαν μια μόνιμη βλάβη στον πνεύμονα.

Η δύσπνοια και η ανικανότητα για εργασία μπορεί να είναι τα αποτελέσματα πολυετούς έκθεσης σε σκόνη. Όταν γίνουν ινώδεις αλλοιώσεις στον πνεύμονα καταστρέφονται μόνιμα οι κυψελίδες. Αυτές οι αλλαγές δεν θεραπεύονται.

Παραδείγματα πνευμονοκονίασης με διάφορες επιπτώσεις στον πνεύμονα είναι πυριτίαση που προκαλείται από σκόνη χαλαζία και η αμιάντωση που προκαλείται από τη σκόνη αμιάντου. Αυτή η ασθένεια χαρακτηρίζεται από αργή καταστροφή που πνευμονικού ιστού που καθιστά δύσκολη την αναπνοή. Προκαλείται από την εισπνοή κόνεως που περιέχει κρυσταλλικό διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Αντίθετα με το κρυσταλλικό, το άμορφο διοξείδιο του πυριτίου δεν προκαλεί πυριτίαση. Πολλοί άνθρωποι έχουν πεθάνει από πυριτίαση. Το είδος της ασθένειας αυτής διευκολύνει την ανάπτυξη και εξάπλωση της φυματίωσης.

Επειδή το πυρίτιο συναντάται σε αφθονία, η έκθεση σε αερομεταφερόμενη σκόνη μπορεί να συμβεί σε πάρα πολλές περιπτώσεις, όπως:

- Ορυχεία γρανίτη, χαλαζία, σχιστόλιθου
- Λατομεία χρυσού, ψευδαργύρου, ουρανίου, αμιάντου, αργύρου
- Διάνοιξη σηράγγων
- Αμμοβολή
- Πλινθοποιεία
- Χυτήρια μετάλλων
- Οικοδομικές εργασίες
- Ορισμένες βιομηχανίες αμαλγαμάτων

2.5.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Η αέρια σωματιδιακή ύλη που παράγεται από τις παραγωγικές κατεργασίες στους μεταλλευτικούς χώρους, αλλά και γενικότερα όλοι οι αερομεταφερόμενοι ρύποι, δρώντας ως φίλτρο μειώνουν και αλλοιώνουν την ηλιακή ακτινοβολία οδηγώντας σε ελάττωση της γεωργικής παραγωγής στις αγροτικές περιοχές. Πιο ειδικά, επιδρούν στο κλίμα, ανάλογα με το μέγεθος και το βαθμό ανάκλασης των σωματιδίων. Αυτά ανακλούν τη μικρού μήκους ή μεγάλου μήκους κύματος υπεριώδη ακτινοβολία που εισέρχεται στη γη, επιφέροντας αντίστοιχα ψύξη ή θέρμανση της ατμόσφαιρας. Παράλληλα, δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης, προκαλώντας το σχηματισμό σταγόνων και στερώντας έτσι τα σύννεφα πρώτιστα από τα ογκωδέστερα των σταγονιδίων τους. Αυξάνουν τη ζωή των σύννεφων, αλλά και τη χημική ρύπανση των σταγόνων (όξινη βροχή). Τέλος, προκαλούν επιφανειακές αλλοιώσεις σε σχεδόν κάθε επιφάνεια του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος φυτά, δένδρα, μεταλλικές επιφάνειες,

υφάσματα, χρωματισμένες επιφάνειες, ηλεκτρονικά κυκλώματα κ.α. μέσω της διάβρωσης και της επικάλυψης.

2.6 Προστασία της υγείας

Τα μέτρα αντιμετώπισης της σκόνης στην εξορυκτική βιομηχανία εντάσσονται σε δυο κατηγορίες:

- Τεχνικά μέτρα και οργανωτικά μέτρα προστασίας
- Μέσα ατομικής προστασίας

2.6.1 Οργανωτικά μέτρα προστασίας

Στα πλαίσια οργανωτικών παρεμβάσεων στο εργασιακό περιβάλλον, ως πρώτη επιλογή για την αντιμετώπιση ενός κινδύνου για την υγεία και την ασφάλεια είναι η εξάλειψη της ίδιας της πηγής του προβλήματος (στην περίπτωση μας η αποφυγή δημιουργίας σκόνης, καπνών, αερίων ή ατμών υιοθετώντας μία άλλη παραγωγική διαδικασία). Εάν η εξάλειψη δεν είναι εφικτή, απαιτούνται μέτρα ελέγχου της απελευθέρωσης των ουσιών όπως για παράδειγμα χρήση κατάλληλων συστημάτων περισυλλογής σκόνης ή μείωση αυτής με συστήματα γενικής και τοπικής απαγωγής (σε εσωτερικούς χώρους όπου πραγματοποιούνται συντηρήσεις μηχανημάτων), διαβροχή του εδάφους πριν την έναρξη νέων εργασιών καθώς και κατάλληλα συστήματα εξαερισμού (σε περιπτώσεις υπόγειων μεταλλείων)

Επίσης, μέτρο προστασίας θεωρείται η δημιουργία ενός προγράμματος ελέγχου των βλαπτικών παραγόντων στο εργασιακό περιβάλλον, σε συνδυασμό με τη συχνή παρακολούθηση των εργαζομένων από ιατρούς εργασίας.

Τέλος, μέτρα όπως η κυκλική εναλλαγή των εργαζομένων στις θέσεις εργασίας, η ύπαρξη προγράμματος τακτικής εκπαίδευσης και επιμόρφωσης των εργαζομένων σε θέματα υγείας και ασφάλειας εργασίας συντελεί προσθετικά στην προστασία της υγείας και την πρόληψη εργατικών ατυχημάτων.

2.6.2 Μέσα ατομικής προστασίας

Στην περίπτωση, κατά την οποία οι οργανωτικές παρεμβάσεις, δεν επιφέρουν δραστικά αποτελέσματα και η προστασία των εργαζομένων δεν μπορεί να εξασφαλιστεί από αυτές, υπάρχει νομική υποχρέωση για τη χορήγηση κατάλληλων μέσων ατομικής προστασίας. Όσον αφορά στην προστασία από την έκθεση του εργαζομένου σε σκόνη

τα μέτρα ατομικής προστασίας μπορεί να είναι ειδικές μάσκες, κατάλληλου τύπου γυαλιά για την προστασία των ματιών, καθώς και γάντια για την κάλυψη των χεριών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η χρήση των μέσων να είναι περιορισμένη στα απολύτως απαραίτητα χρονικά διαστήματα, ώστε να παρεμποδίζει όσο το δυνατόν λιγότερο τις φυσικές κινήσεις του εργαζομένου.

Συγκεκριμένα, σχετικά με την αναπνοή χρησιμοποιούνται ειδικά φίλτρα για τον καθαρισμό του εισπνεόμενου αέρα του άμεσου περιβάλλοντος από τα αιωρούμενα τοξικά αέρια ή τη σκόνη. Τα φίλτρα εξαρτώνται από την ατμόσφαιρα του εργασιακού περιβάλλοντος.



Εικόνα 2.5: Μάσκα προσώπου μίας χρήσης με βαλβίδα εκπνοής (Πηγή: 3M)



Εικόνα 2.6: Μάσκα με φίλτρα ολόκληρου προσώπου (Πηγή: 3M)

Επίσης, απαραίτητη είναι η χρήση γαντιών για την πρόληψη ερεθισμών του δέρματος καθώς και ειδικές μάσκες για την προστασία των ματιών από την έκθεση σε χημικούς παράγοντες.



Εικόνα 2.7: Προστατευτικά γυαλιά (Πηγή: 3M)



Εικόνα 2.8: Προστατευτικά γάντια (Πηγή: 3M)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΚΟΝΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Ο ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός των βλαπτικών παραγόντων του εργασιακού περιβάλλοντος εντάσσεται στις διαδικασίες εκτίμησης του επαγγελματικού κινδύνου. Ξεκινά με τη φάση του «εντοπισμού των πηγών κινδύνου» και την «εξακρίβωση των κινδύνων έκθεσης». Ολοκληρώνεται με τη φάση της «εκτίμησης» με την καταγραφή των αναλυτικών αποτελεσμάτων, την περιγραφή της θέσης δειγματοληψίας, την ημερομηνία και ώρα της δειγματοληψίας, την περιγραφή του εξοπλισμού και της ακολουθούμενης μεθοδολογίας για τη δειγματοληψία και ανάλυση καθώς και την οριακή τιμή αναφοράς και σύγκρισης. Η επιλογή των ποσοτικών και ποιοτικών μεθόδων εκτίμησης καθώς και η εφαρμογή των Οριακών Τιμών Έκθεσης πρέπει να καθορίζονται, με δεδομένη την δωρη ημερήσια απασχόληση και την εργάσιμη εβδομάδα των 40 ωρών.

3.2 Μέθοδοι δειγματοληψίας χημικών παραγόντων

Οι μέθοδοι μέτρησης των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων των χημικών ρύπων, μπορούν να καταταγούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- τις αναλυτικές μεθόδους («έμμεση» μεθοδολογία)
- τις μεθόδους απευθείας μέτρησης («άμεση» μεθοδολογία)

3.2.1 Μέθοδοι αναλυτικής δειγματοληψίας

Ως μέθοδοι αναλυτικής δειγματοληψίας εννοούνται οι **μέθοδοι ξεχωριστής δειγματοληψίας** στον αέρα, με ειδικά όργανα, όπου για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των χημικών παραγόντων απαιτείται μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης η μεταφορά των δειγμάτων και η ανάλυσή τους σε εργαστήριο με κατάλληλο εξοπλισμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με τον όρο ανάλυση του δείγματος εννοούμε εκτός από την χημική ανάλυση και κάθε άλλου τύπου εξέταση ή χειρισμό του δείγματος, που αποβλέπει στον προσδιορισμό της ποσότητας του χημικού παράγοντα (όπως για παράδειγμα ζύγιση του δείγματος, ανάλυσή του στο μικροσκόπιο κ.ά.)

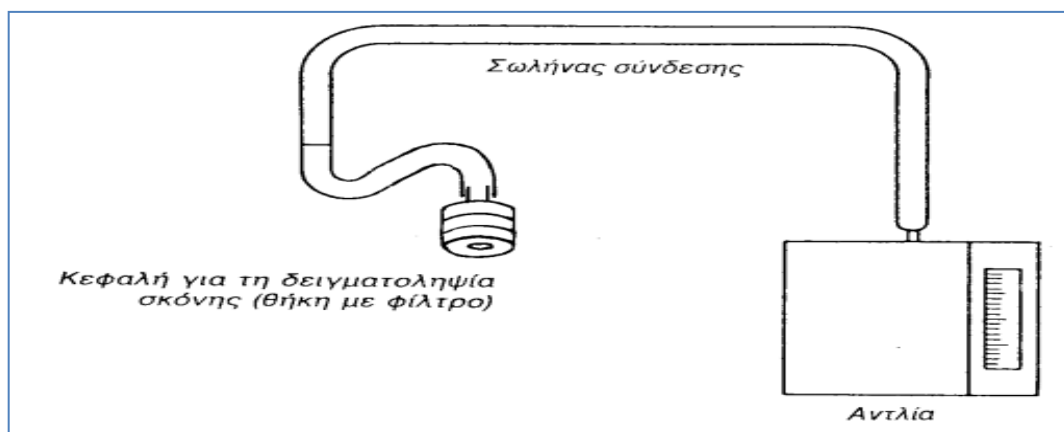
Οι μέθοδοι της ξεχωριστής δειγματοληψίας και τα σχετικά όργανα ποικίλλουν ανάλογα με τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του παράγοντα, το είδος της

εργαστηριακής ανάλυσης του δείγματος και το σκοπό της μέτρησης. Είναι σαφές ότι αν εντοπιστούν λάθη κατά την διεξαγωγή της δειγματοληψίας ακόμα και η πιο σωστή και ακριβής ανάλυση θα δώσει λανθασμένα αποτελέσματα, ως προς τη συγκέντρωση του παράγοντα στο χώρο εργασίας.

Η αναλυτική μέθοδος αποτελείται από δύο διαφορετικές φάσεις, τη φάση της δειγματοληψίας και τη φάση της ανάλυσης του δείγματος. Η φάση της δειγματοληψίας απαιτεί τη δέσμευση (σύλληψη) μιας ποσότητας του χημικού παράγοντα με τον κατάλληλο εξοπλισμό. Πραγματοποιείται στον υπό εξέταση εργασιακό χώρο και απαιτεί κατάλληλα όργανα. Τα όργανα δειγματοληψίας αποτελούνται από τον εξής βασικό εξοπλισμό:

- μία φορητή αντλία αναρρόφησης, με σύστημα ρύθμισης της παροχής και, σε ορισμένες περιπτώσεις, μηχανισμό σταθεροποίησης της στην επιθυμητή τιμή (Συστήνεται να είναι εφοδιασμένη με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες).
- κεφαλή δειγματοληψίας αποτελούμενη από τη θήκη του φίλτρου και το φίλτρο, με κατάλληλο στόμιο για την είσοδο του δείγματος αέρα.
- σωλήνας σύνδεσης της κεφαλής δειγματοληψίας με την αντλία.
- ταξινομητής-επιλογέας, αν είναι επιθυμητή η δειγματοληψία του αναπνεύσιμου κλάσματος των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων.

Πολλές φορές απαιτείται και περαιτέρω βοηθητικός εξοπλισμός δειγματολήπτη ο οποίος αποτελείται από μετρητή παροχής, φορτιστή (αν η αντλία λειτουργεί με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες), μετρητή χρόνου, χρονοδιακόπτη κ.ά.



Εικόνα 3.1: Ατομικός δειγματολήπτης (Πηγή: Υπουργείο Ασφ. & Κοιν. Πρόνοιας, 1996)

Ως παράδειγμα αναλυτικού προσδιορισμού αναφέρεται αυτός των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (σκόνης) στον εργασιακό χώρο. Η αναλυτική μέθοδος που

χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό προσδιορισμό της σκόνης είναι η σταθμική μέθοδος της «διαφοράς βάρους του φίλτρου», διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Αυτή, βασίζεται στην αναρρόφηση μίας γνωστής ποσότητας ατμοσφαιρικού αέρα. Το δείγμα του αέρα διέρχεται με τη βοήθεια αντλίας με ορισμένη παροχή μέσω φίλτρου, στο οποίο αποθέτονται (δεσμεύονται) όλα τα αιωρούμενα σωματίδια.

Ακολουθεί ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των σωματιδίων στο εργαστήριο και υπολογισμός της συγκέντρωσης των αντίστοιχων χημικών παραγόντων στο εργασιακό περιβάλλον ή της ατομικής έκθεσης των εργαζομένων.

Για τη δειγματοληψία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν κάθε είδους χημικοί παράγοντες με τη μορφή αιωρούμενων σωματιδίων στερεών ή υγρών στον αέρα των χώρων εργασίας. Χημικούς παράγοντες που μπορεί να έχουν προκύψει από διαφυγή ή διασπορά κατά την παραγωγική διαδικασία, από συμπύκνωση ατμών καθώς και από άλλες αιτίες (σκόνη, ίνες, καπνοί, κ.ά.).

Η διαθέσιμη μεγάλη ποικιλία σύγχρονου εξοπλισμού (αντλίες, κεφαλές δειγματοληψίας, φίλτρα, ταξινομητές-επιλογείς κ.ά.) επιτρέπει τη διενέργεια βραχυχρόνιων ή μακροχρόνιων δειγματοληψιών, “ατομικών” ή “στατικών” ανάλογα με τη φύση και τις ιδιότητες των χημικών παραγόντων, τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, το σκοπό της δειγματοληψίας, το είδος και τα όρια ανίχνευσης της εργαστηριακής μεθόδου ανάλυσης κ.ά.

Με τις σύγχρονες μεθόδους, η επίδραση της δειγματοληψίας πάνω στη σύσταση και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων είναι περιορισμένη, συνεπώς διευκολύνεται σε ορισμένες περιπτώσεις η ανάλυσή τους απευθείας πάνω στα φίλτρα με την κατάλληλη εργαστηριακή μέθοδο (π.χ. μέτρηση αριθμού σωματιδίων σε οπτικό μικροσκόπιο, ανάλυση σε περιθλασίμετρο ακτίνων X κ.ά.)

Πολλές φορές, απαιτείται εκπαιδευμένο προσωπικό, τόσο για την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού, όσο και για την εφαρμογή των μεθόδων. Είναι επίσης αναγκαία η προετοιμασία και η προρύθμιση του εξοπλισμού και ο συνεχής έλεγχος της λειτουργίας του και της πορείας της δειγματοληψίας.

Στο συγκεκριμένο πείραμα αποτελεί αντικείμενο μελέτης η μέτρηση των κλασμάτων PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 με σκοπό τη σύγκριση των μεθόδων. Για το λόγο αυτό είναι εύκολο να προσαρμοστεί ο τρόπος της δειγματοληψίας τους με τη χρήση ενός

κατάλληλου εξαρτήματος (ταξινομητή-επιλογέα). Αυτό προστίθεται στην κεφαλή δειγματοληψίας πριν από το φίλτρο για να ταξινομήσει τη σκόνη που περιέχεται στο δείγμα του αέρα και μέσω αυτού να διαχωριστούν και αφαιρεθούν από το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων, αυτά που είναι μεγαλύτερα από ένα ορισμένο μέγεθος. Έτσι, αποθέτονται πάνω στο φίλτρο και προσδιορίζονται κατά την ανάλυσή του μόνο τα σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από ένα προκαθορισμένο. Αυτή η δυνατότητα βρίσκει κυρίως εφαρμογή στην επιλογή σωματιδίων τα οποία θεωρείται ότι μπορούν λόγω του εξαιρετικά μικρού μεγέθους τους να εισχωρήσουν μέχρι τις κυψελίδες των πνευμόνων των εργαζομένων κατά την εισπνοή τους. Στη συνέχεια αναλύεται διεξοδικά ο βασικός εξοπλισμός του οργάνου δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση του πειραματικού μέρους της εργασίας αυτής.

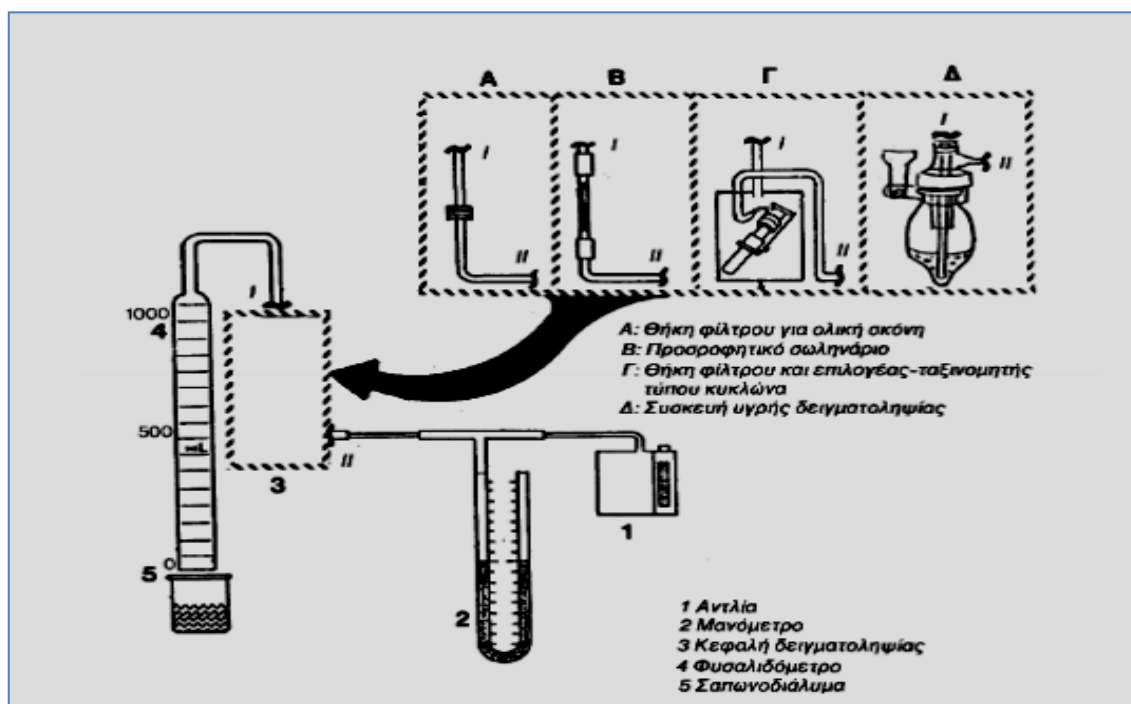
3.2.1.1 Παροχή του αέρα στο δειγματολήπτη (παροχή αντλίας)

Από τη ρύθμιση της παροχής της αντλίας, καθώς και τον τύπο, το σχήμα και τις διαστάσεις της θήκης του φίλτρου και του στομίου εισόδου του αέρα εξαρτάται η ταχύτητα εισόδου του αέρα στο δειγματολήπτη η οποία διαμορφώνεται βάσει της σχέσης $V = Q/P$ (όπου V η ταχύτητα εισόδου του αέρα, Q η παροχή και P η επιφάνεια του στομίου εισόδου) και της μορφής της ροής του (στρωτή ή στροβιλώδης).

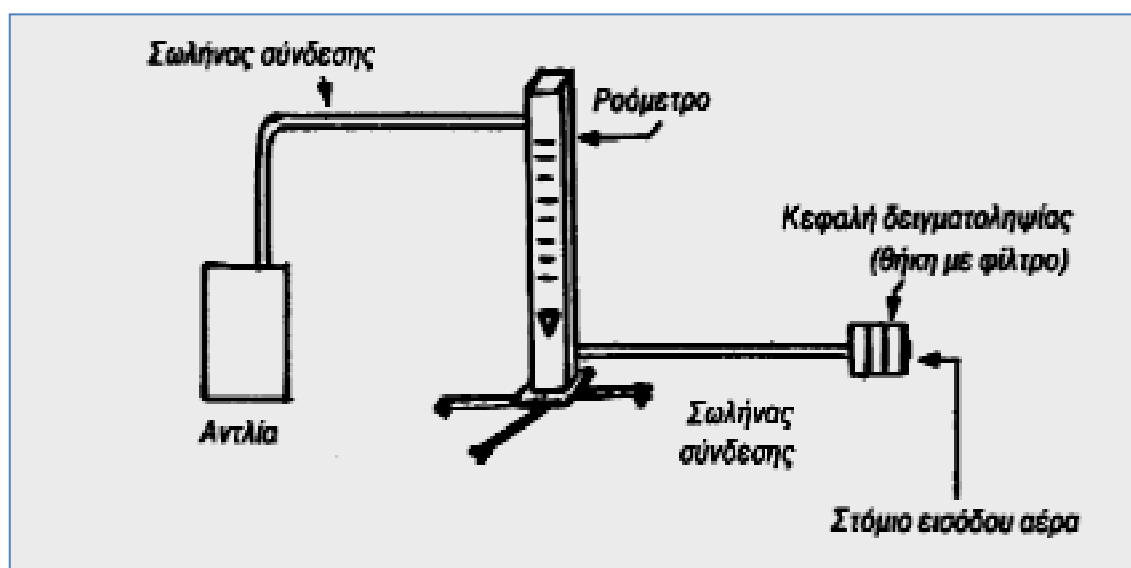
Από την ταχύτητα εισόδου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος των σωματιδίων, που θα παρασυρθούν και θα εισέλθουν στον δειγματολήπτη (με μεγαλύτερη ταχύτητα εισέρχονται μεγαλύτερα σωματίδια), ενώ έντονοι στροβιλισμοί του αέρα στη θήκη του φίλτρου αυξάνουν τον κίνδυνο απόθεσης τμήματος των αιωρούμενων σωματιδίων στα τοιχώματα της θήκης αντί στο φίλτρο.

Επίσης από την παροχή, σε συνάρτηση με το χρόνο δειγματοληψίας, εξαρτάται, όπως είναι ευνόητο, ο συνολικός όγκος του δείγματος αέρα (Όγκος = Παροχή X Χρόνος) και για ορισμένη συγκέντρωση του χημικού παράγοντα στον αέρα η ποσότητα του παράγοντα στο δείγμα. Η ποσότητα αυτή πρέπει να ξεπερνά ένα ελάχιστο όριο, που προκαθορίζεται από την εργαστηριακή μέθοδο, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του δείγματος, ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση και ο ακριβής προσδιορισμός του (όριο ανίχνευσης ή ευαισθησία της εργαστηριακής μεθόδου). Μερικές φορές προκαθορίζεται και η μέγιστη επιτρεπτή ποσότητα του παράγοντα ή του

συνόλου της σκόνης πάνω στο φίλτρο.



Εικόνα 3.2: Βαθμονόμηση αντλίας με φυσαλιδόμετρο και έλεγχος σταθερότητας της παροχής
(Πηγή: ΥΠ.Α.Κ.Π., 1996)



Εικόνα 3.3: Βαθμονόμηση αντλίας με ροόμετρο ((Πηγή: ΥΠ.Α.Κ.Π., 1996)

3.2.2.2 Κεφαλή δειγματοληψίας

Η κεφαλή δειγματοληψίας (Εικόνα 3.4) είναι συνήθως κυλινδρικού ή κωνικού σχήματος. Διακρίνεται σε "ανοικτού" τύπου όταν δεν φέρει κάλυμμα, ή "κλειστού" τύπου όταν φέρει κάλυμμα, που έχει στο μέσο του κυκλική οπή (στόμιο) μικρής διαμέτρου για την είσοδο του δείγματος αέρα. Τα χαρακτηριστικά της θήκης του φίλτρου πρέπει να διευκολύνουν τη στρωτή ροή του αέρα και την ομοιόμορφη απόθεση πάνω στο φίλτρο της αιωρούμενης σκόνης και να αποτρέπουν την επικάθησή της στα εσωτερικά τοιχώματα της θήκης (περίπτωση έντονα στροβιλώδους ροής). Οι κεφαλές δειγματοληψίας, ανάλογα με την υπό προσδιορισμό ουσία, μπορεί να είναι φιάλες με χημικό μέσο κατακράτησης (κεφαλές υγρής δειγματοληψίας), φιαλίδια με ενεργό άνθρακα ή άλλο προσροφητικό υλικό, θήκες (μεταλλικές ή πλαστικές) για φίλτρα μεμβράνης από εστέρες κυτταρίνης ή υαλοβάμβακα και άλλα υλικά.



Εικόνα 3.4: Πλαστική κεφαλή δειγματοληψίας τύπου κυκλώνα (Πηγή: SKC)

3.2.2.3 Φίλτρο

Ο τύπος και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φίλτρου (Εικόνα 3.5) εξαρτώνται κυρίως από τον παράγοντα και την εργαστηριακή μέθοδο, που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του δείγματος. Άλλα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη είναι οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας στο χώρο εργασίας, ο επιθυμητός βαθμός δέσμευσης των αιωρούμενων σωματιδίων και αντίστασης του φίλτρου στη δίοδο του αέρα κ.ά.

Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα σήμερα φίλτρα είναι τα φίλτρα "μεμβράνης", που κατασκευάζονται από μικτούς εστέρες κυτταρίνης, ή πολυμερές βινυλοχλωρίδιο, ή άργυρο ή άλλα υλικά. Χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο σταθερό πορώδες, μικρό βάρος και απόθεση των σωματιδίων στην επιφάνειά τους με υψηλό βαθμό δέσμευσης.

Επιτρέπουν την εξέταση και ανάλυση του δείγματος είτε απευθείας πάνω στο φίλτρο, είτε μετά από διάλυση του σε κατάλληλα διαλύματα, ανάλογα με την ακολουθούμενη εργαστηριακή μέθοδο. Μερικά φίλτρα μεμβράνης είναι υδρόφοβα και δεν απορροφούν υγρασία και αυτό αποτελεί ιδιαίτερο πλεονέκτημα στην περίπτωση "σταθμικού" προσδιορισμού της αιωρούμενης σκόνης σε χώρους με μεγάλη υγρασία (Κατά το "σταθμικό" προσδιορισμό ζυγίζεται το φίλτρο πριν και μετά τη δειγματοληψία και το βάρος της σκόνης προκύπτει από τη διαφορά).



Εικόνα 3.5: Φίλτρο μεμβράνης (Πηγή: SKC)

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται φίλτρα κατασκευασμένα από ίνες διαφόρων ινωδών υλικών. Πλεονεκτούν συγκριτικά με τα φίλτρα μεμβράνης ως προς τη συνολική ποσότητα των σωματιδίων, που μπορούν να δεσμεύσουν τόσο στην επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό τους πλέγμα και τη μειωμένη αντίσταση, που παρουσιάζουν στη δίοδο του αέρα. Μειονεκτούν όμως αντίστοιχα γιατί δεν έχουν συγκεκριμένο σταθερό πορώδες, απορροφούν αρκετή υγρασία, και υπάρχει κίνδυνος διαφυγής μέρους του δείγματος μέσω του πλέγματος τους ή ρύπανσης του δείγματος από το υλικό του φίλτρου. Τα μειονεκτήματα αυτά είναι περιορισμένα στα φίλτρα από ίνες υάλου.

3.2.2.4 Επιλογέας – ταξινομητής

Από τον τύπο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του επιλογέα-ταξινομητή, σε συνάρτηση με την παροχή του αέρα εξαρτάται η ταξινόμηση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και ο διαχωρισμός του αναπνεύσιμου κλάσματος τους.

Οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι επιλογείς στις "ατομικές" δειγματοληψίες είναι τύπου "κυκλώνα", έχουν μικρό μέγεθος και προσαρμόζονται στην κεφαλή δειγματοληψίας πριν από τη θήκη του φίλτρου. Ο κυκλώνας φέρει κατάλληλο στόμιο για την είσοδο του αέρα, ο οποίος υποβάλλεται μέσα στον κυκλώνα σε περιστροφική

φυγοκεντρική κίνηση κατά την οποία τα μεγαλύτερα από ένα ορισμένο μέγεθος σωματίδια (συνήθως "αεροδυναμικής διαμέτρου" μεγαλύτερης από 7 μm ή 10 μm ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κυκλώνα) πέφτουν πάνω στα εσωτερικά τοιχώματα του κυκλώνα και κατακαθίζουν σε ειδική υποδοχή στη βάση του. Τα μικρότερα σωματίδια εξακολουθούν και αιωρούνται στον αέρα, που εξέρχεται από τον κυκλώνα και κατά την πορεία του μέσω της θήκης του φίλτρου προς την αντλία, αποθέτονται (δεσμεύονται) πάνω στο φίλτρο.

Υπάρχουν και άλλου τύπου επιλογείς, στους οποίους ο διαχωρισμός βασίζεται περισσότερο στις δυνάμεις της βαρύτητας και στις οριακές ταχύτητες πτώσης των σωματιδίων. Οι επιλογείς αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται συνήθως, ανάλογα με το σχήμα και τη θέση τους, σαν "κατακόρυφοι" ή "οριζόντιοι" ταξινομητές-επιλογείς και βρίσκουν ιδιαίτερα εφαρμογή σε δειγματολήπτες, που χρησιμοποιούνται σε "στατικές" δειγματοληψίες.

3.2.2 Μέθοδοι απευθείας μέτρησης

Άλλη κατηγορία αποτελούν **οι μέθοδοι απευθείας μέτρησης**, κατά τις οποίες παράλληλα με τη δειγματοληψία γίνεται στο ίδιο το όργανο ανάλυση του δείγματος και προσδιορισμός της συγκέντρωσης του χημικού παράγοντα. Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι απευθείας μέτρησης είναι συνήθως σχετικά απλές στην εφαρμογή τους και δεν απαιτούν μεγάλες επενδύσεις σε όργανα μετρήσεων. Αντίθετα, οι μέθοδοι ξεχωριστής δειγματοληψίας και ανάλυσης του δείγματος απαιτούν ιδιαίτερα σοβαρές επενδύσεις για τον εργαστηριακό εξοπλισμό καθώς και εξειδικευμένο προσωπικό για τον χειρισμό του.

Οι μέθοδοι της απευθείας μέτρησης χημικών αιωρούμενων ουσιών δίνουν τη δυνατότητα άμεσου προσδιορισμού (ποιοτικού και ποσοτικού) του χημικού παράγοντα. Είναι σχετικά απλές και κατάλληλες για μετρήσεις κινδύνου σε περιπτώσεις διαφυγής αερίων ή για έκτακτες μετρήσεις σε επικίνδυνους χώρους, όπου απαιτείται ο άμεσος προσδιορισμός του βλαπτικού παράγοντα για τη λήψη κατάλληλων μέτρων προστασίας.

Κατά τη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιούνται κατάλληλα μόνιμα ή φορητά όργανα, τα οποία διενεργούν ταυτοχρόνως δειγματοληψία και ποσοτικό προσδιορισμό στον αέρα και δίνουν απευθείας το αποτέλεσμα (π.χ. συγκέντρωση σκόνης κατά βάρος) με ψηφιακή ή αναλογική ένδειξη. Τα όργανα έχουν μία "ευαίσθητη ζώνη" όπου λαμβάνει

χώρα μεταβολή σε μία χαρακτηριστική ιδιότητα (οπτική, ηλεκτρική κ.ά.), η οποία σχετίζεται άμεσα με τη συγκέντρωση ή την κατανομή κατά μέγεθος των αιωρούμενων στο δείγμα αέρα σωματιδίων.

Χρησιμοποιούνται συνήθως για βραχυχρόνιες προκαταρκτικές (ανιχνευτικές) μετρήσεις της συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων σε χώρους ή θέσεις εργασίας, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις, που δεν υπάρχει μεγάλη ποικιλία ρύπων και δεν ενδιαφέρει τόσο η ποιοτική σύνθεση και η ακριβής τιμή της συγκέντρωσής τους, όσο η διακύμανσή της από χώρο σε χώρο. Σημαντική είναι η χρήση τους στην ανίχνευση ατελειών ή βλαβών στα συστήματα εξαερισμού, που οδηγούν σε διαφυγές ή εκπομπές στερεών σωματιδίων στον αέρα των χώρων εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΔΕΙΓΜΑΤΑ

4.1 Διαδικασία πειράματος

Η διαδικασία μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης σε εργαστηριακό περιβάλλον περιελάμβανε τα παρακάτω:

- Σε απαγωγό (Εικόνα 4.1) διασκορπίστηκε μικρή ποσότητα λεπτόκοκκης ορυκτής σκόνης, γνωστής σύστασης και κοκκομετρίας και στη συνέχεια με χρήση πεπιεσμένου αέρα αναδεύτηκε και δημιουργήθηκε ατμόσφαιρα επιβαρυμένη σε σκόνη (προσομοίωση εργασιακού χώρου λατομείων ορυχείων)

- Εντός του απαγωγού τοποθετήθηκαν οι τρεις διαφορετικές συσκευές μέτρησης με τέτοιο τρόπο ώστε οι κεφαλές δειγματοληψίας τους να βρίσκονται στο ίδιο ύψος. Η συνθήκη αυτή είναι αναγκαία για την αντιμετώπιση της επίδρασης του φαινομένου της καθ' ύψος κοκκομετρικής διαστρωμάτωσης της σκόνης.



Εικόνα 4.1: Θάλαμος δημιουργίας της ατμόσφαιρας αέρα-σκόνης για τη διεξαγωγή των μετρήσεων και όργανα μέτρησης τοποθετημένα εντός του θαλάμου.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της τεχνητής ατμόσφαιρας σκόνης εντός του θαλάμου ήταν:

- παιπάλη ασβεστολιθικού πετρώματος
- υδράσβεστος σε σκόνη
- γη διατόμων
- μικροτσιμέντο (υπέρλεπτο τσιμέντο τύπου Portland).

Η επιλογή των παραπάνω υλικών έγινε με κριτήριο το γεγονός ότι ήταν διαθέσιμα σε μορφή ιδιαίτερα λεπτόκοκκης σκόνης και άρα ήταν δυνατή η δημιουργία αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα και επιπλέον κάποια από αυτά συναντώνται σε λατομεία-μονάδες παραγωγής ασβέστου και σκυροδέματος (ασβεστολιθική παιπάλη, υδράσβεστος, και μικροτσιμέντο), ενώ η γη διατόμων περιέχει ορυκτά που συναντώνται συχνά σε μεταλλεία (χαλαζίας, κ.α.).

Οι μετρήσεις διήρκησαν εννέα ώρες (τρεις για το κάθε κλάσμα των 10 μ m, 2,5 μ m και 1 μ m) για το κάθε υλικό. Με κατάλληλο συγχρονισμό της ώρας έναρξης, τα μηχανήματα τέθηκαν σε ταυτόχρονη λειτουργία για τρεις ώρες. Πριν και μετά το πέρας της διαδικασίας μετρήθηκαν αντίστοιχα οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, ώστε να μπορούν να θεωρηθούν συγκρίσιμες για κάθε μία από τις περιπτώσεις.

Η πρώτη σειρά μετρήσεων έγινε με σκόνη από ασβεστολιθική παιπάλη. Πέντε λεπτά πριν την έναρξη της των μετρήσεων διασκορπίστηκε χειρωνακτικά στον αέρα του θαλάμου της απαγωγού εστίας ποσότητα του υλικού και ξεκίνησε το πείραμα χωρίς καμία άλλη παρεμβολή κατά τη διάρκεια των τριών ωρών. Η δεύτερη σειρά μετρήσεων έγινε με σκόνη από υδράσβεστο. Διασκορπίστηκε η σκόνη και πραγματοποιήθηκε ισχυρή ανάδευση της με ειδικό όργανο εμφύσησης αέρα πέντε λεπτά πριν την έναρξη του πειράματος. Η τρίτη σειρά μετρήσεων έγινε με σκόνη μικροτσιμέντου. Αυτή τη φορά, πραγματοποιήθηκε και ανάδευση αέρα-σκόνης του θαλάμου κατά τη διάρκεια της μέτρησης ανά 30 min. Τέλος, η τέταρτη σειρά μετρήσεων έγινε με σκόνη από γη διατόμων με παρόμοιο τρόπο με την τρίτη σειρά μετρήσεων με τη διαφορά ότι η ανάδευση αέρα-σκόνης του θαλάμου κατά τη διάρκεια της μέτρησης έγινε ανά 15 min.

Οι περιοδικές αναδεύσεις του αέρα-σκόνης του θαλάμου έγιναν με σκοπό να εκτιμηθεί η ευαισθησία του κάθε οργάνου σε απότομες μεταβολές των συγκεντρώσεων της σκόνης, αφού είναι γνωστό ότι κάτι τέτοιο είναι σύνηθες κατά τις φάσεις φόρτωσης και απόθεσης των υλικών στα λατομεία και στα ορυχεία.

4.2 Τα όργανα μέτρησης σκόνης

Για τη διεξαγωγή των άμεσων μετρήσεων της συγκέντρωσης της σκόνης χρησιμοποιήθηκαν δύο φωτόμετρα σκέδασης ενισχυμένου φωτός (laser) της εταιρείας TSI:

- το DustTrak Airborne Particle Monitor 8520 και
- το AeroTrak Particle Counter 9306

Για τη μέτρηση της μέσης συγκέντρωσης της σκόνης με τη βαρυτομετρική μέθοδο (διαφορά βάρους φίλτρο) χρησιμοποιήθηκε η αντλία PCXR8 της SKC με κεφαλή δειγματοληψίας για το αναπνεύσιμο κλάσμα (PM10) τύπου κυκλώνα (από ειδικό αντιστατικό πλαστικό) και φίλτρο από υαλονήματα για τη συλλογή της σκόνης .

Η σκέδαση του φωτός από μικρά αιωρούμενα σωματίδια αποτελεί συνήθη μέθοδο για την απόκτηση πληροφοριών σχετικά με τη συγκέντρωση των σωματιδίων. Τα δύο πρώτα όργανα που αναφέρθηκαν, βασίζονται σε αυτήν την αρχή μετρώντας τα αερομεταφερόμενα σωματίδια σε πραγματικό χρόνο. Κάθε τεχνολογία μέτρησης έχει μία μοναδική ευαισθησία σχεδιασμένη πάνω σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των σωματιδίων όπως το μέγεθος, την πυκνότητα, τον όγκο του σωματιδίου, τη μορφολογία και το δείκτη διάθλασης του. Τα δύο όργανα βασίζονται στη σκέδαση του εκπεμπόμενου φωτός από κατάλληλη πηγή ορατού ή υπέρυθρου φωτός που προκαλείται από τη διέλευση των αιωρούμενων στο δείγμα αέρα σωματιδίων. Μετρούν τον αριθμό των σωματιδίων στη μονάδα όγκου του αέρα καθώς και απευθείας τη συγκέντρωση αυτών στη μονάδα του όγκου.

Αντίθετα, η αναλυτική μέθοδος μέτρησης της συγκέντρωσης δείγματος σκόνης απαιτεί τη δέσμευση (σύλληψη), μιας ποσότητας σκόνης και στη συνέχεια τη μεταφορά του δείγματος σε εργαστήριο για την ποσοτική ανάλυση με ειδικό εξοπλισμό. Μετρά διαφορά βάρους του φίλτρου, αποτέλεσμα που ανάγεται σε μονάδες συγκέντρωσης σκόνης.

4.2.1 Όργανο άμεσης μέτρησης συγκέντρωσης σκόνης τύπου DustTrak Particle Monitor

Το όργανο TSI DustTrak Airborne Particle Monitor 8520 αποτελεί ένα φορητό όργανο άμεσης μέτρησης της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Η μέτρηση της συγκέντρωσης της

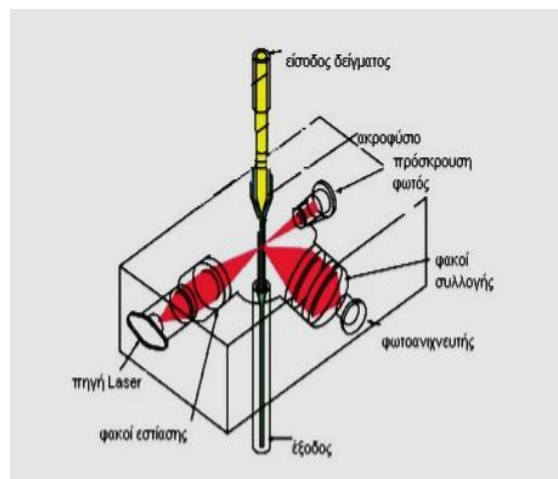
σκόνης βασίζεται στην αρχή της σκέδασης του φωτός από αιωρούμενα σωματίδια. Διαθέτει ενσωματωμένη αντλία, εσωτερική μνήμη και data-logger για την αυτόματη αποθήκευση των μετρούμενων τιμών (κινητών μέσων όρων) σε προγραμματιζόμενα διαστήματα καθώς και τη δυνατότητα μετάδοσης των μετρούμενων τιμών σε H/Y. Μετρά το κλάσμα PM_{10} καθώς και τα αναπνεύσιμα κλάσματα κατά ΕΛΟΤ EN 481, $PM_{2.5}$ και PM_1 . Η συσκευή είναι βαθμονομημένη με πρότυπη σκόνη κατά ISO 12103-1 (A1 test dust).

Αρχή λειτουργίας του οργάνου DustTrak Particle Monitor

Η λειτουργία του οργάνου αυτού βασίζεται στη σκέδαση του φωτός (σκέδαση Tyndall) προκειμένου να μετρήσει τη συγκέντρωση της σκόνης του αέρα. Το όργανο αυτό είναι ένα φωτόμετρο σκέδασης με δική του ενσωματωμένη αντλία δειγματοληψίας αέρα (Εικόνες 4.2 και 4.3). Μπορεί και μετρά τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων συγκεκριμένων κλασμάτων, τα PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 , καθώς και το εισπνεύσιμο (ολικό) κλάσμα της σκόνης. Το εύρος μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων αυτού του οργάνου είναι από 0,001 έως 100 mg/m^3 .



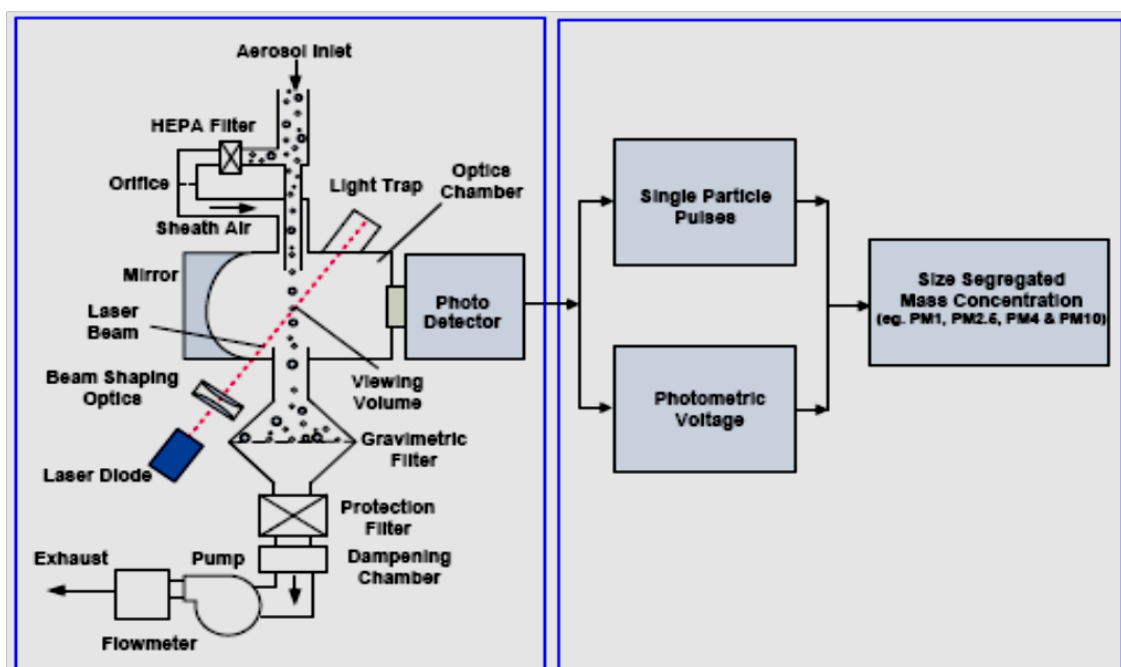
Εικόνα 4.2: Monitor DustTrak 8520



Εικόνα 4.3: Λειτουργία των οπτικών συστημάτων του DustTrak

Στην εικόνα 4.4 δίνεται παραστατικά η αρχή λειτουργίας του TSI 8520 DustTrak. Το ρεύμα του αέρα που περιέχει τη σκόνη εισέρχεται μέσα στο θάλαμο μέτρησης χρησιμοποιώντας μια αντλία διαφράγματος. Μέρος του ρεύματος περνάει μέσα από ένα

φίλτρο HEPA όπου καθαρίζεται πλήρως από τα σωματίδια της σκόνης και διοχετεύεται στο θάλαμο μέτρησης. Η εναπομείνουσα ροή, που ονομάζεται ροή δείγματος, περνάει δια μέσου της εισόδου και εισέρχεται στο θάλαμο μέτρησης. Φωτίζεται από μια δέσμη φωτός λέιζερ. Το φως που εκπέμπεται από τη δίοδο περνά δια μέσου ενός εστιακού φακού και μετά δια μέσου ενός κυλινδρικού φακού ώστε να δημιουργηθεί μια λεπτή επίπεδη δέσμη φωτός. Ένας σφαιρικός καθρέφτης επικαλυμμένος με χρυσό αντανακλά ένα σημαντικό μέρος του φωτός που διασκορπίζεται από τα σωματίδια της σκόνης και το εστιάζει σε έναν φωτοανιχνευτή που μετατρέπει την ένταση του φωτός που δέχεται σε τάση. Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης της σκόνης με βάση το φωτοανιχνευτή έχει πραγματοποιηθεί από τον κατασκευαστή κατάλληλη βαθμονόμηση του οργάνου (ISO 12103-1, A1 test dust).



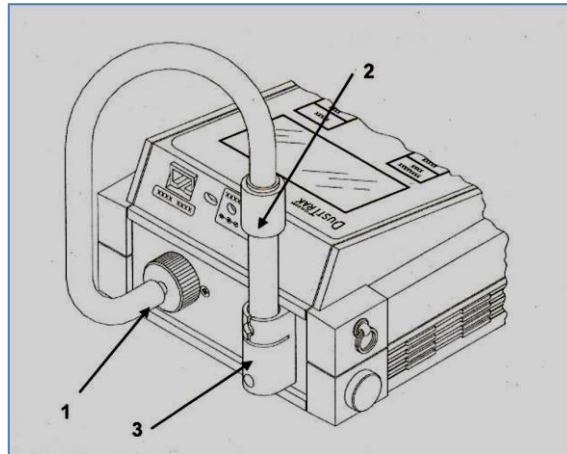
Εικόνα 4.4: Σχηματική παράσταση λειτουργίας του TSI 8520 DustTrak Airborne Particle Monitor

(Πηγή: TSI)

Οι μετρήσεις εμφανίζονται επί της οθόνης του οργάνου και μπορούν να αποθηκευτούν και να μεταφερθούν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού (TrakPro version 4.2.015 της TSI) .

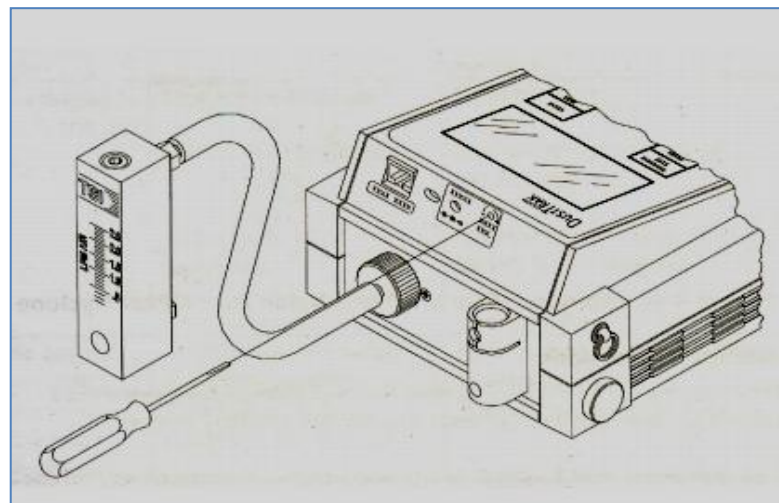
Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η σύνδεση του κυκλώνα με το όργανο, όπου:

1. Σημείο εισαγωγής
2. Κυκλώνας
3. Συγκράτηση κυκλώνα



Εικόνα 4.5: Σύνδεση του κυκλώνα με το όργανο (Πηγή : TSI DustTrak, Operation and Service Manual, 2010)

Πριν από τις μετρήσεις πρέπει να γίνεται έλεγχος καλής λειτουργίας-έλεγχος ροής. Γίνεται η σύνδεση του ροόμετρου με το όργανο και ρύθμιση της ταχύτητας ροής του αέρα στα 1,7 L/min.



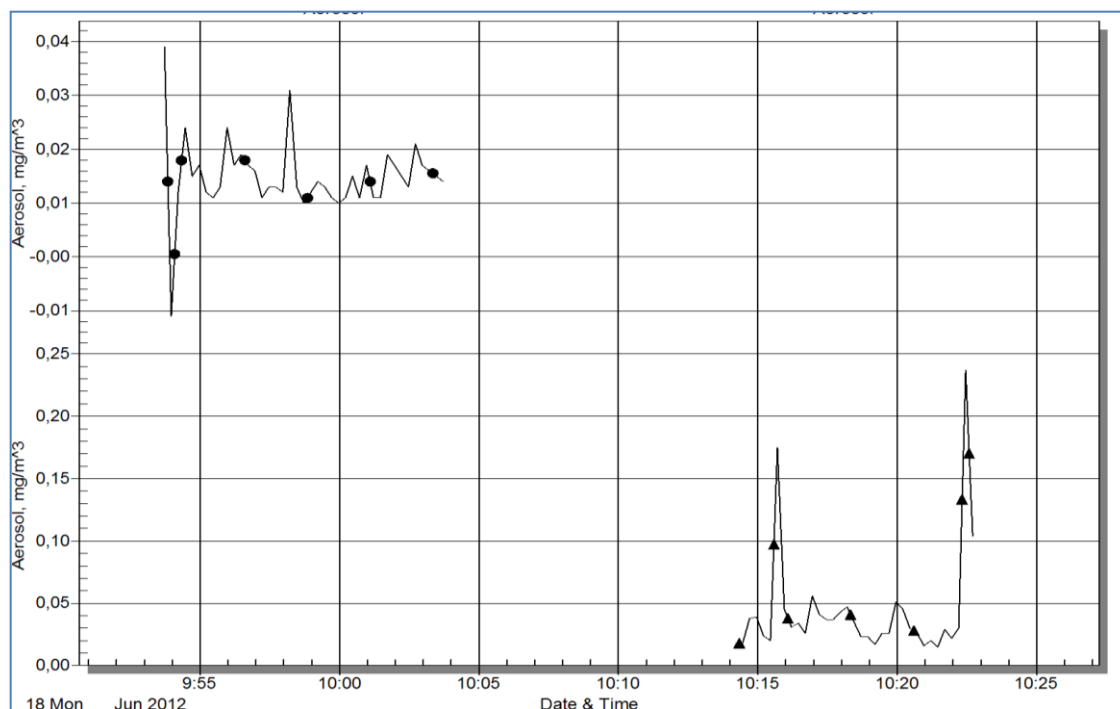
Εικόνα 4.6: Ρύθμιση του ροόμετρου (Πηγή : TSI DustTrak, Operation and Service Manual, 2010)

Εν συνεχεία ακολουθεί έλεγχος με το φίλτρο μηδενισμού (βαθμονόμηση για το σημείο 0). Η αποδεκτή ένδειξη με το φίλτρο μηδενισμού είναι από $-0,001\text{mg/m}^3$ έως $+0,001\text{mg/m}^3$. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν τρία φίλτρα :

- Το φίλτρο 1,0 μm για το κλάσμα κάτω από 1 μm
- Το φίλτρο 2,5 μm για το κλάσμα κάτω από 2,5 μm
- Το φίλτρο 10,0 μm για το κλάσμα κάτω από 10 μm

Μετά τη διαδικασία συλλογής μετρήσεων από το όργανο, και εισάγοντας τα δεδομένα στον υπολογιστή μέσω του κατάλληλου λογισμικού, είναι εύκολο να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα για τη συγκέντρωση της σκόνης συναρτήσει του χρόνου.

Στην εικόνα 4.7 απεικονίζεται ένα παράδειγμα μεταβολής της συγκέντρωσης της σκόνης ως συνάρτηση του χρόνου μέτρησης



Εικόνα 4.7: Χρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων σκόνης δύο διαφορετικών μετρήσεων που ελήφθησαν με τη βοήθεια του οργάνου DustTrak και επεξεργάστηκαν με το λογισμικό TrakPro (version 4.2.015) (Πηγή : TSI)

4.2.2 Το όργανο άμεσης μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων τύπου AeroTrak Particle Counter

Το TSI AeroTrak Particle Counter 9306, όργανο άμεσης μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων, αποτελεί ένα εύχρηστο φορητό όργανο που προορίζεται κυρίως για τη μέτρηση αερομεταφερόμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Η οθόνη αφής των 3,7' που διαθέτει καθιστά εύκολη τη διαδικασία ρύθμισης και λειτουργίας του οργάνου για το χρήστη. Το όργανο μπορεί μετρά τον αριθμό των σωματιδίων ανά κυβικό μέτρο αέρα για έξι διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα ταυτόχρονα. Τα κοκκομετρικά

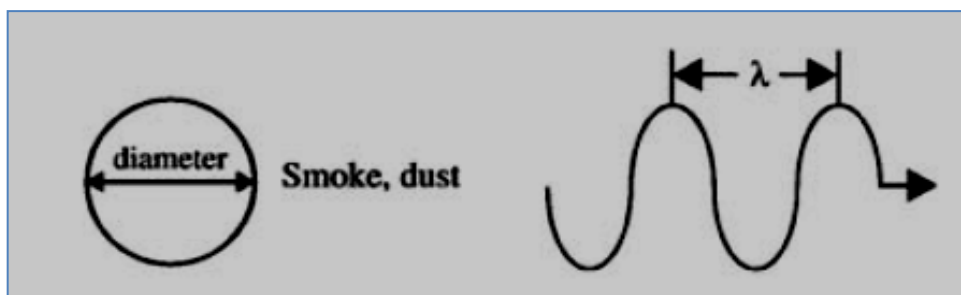
μεγέθη που μετρά είναι από 0,3-25 μ m ενώ ο ρυθμός εισρόφησης του αέρα είναι 2,83L/min. Τα δεδομένα των μετρήσεων είναι εύκολο να μεταφερθούν σε Η/Υ και να επεξεργαστούν μέσω του λογισμικού TrakPro που το συνοδεύει. Το μοντέλο 9306 είναι σύμφωνο με όλες τις αυστηρές απαιτήσεις που ορίζονται από το πρότυπο ISO 21501-4.



Εικόνα 4.8: Όργανο μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων TSI AeroTrak

Αρχή λειτουργίας του οργάνου AeroTrak Particle Counter

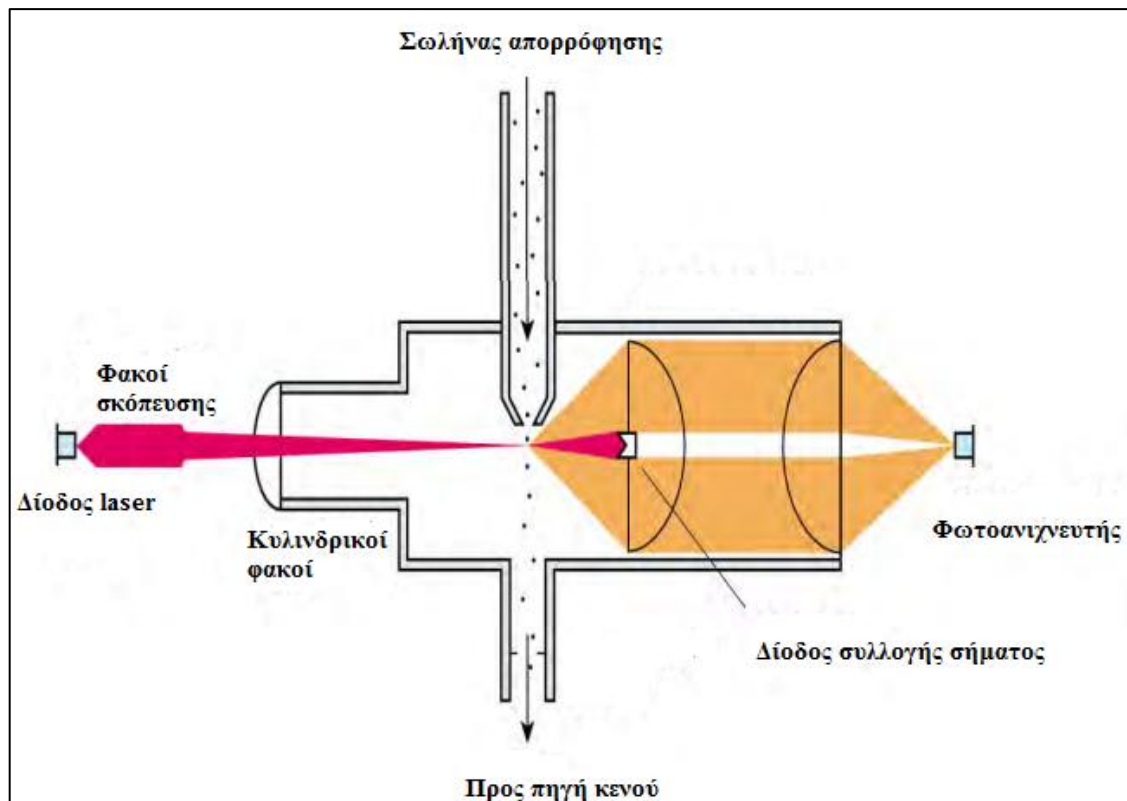
Η λειτουργία του οργάνου αυτού βασίζεται στη σκέδαση του φωτός όταν αυτό προσπέσει στα αιωρούμενα σωματίδια (φαινόμενο Mie) προκειμένου να καταγράψει τον αριθμό τους. Το φαινόμενο Mie είναι η σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων των οποίων το μήκος κύματος είναι μικρότερο ή συγκρίσιμο με τη διάμετρο των σκεδαστών. Η σκέδαση αυτή γίνεται κυρίως κατά την κατεύθυνση της ακτινοβολίας και δεν είναι πολωμένη.



Εικόνα 4.9: Σκέδαση Mie, κατά την οποία το μήκος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μικρότερο ή συγκρίσιμο με τη διάμετρο των σκεδαστών, δηλαδή της μετρούμενης σκόνης (**Πηγή:** Κουκουλή, 2007)

Το όργανο μετρά το μέγεθος και τον αριθμό των αιωρούμενων σωματιδίων ανιχνεύοντας το φως που σκεδάζεται από κάθε σωματίδιο σε πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα, ο αναλυτής λαμβάνει συνεχώς δείγμα αέρα με σταθερή ροή 2,83L/min διαμέσου ενός ειδικού σωλήνα, γνωστού ως ισοκινητικός καθετήρας (isokinetic probe). Μέσω μίας πηγής φωτός, συνήθως μίας διόδου που εκπέμπει ακτίνες λέιζερ, ακτινοβολείται το δείγμα. Το εξαιρετικά εστιασμένο φως που εκπέμπεται διακόπτεται από ένα σωματίδιο, κατά τη ροή του δείγματος αέρα στο όργανο. Το προκύπτον σκεδαζόμενο φως από το κάθε σωματίδιο συλλέγεται μέσω ενός κατόπτρου και οδηγείται στη δίοδο συλλογής σήματος (Εικόνα 4.10). Κάθε σήμα από τη δίοδο, ενισχύεται και στη συνέχεια οδηγείται σε έναν αναλυτή ύψους παλμών ο οποίος τους καταχωρεί ανάλογα με το μέγεθός τους σε ανάλογα κανάλια. Από το ύψος των παλμών που δημιουργούνται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μετρούμενα από το φωτοανιχνευτή, δηλαδή από την αύξηση της ενέργειας σε όλη την περιοχή δειγματοληψίας, εξάγεται το τελικό αποτέλεσμα: ο αριθμός και το μέγεθος των σωματιδίων.

Το ποσοστό της ακτινοβολίας που σκεδάζεται σχετίζεται άμεσα με τον όγκο του κάθε σωματιδίου αλλά επηρεάζεται και από τις φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων (όπως ο δείκτης διάθλασης και ο συντελεστής απορρόφησης). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται στην οθόνη του οργάνου.



Εικόνα 4.10: Λειτουργία AeroTrak Particle Counter (Πηγή: TSI)

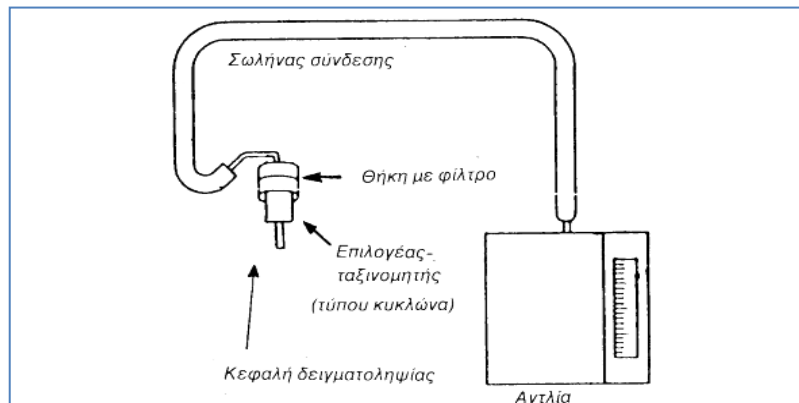
4.2.3 Αναλυτική μέθοδος μέτρησης (βαρυτομετρική) συγκέντρωσης της σκόνης

Η αναλυτική μέθοδος μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης, αποτελείται από δύο διαφορετικές φάσεις, τη φάση της δειγματοληψίας και τη φάση της ανάλυσης του δείγματος. Η πρακτική της εφαρμογή απαιτεί πρώτα απ' όλα τη δέσμευση (σύλληψη), μιας ποσότητας σκόνης με την κατάλληλη κεφαλή δειγματοληψίας και στη συνέχεια τη μεταφορά του δείγματος σε εργαστήριο για την ποσοτική εκτίμηση με ειδικό ζυγό ακριβείας.

Η μέθοδος σταθμικού προσδιορισμού σκόνης, που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, είναι αυτή της διαφοράς βάρους του φίλτρου, η οποία βασίζεται στην αναρρόφηση μιας γνωστής ποσότητας ατμοσφαιρικού αέρα, δια μέσου μιας μεμβράνης φίλτρου, σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα.

Στην εικόνα 4.11 παρουσιάζονται τα βασικά τμήματα του “ατομικού” δειγματολήπτη για τη δειγματοληψία του αναπνεύσιμου κλάσματος των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων. Με κατάλληλο εξάρτημα (ταξινομητή-επιλογή), που προστίθεται στην

κεφαλή δειγματοληψίας πριν από το φίλτρο, μπορεί να ταξινομηθεί η σκόνη, που περιέχεται στο δείγμα αέρα, που αποτίθεται στη συνέχεια πάνω στο φίλτρο.



Εικόνα 4.11: Ατομικός δειγματολήπτης με κυκλώνα για το αναπνεύσιμο κλάσμα των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (Πηγή: ΥΠ.Α.Κ.Π., 1996)

Το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα πειραματική διαδικασία ήταν φίλτρο μεμβράνης διαμέτρου 25mm. Αυτό, πριν τη δειγματοληψία τοποθετείται σε κλίβανο για την απούγροποίησή του και ζυγίζεται σε ζυγό ακριβείας μέχρι το 5^ο δεκαδικό ψηφίο σε gr.

Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, το φίλτρο τοποθετήθηκε σε κωνική βάση (πλαστική θήκη φίλτρου) εξασφαλίζοντας έτσι την ομοιόμορφη κατανομή του αέρα που διαπερνά τη μεμβράνη. Μετά το πέρας της δειγματοληψίας εισήχθη και πάλι στον κλίβανο για απούγροποίηση και ζύγιση.

Με βάση τη σχέση:

$$(\beta_2 - \beta_1) / V = Q$$

όπου: β_2 = βάρος φίλτρου μετά τη δειγματοληψία

β_1 = βάρος φίλτρου πριν τη δειγματοληψία

V = όγκος αέρα που αναρροφήθηκε στον καθορισμένο χρόνο

Q = ποσότητα της υπό ανάλυση ουσίας

Το ποσοτικό αποτέλεσμα της δειγματοληψίας εκφράζεται σε mg/m^3 .

Με τη βοήθεια της ατομικού δειγματοσυλλέκτη PCXR8 (Εικόνα 4.12), υπολογίζουμε τη συγκέντρωση της σκόνης. Η ταχύτητα ροής του αέρα στην αντλία πρέπει να είναι 2,2 L/min. Το φίλτρο τοποθετείται σε μια φίλτροκασέτα και στη συνέχεια συνδέεται με τη βοήθεια ενός κυκλώνα στην αντλία και πραγματοποιείται η δειγματοληψία.



Εικόνα 4.12: Ατομικός δειγματοσυλλέκτης με αντλία PCXR8 (Πηγή: SKC)

4.3 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της σκόνης

Τα υλικά που επιλέχθηκαν για τη δημιουργία της σκόνης είναι ασβεστολιθική παιπάλη, λεπτόκοκκη υδράσβεστος, γη διατόμων και λεπτόκοκκο τσιμέντο (μικροτσιμέντο).

4.3.1 Παιπάλη ασβεστολιθικού πετρώματος (CaCO_3)

Στη βιομηχανία παραγωγής αδρανών υλικών και κατά τις διαδικασίες εξόρυξης, μεταφοράς και θραύσης, παράγονται μεγάλες ποσότητες λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών που αποκαλούνται με τον όρο «παιπάλη». Παιπάλη ή filler, κατά το πρότυπο ASTM, ορίζεται το λεπτόκοκκο κλάσμα το οποίο διέρχεται από το κόσκινο No200 (το οποίο έχει άνοιγμα τετραγωνικής οπής 0,075 mm). Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12620 ως παιπάλη ορίζεται το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο κόκκο 2 mm, και το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70 – 100% από το κόσκινο 0,063 mm.



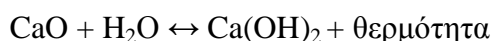
Εικόνα 4.13: Δείγμα παιπάλης

Η παιπάλη προσκολλάται στους κόκκους του υλικού, εμποδίζοντας την πρόσφυση και αγκύρωση των κόκκων των αδρανών με τη συνδετική κονία, είτε σχηματίζει συσσωματώματα, δημιουργώντας αδύνατα σημεία στη μάζα του κονιάματος, ή ακόμη διασκορπίζεται ομοιόμορφα μέσα στη μάζα του αδρανούς. Επίσης, αυξάνει εν γένει την απαίτηση σε νερό στο σκυρόδεμα και ελαττώνει την αντοχή του. Παράλληλα, συντελεί στην αύξηση της εργασιμότητας του μίγματος αδρανών-κονιάματος. Για τους παραπάνω λόγους η παιπάλη είναι ανεπιθύμητη (όπως και η άργιλος) σε αδρανή που προορίζονται στην παραγωγή σκυροδέματος. Υψηλά ποσοστά παιπάλης αυξάνουν την εργασιμότητα στο ασφαλτικό σκυρόδεμα.

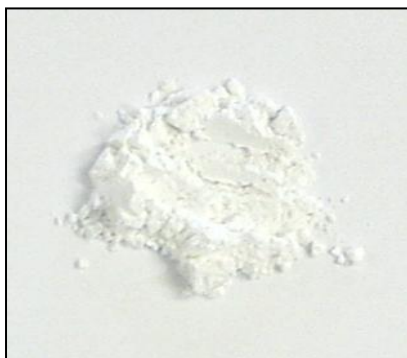
Ειδικότερα για τις λατομικές εργασίες εξόρυξης αδρανών τα σωματίδια PM_{10} είναι αυτά τα οποία εκλύονται συνηθέστερα στη ατμόσφαιρα. Τα PM_{10} συνδέονται άμεσα με παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος ενώ ευθύνονται για την εμφάνιση συμπτωμάτων όπως μειωμένη σωματική αντοχή, βήχας ή πόνοι. Επιπλέον, ευθύνονται για την υπολειτουργία του ανθρώπινου ανοσοποιητικού συστήματος.

4.3.2 Υδράσβεστος ($Ca(OH)_2$)

Η υδράσβεστος, $Ca(OH)_2$, αποτελεί δομική κονία η οποία παράγεται από το οξείδιο του ασβεστίου, CaO , με προσθήκη νερού σύμφωνα με την αντίδραση:



Το CaO παράγεται με πύρωση ασβεστολίθου σε ειδικές καμίνους. Η προσθήκη νερού σε ποσοστό που καθορίζεται στοιχειομετρικά από την αντίδραση ενυδάτωσης οδηγεί στην παραγωγή υδρασβέστου σε μορφή λεπτόκοκκης σκόνης ενώ η περίσσεια νερού οδηγεί στην παραγωγή πολλού υδρασβέστου. Με τις αυτές τις δυο μορφές διατίθεται σήμερα ως εμπορικό προϊόν η υδράσβεστος. Η υδράσβεστος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ήταν σε μορφή λευκής λεπτόκοκκης σκόνης, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.14.



Εικόνα 4.14: Λεπτόκοκκη ξηρή υδράσβεστος

Η υδράσβεστος πήζει και σκληραίνει αρχικά στον αέρα αφού το CaO που σχηματίζεται κατά την όπτηση, το οποίο αφού ενυδατωθεί και μετατραπεί σε υδράσβεστο, $Ca(OH)_2$, αντιδρά με το CO_2 της ατμόσφαιρας και οδηγεί στο σχηματισμό $CaCO_3$ και στη στερεοποίησή του, δηλαδή στη λίθωση της υδρασβέστου.

Η υδραυλική υδράσβεστος παρασκευάζεται με όπτηση από ασβεστολιθικά πετρώματα με αυξημένη περιεκτικότητα σε οξείδια του αργιλίου και του πυριτίου. Η περιεκτικότητα σε άργιλο είναι 10-15%. Η όπτηση γίνεται σε συνηθισμένα

ασβεστουργικά καμίνια και σε θερμοκρασίες μεταξύ 1000-1200° C. Η όπτηση στις θερμοκρασίες αυτές βοηθά στο σχηματισμό οξειδίων του αργιλίου, του πυριτίου και του σιδήρου μαζί με άσβεστο. Τα οξείδια αυτά είναι οι υδραυλικοί συντελεστές της κονίας (Κορωναίος και Πουλάκος, 2006).

Ανάλογα με τη μικρή ή μεγάλη υδραυλική ικανότητά της, η υδραυλική άσβεστος διακρίνεται σε (Wendehorst, 2009):

α. Ασθενώς υδραυλική άσβεστος.

Είναι κονία η οποία περιέχει υδραυλικά συστατικά που δίνουν μία σχετική σκληρυντική ικανότητα. Μετά την ανάμιξη με το νερό, το κονίαμα αποκτά αντοχή που οφείλεται στο συνδυασμό δύο διεργασιών: σχηματισμού CaCO_3 και υδραυλικής σκλήρυνσης. Το κονίαμα είναι ανθεκτικό κάτω από το νερό, εάν έχει προσκληρυνθεί στον αέρα επί 7 ημέρες.

β. Υδραυλική άσβεστος.

Είναι κονία που παράλληλα με εμφανείς ιδιότητες της ασβέστου παρουσιάζει και καλή υδραυλική σκληρυντική ικανότητα. Το κονίαμα είναι ανθεκτικό κάτω από το νερό, εάν έχει προσκληρυνθεί στον αέρα επί 5 ημέρες

γ. Ισχυρώς υδραυλική άσβεστος.

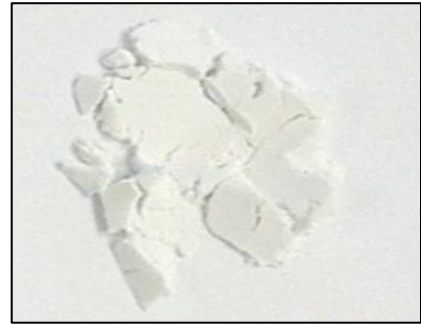
Είναι κονία που χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο από υδραυλική σκληρυντική ικανότητα. Τα κονιάματα είναι ανθεκτικά κάτω από το νερό, εάν έχουν προσκληρυνθεί στον αέρα από 1 έως 3 ημέρες. Η υδραυλική άσβεστος μαζί με άμμο δίνει κονιάματα, με καλές μηχανικές ιδιότητες. Είναι γενικά προϊόν με λιγότερες χρήσεις, μία από τις οποίες αφορά την παραγωγή κονιαμάτων επισκευής και ενίσχυσης κατασκευών μνημειακού χαρακτήρα από φέρουσα τοιχοποιία (για ενέματα, επιστρώσεις, αρμολόγημα, επιχρίσματα) (Τριανταφύλλου, 2008).

4.3.3 Γη διατόμων

Η γη διατόμων ή διατομίτης ή Kieselguhr σχηματίζεται από τη συσσώρευση τεράστιου αριθμού απολιθωμένων διατόμων και είναι ένα εύθραυστο πέτρωμα, το οποίο σχηματίζεται από τα κελύφη των διατόμων, που καθιζάνουν στον πυθμένα των θαλασσών και των λιμνών. Η γη διατόμων προέρχεται από ένα μονοκύτταρο φυτό, το οποίο έχει μικροσκοπικό μέγεθος. Υπάρχουν πολλές ποικιλίες αυτού, που ζουν τόσο σε γλυκά όσο και σε θαλασσινά νερά. Τα φυτά αυτά παραμένουν κοντά στην επιφάνεια και αποτελούν ένα ποσοστό του πλαγκτόν, που υπάρχει σε αφθονία. Η γη διατόμων ως

φυτό βρίσκεται στη βάση της τροφικής αλυσίδας, όταν δε απονεκρωθεί, αυτό που παραμένει είναι κάποιοι λεπτοί σκελετοί γνωστοί ως « frustule », που μοιάζουν με μικροσκοπικά κοσμήματα.

Η τυπική χημική σύσταση του ξηρού διατομίτη είναι: 80 – 90% διοξείδιο του πυριτίου, 2 – 4% οξείδιο του αλουμινίου και 0,5 – 2% οξείδια του σιδήρου. Έχει τη μορφή λευκής ή τεφρής σκόνης. Κατά την επεξεργασία της πυρώνεται και το χρώμα της γίνεται ερυθρωπό. Στο εμπόριο φέρεται αλεσμένη σε μορφή λεπτής σκόνης. Απορροφά την υγρασία και ανθίσταται στις υψηλές θερμοκρασίες και τις χημικές επιδράσεις οξέων και βάσεων. Αντέχει σε θερμοκρασίες μέχρι και 800°C.



Εικόνα 4.15: Δείγμα γης διατόμων

Στη βιομηχανία βρίσκει ποικίλες χρήσεις σαν υλικό πληρώσεως για την απορρόφηση διαφόρων υγρών. Με συνδετικό μέσο χρησιμοποιείται για την επένδυση σωληνώσεων (προστασία από θερμότητα και ψύχος) και χαλύβδινων κατασκευών (αντιπυρική προστασία). Ως έχει, χρησιμοποιείται για την ηχητική μόνωση δαπέδων και τη θερμική μόνωση τοιχωμάτων ψυγείων & ψυκτικών θαλάμων (Wendehorst, 2009).

4.3.4 Υπέρλεπτο τσιμέντο (μικροτσιμέντο)

Το μικροτσιμέντο (microcement ή Ultra Fine 12 Cement) που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα εξαιρετικά λεπτόκοκκο τσιμέντο, προϊόν της τσιμεντοβιομηχανίας Heidelberg cement (Εικόνα 4.16).



Εικόνα 4.16: Δείγμα μικροτσιμέντου

Υπάρχουν τρεις τύποι μικροτσιμέντου της εταιρίας αυτής, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους, που είναι:

- το Injektering 30 με 95% των κόκκων με μέγεθος μικρότερο από 30 μ m, Ultra Fine 16 με το 95% των κόκκων με μέγεθος μικρότερο από 16 μ m και το Ultra Fine 12 με το 95% των κόκκων με μέγεθος μικρότερο από 12 μ m.

Το μικροτσιμέντο χρησιμοποιείται κυρίως σε ενέματα με σκοπό τη σφράγιση εξαιρετικά λεπτών σχισμών μεγέθους μικρότερων των 100 μ m (τσιμεντενέσεις για την σταθεροποίηση βραχομάζας σε σήραγγες, καθώς και σε άλλες εφαρμογές).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Μεθοδολογία σύγκρισης των μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό συγκρίνονται τα αποτελέσματα των στιγμιαίων τιμών των δυο διαφορετικών μεθόδων άμεσης μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης (μελέτη της χρονικής εξέλιξης των μετρήσεων και της μεταξύ τους συσχέτιση) καθώς και οι μέσες τιμές της συγκέντρωσης της σκόνης τόσο των άμεσων μεθόδων όσο και της βαρυτομετρικής. Οι συγκρίσεις αυτές γίνονται για κάθε διαφορετικό τύπο ορυκτής σκόνης που εξετάστηκε καθώς και για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα της σκόνης.

Αρχικά, παρατίθενται τα διαγράμματα των μετρήσεων για τις δυο άμεσες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν (μέτρηση συγκέντρωσης σκόνης σε mg/m^3 με το όργανο DustTrak και μέτρηση συγκέντρωσης σκόνης σε $\text{particles}/\text{m}^3$ με το AeroTrak). Οι σύγκριση γίνεται για κάθε υλικό και για κάθε κλάσμα σκόνης (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{1}).

Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα έγινε μετατροπή των μετρήσεων της συγκέντρωσης σκόνης από $\text{particles}/\text{m}^3$ σε mg/m^3 . Για τη μετατροπή αυτή έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

1. Θεωρήθηκαν τα σωματίδια ως σφαιρικά, συμπαγή και μεμονωμένα (αγνοήθηκε το φαινόμενο της συσσωμάτωσης των σωματιδίων).
2. Ως διάμετρος του σωματιδίου ελήφθη το μέσο της κλάσης του μετρούμενου κοκκομετρικού κλάσματος. Στον πίνακα 5.1 δίνεται απόσπασμα αναλυτικών υπολογισμών από το σχετικό υπολογιστικό φύλλο Excel για δείγμα γης διατόμων που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό.

Μέγεθος σωματιδίου, μm	Δ σωματίδια/ m^3	Σ (αθροιστικό) σωματίδια/ m^3	Διάμετρος (μm)	Ακτίνα (μm)	Όγκος σφαίρας (μm^3)	Μάζα (mg)	Συγκέντρωση (mg/m^3)
0,3	129276	152985	0,15	0,075	0,00177	4,06E-12	0,000185666
0,5	14674	23709	0,4	0,2	0,03349	7,71E-11	0,00039964
1	6290	9035	0,75	0,375	0,22078	5,08E-10	0,001129209
3	1222	2745	2	1	4,18667	9,63E-09	0,004160076
5	1076	1523	4	2	33,49333	7,71E-08	0,029304362
10	447	447	7,5	3,75	220,7813	5,08E-07	8,02E-02
Σύνολο:							0,11542642

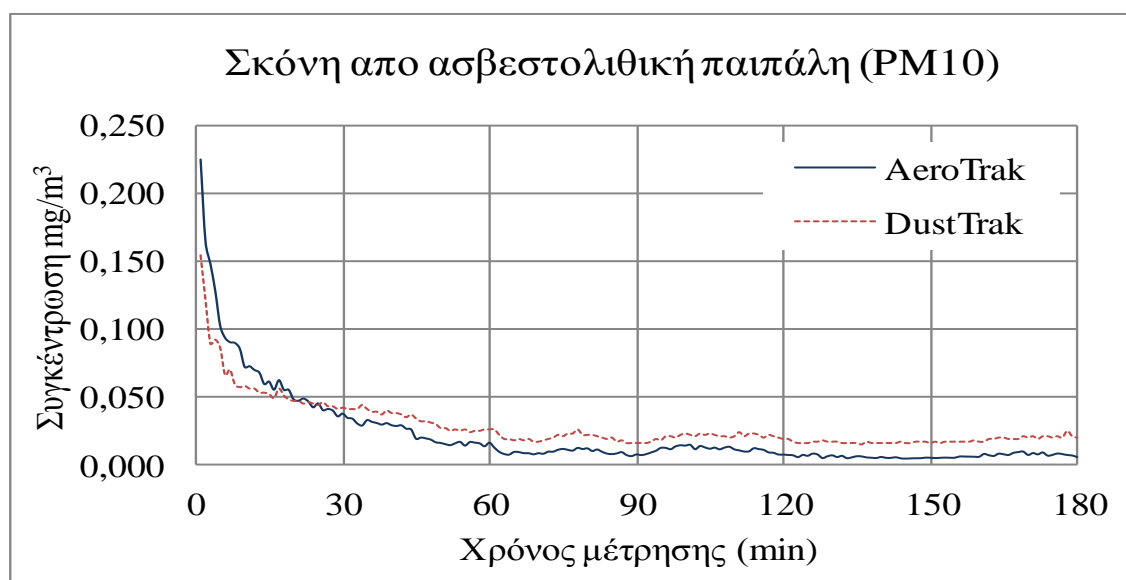
Πίνακας 5.1: Απόσπασμα υπολογισμών από μετρήσεις οργάνου AeroTrak

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων DustTrak και AeroTrak. Χρησιμοποιείται η απλή γραμμική παλινδρόμηση και εξετάζεται, με βάση την τιμή του γραμμικού συντελεστή συσχέτισης R^2 , η ύπαρξη συσχέτισης των μετρήσεων των δυο οργάνων. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων της σκόνης τόσο των άμεσων μεθόδων (DustTrak και AeroTrak) όσο και της αναλυτικής (μέθοδος διαφοράς βάρους φίλτρου).

5.2 Σύγκριση στιγμιαίων τιμών των άμεσων μεθόδων μέτρησης

5.2.1 Μετρήσεις σκόνης από παιπάλη ασβεστολιθικού πετρώματος (CaCO_3)

Στην εικόνα 5.1, αποτυπώνεται η καταγραφή των μετρήσεων των δύο οργάνων για το κλάσμα PM_{10} ($<10\mu\text{m}$) για τη σκόνη από την παιπάλη του ασβεστολιθικού πετρώματος.

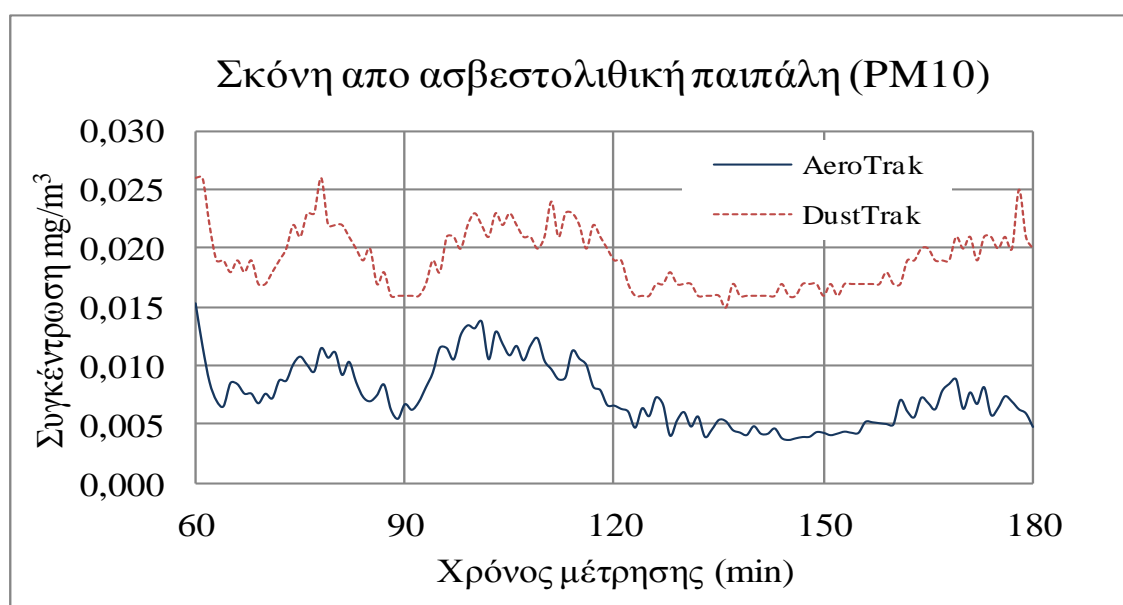


Εικόνα 5.1: Σύγκριση μεθόδων άμεσης μέτρησης για το κλάσμα PM_{10} σκόνης από παιπάλη ασβεστολιθικού πετρώματος

Η συγκέντρωση της σκόνης εντός του θαλάμου παρατηρούμε ότι φθίνει συνεχώς επί μία περίπου ώρα (μεταβατική περίοδος) λόγω καθίζησης των σωματιδίων της σκόνης και σταθεροποιείται εν συνεχεία στην τιμή σκόνης του υποβάθρου. Η τιμή αυτή του υποβάθρου, εντός του εργαστηρίου από σειρά μετρήσεων, έχει εκτιμηθεί με το όργανο DustTrak σε $0,020\text{mg/m}^3$.

Οι τιμές του AeroTrak εντός της μεταβατικής περιοχής φθίνουν χρονικά με ταχύτερο ρυθμό από εκείνες του DustTrak. Εντός μισής ώρας από την έναρξη των

μετρήσεων, παρατηρείται σχεδόν ταύτιση των τιμών (συγκέντρωση σκόνης περίπου στα $0,05 \text{ mg/m}^3$) και στη συνέχεια οι τιμές του AeroTrak εμφανίζονται συστηματικά χαμηλότερες από εκείνες του DustTrak. Μετά την παρέλευση μίας ώρας που επέρχεται η σταθεροποίηση της συγκέντρωσης της σκόνης παρατηρείται μια σταθερή απόκλιση των μετρήσεων της τάξεως του $0,01 \text{ mg/m}^3$, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι δεν ταυτίζεται η αεροδυναμική διάμετρος του σωματιδίου που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του κλάσματος PM_{10} και χρησιμοποιεί το όργανο DustTrak με τη διάμετρο που υπολογίζεται από τη σκέδαση του φωτός από το όργανο AeroTrak.

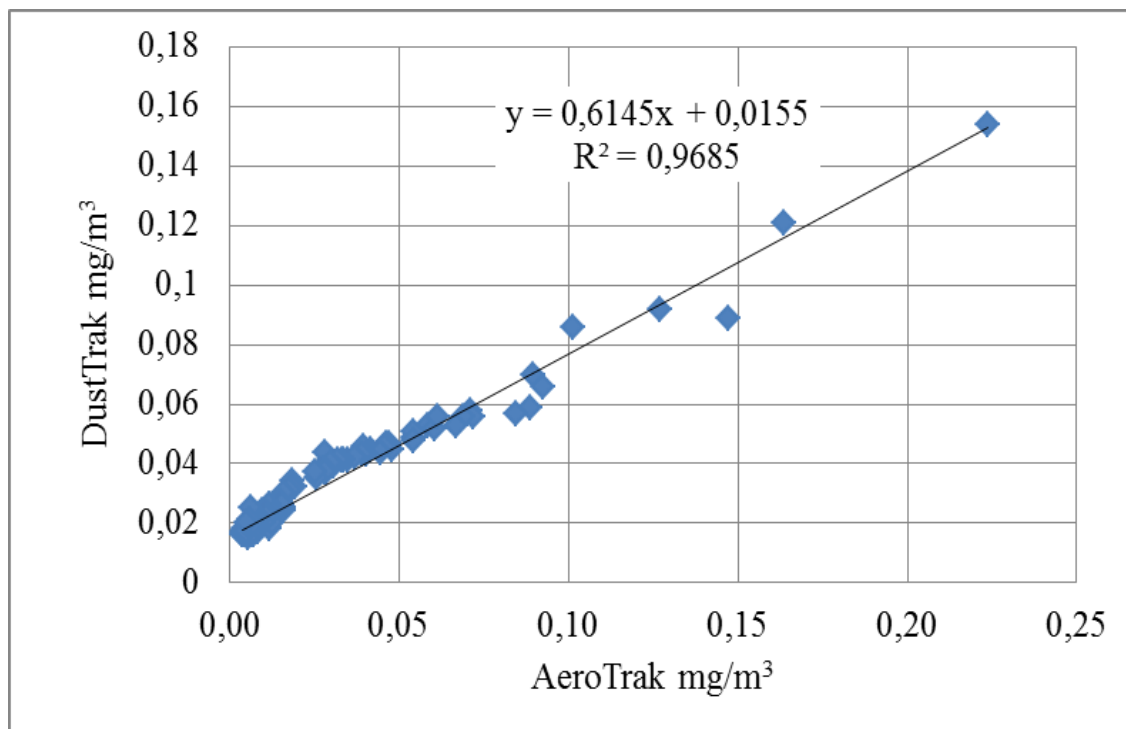


Εικόνα 5.2: Μεταβολή των τιμών της μέτρησης συγκέντρωσης της σκόνης από παιπάλη ασβεστολιθικού πετρώματος για το κλάσμα PM_{10} μετά από παρέλευση μίας ώρας

Για την αξιολόγηση των μεθόδων και τη σύγκριση μεταξύ τους, κατασκευάστηκε το διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter (Εικόνα 5.3). Όπως φαίνεται από την τιμή του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης που υπολογίστηκε ($R^2=0,9685$) η συσχέτιση των μετρήσεων είναι εξαιρετικά ισχυρή και μας δίνει τη δυνατότητα να προβούμε σε ακριβείς μετατροπές τιμών της συγκέντρωσης από τη μία μέθοδο στην άλλη.

Επειδή τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα της σκόνης ορίζονται από την υπάρχουσα νομοθεσία με βάση τις αεροδυναμικές τους διαμέτρους είναι προφανές ότι

το διάγραμμα της εικόνας 5.3 είναι εξαιρετικά χρήσιμο για τη μετατροπή των τιμών των συγκεντρώσεων του AeroTrak Particle Counter στις αντίστοιχες με βάση την αεροδυναμική διάμετρο (συγκεντρώσεις που δίνει το DustTrak Particle Monitor).



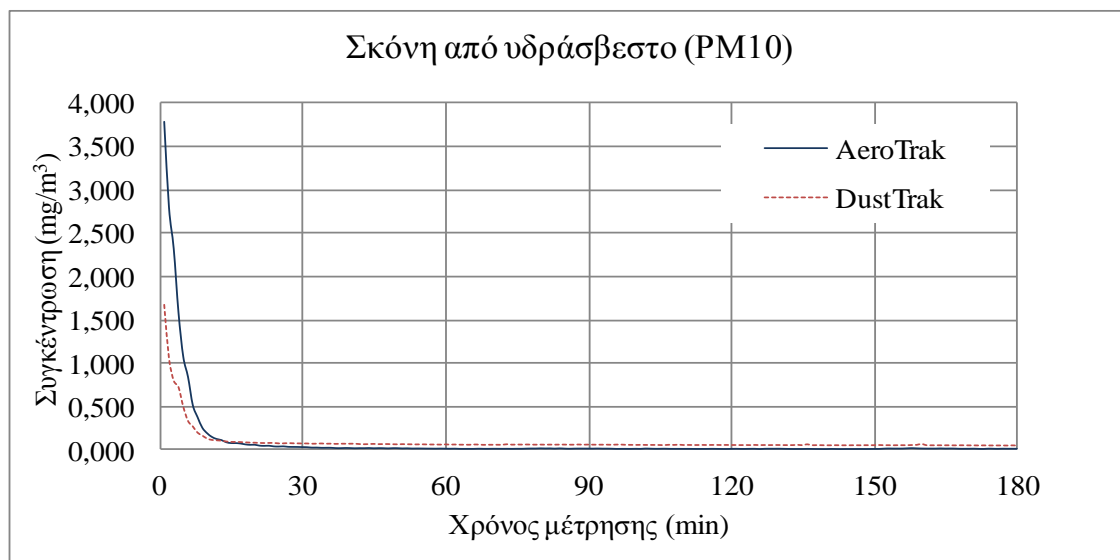
Εικόνα 5.3: Διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για το κλάσμα των PM₁₀ παιπάλης ασβεστολιθικού πετρώματος

5.2.2 Μετρήσεις σκόνης από υδράσβεστο (Ca(OH)₂).

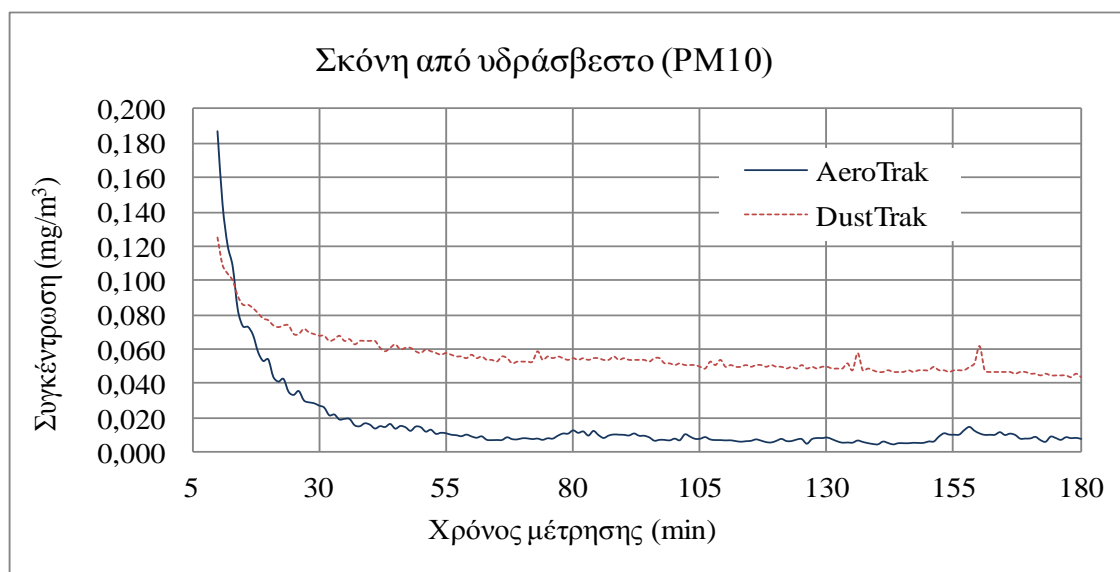
Οι μετρήσεις συγκέντρωσης σκόνης από υδράσβεστο πραγματοποιήθηκαν με το όργανο DustTrak Aerosol monitor για τρία διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα της στο PM₁₀, PM_{2.5} και στο PM₁. Η λήψη κάθε κλάσματος γίνεται με τη χρήση του αεροκυκλώνα και του αντίστοιχου φίλτρου διαχωρισμού. Το όργανο DustTrak Aerosol monitor, όπως έχει ήδη αναφερθεί μπορεί να μετρά τη συγκέντρωση ενός μόνο κλάσματος κάθε φορά. Αντίθετα με το AeroTrak Particle Counter είναι δυνατή η μέτρηση της συγκέντρωσης της σκόνης σε όλα τα κλάσματα ταυτόχρονα.

Στις εικόνες 5.4 και 5.5, αποτυπώνεται η καταγραφή των μετρήσεων των δύο οργάνων για το κλάσμα PM₁₀ της σκόνης από υδράσβεστο. Πριν την έναρξη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε ανάδευση του αέρα-σκόνης εντός του θαλάμου με

ισχυρή εμφύσηση αέρα. Το όργανο AeroTrak Particle Counter δίνει υψηλότερες τιμές μετρήσεων κατά τη μεταβατική περίοδο (0-15 min) σε σχέση με το DustTrak Particle Monitor. Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης που καταγράφηκε κατά την έναρξη της δοκιμής ήταν $3,779 \text{ mg/m}^3$ για το AeroTrak Particle Counter και $1,671 \text{ mg/m}^3$ για το DustTrak Particle Monitor.



Εικόνα 5.4: Σύγκριση μεθόδων άμεσης μέτρησης για το κλάσμα PM_{10} σκόνης από υδράσβεστο

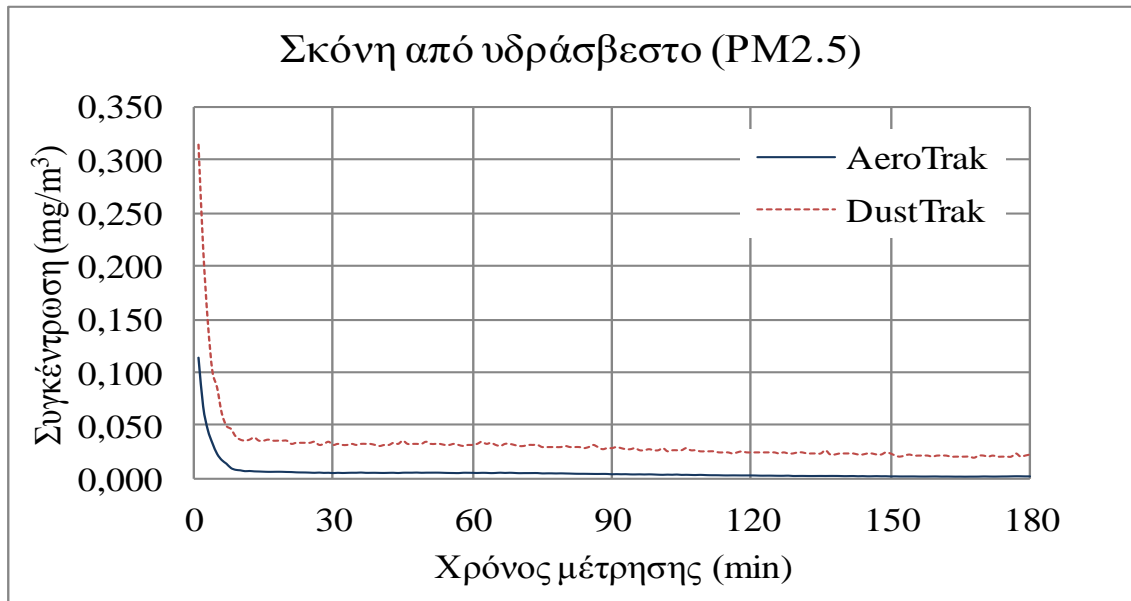


Εικόνα 5.5: Μεταβολή των τιμών της μέτρησης συγκέντρωσης της σκόνης από υδράσβεστο για το κλάσμα PM_{10} μετά από παρέλευση 15 λεπτών

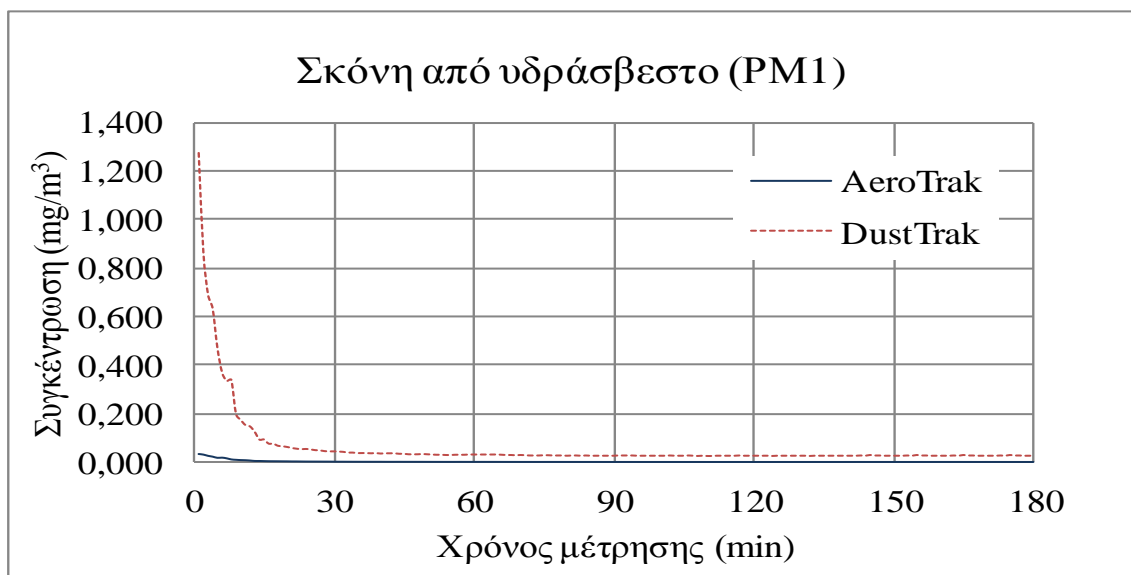
Δεκαπέντε λεπτά μετά την έναρξη του πειράματος, παρατηρείται σύγκλιση των τιμών σε συγκέντρωση σκόνης περίπου στα $0,091 \text{ mg/m}^3$ και μετά το σημείο αυτό και κατά την παρέλευση του χρόνου των μετρήσεων παρατηρείται σταθερή απόκλιση των μετρήσεων της τάξεως των $0,05 \text{ mg/m}^3$. Η ένδειξη του DustTrak Particle Monitor

παρουσιάζεται και πάλι μεγαλύτερη καθώς αυτό μετρά σωματίδια με βάση την αεροδυναμική τους διάμετρο, ουσιαστικά δηλαδή μετρά μεγαλύτερο κλάσμα σκόνης, σε σχέση με το AeroTrak Particle Counter το οποίο πραγματοποιεί καταμέτρηση σωματιδίων με βάση τη διάμετρο σκέδασης.

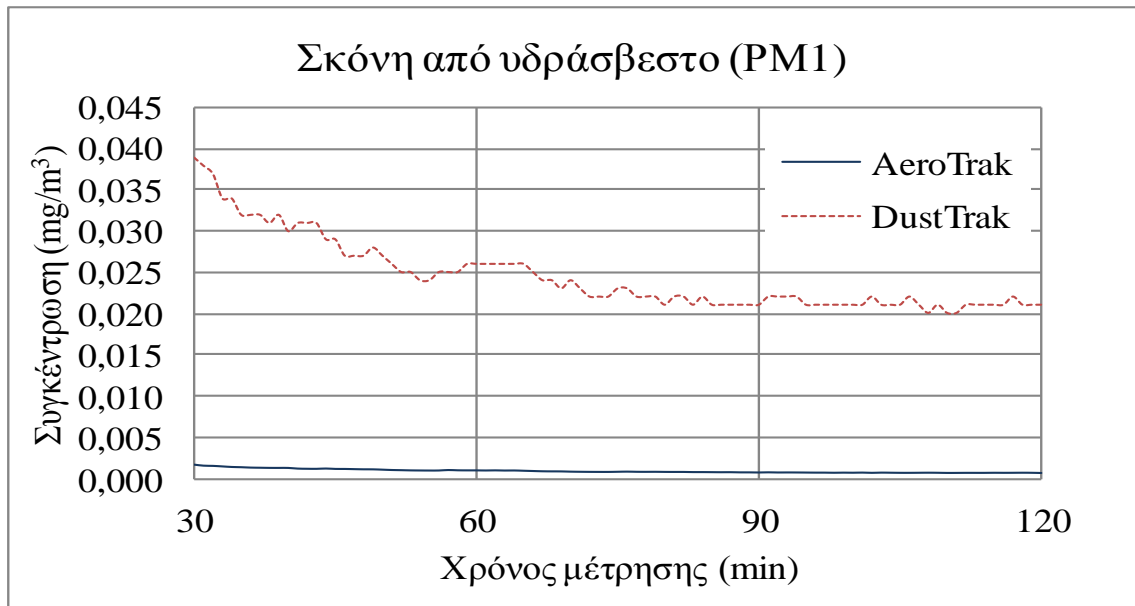
Παρόμοια συμπεριφορά στη διαχρονική εξέλιξη των μετρήσεων της σκόνης παρατηρήθηκε και για τα κλάσματα PM_{2.5} και PM₁, όπως φαίνεται στις εικόνες 5.6, 5.7 και 5.8.



Εικόνα 5.6: Διαχρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης σκόνης από υδράσβεστο για το κλάσμα PM_{2.5}, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak

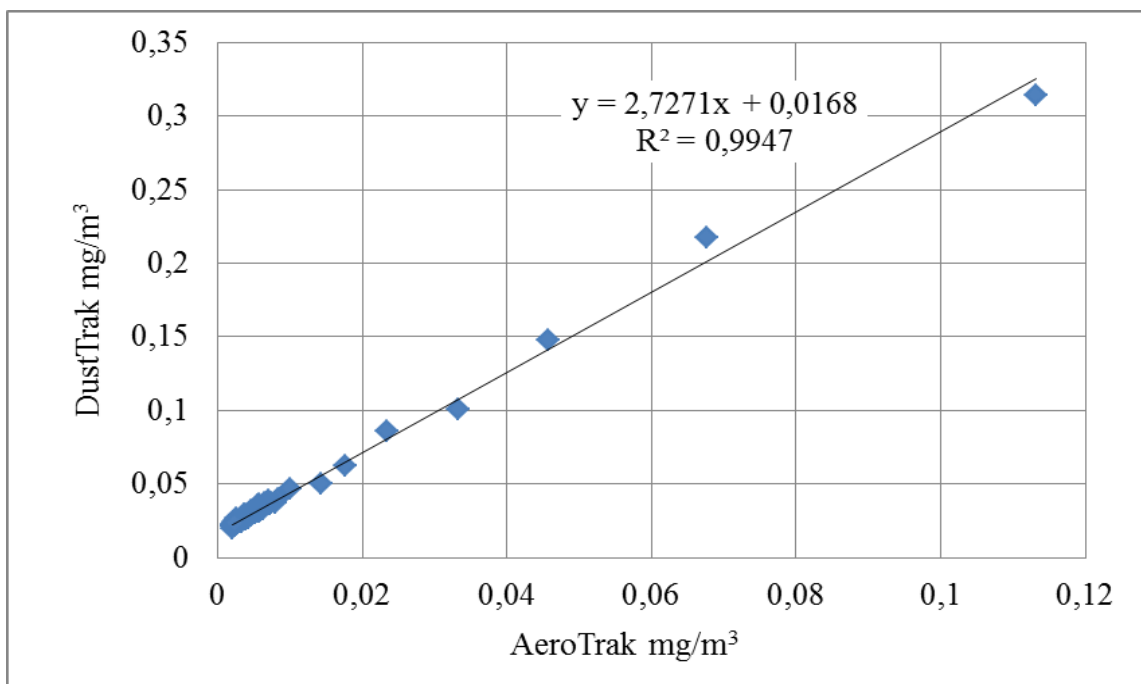


Εικόνα 5.7: Διαχρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης σκόνης από υδράσβεστο για το κλάσμα PM_{1,0}, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak



Εικόνα 5.8: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από υδράσβεστο για το κλάσμα PM₁, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak., μετά από παρέλευση μισής ώρας

Το διάγραμμα συσχέτισης των μετρήσεων των δυο οργάνων για το κλάσμα PM_{2.5} δίνεται στην εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για το κλάσμα των PM_{2.5} υδρασβέστου

Όπως φαίνεται από την τιμή του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης που υπολογίστηκε ($R^2=0,9947$) η συσχέτιση των μετρήσεων είναι εξαιρετικά ισχυρή και μας δίνει τη δυνατότητα να προβούμε σε ακριβείς μετατροπές τιμών της συγκέντρωσης από τη μία μέθοδο στην άλλη. Παρόμοια διαγράμματα συσχέτισης προκύπτουν και για τα άλλα κλάσματα της σκόνης της υδρασβέστου. Τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης που προέκυψαν από τη συσχέτιση των μετρήσεων κάθε οργάνου για κάθε ένα από τα κλάσματα PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 συνοψίζονται στον πίνακα 5.2.

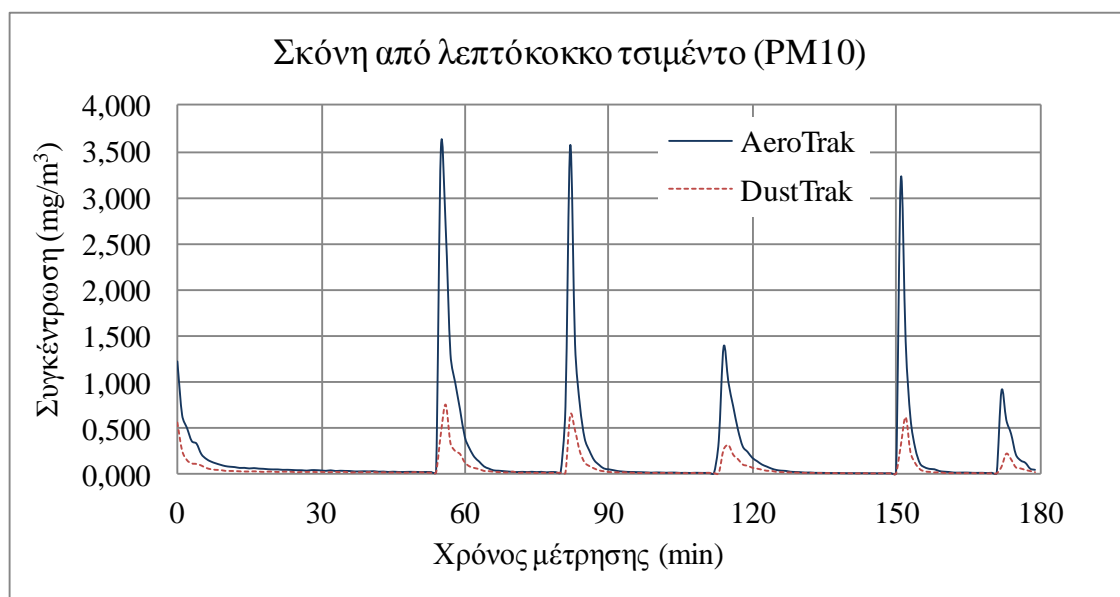
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης για τη συσχέτιση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης από υδράσβεστο για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα.

Κοκκομετρικό κλάσμα σκόνης από υδράσβεστο	Εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης	Συντελεστής συσχέτισης R
PM_{10}	$Y=0,3912x+0,0498$	0,9931
$PM_{2,5}$	$Y=2,7271x+0,0168$	0,9971
PM_1	$Y=31,569x-0,0099$	0,9740
x=Συγκέντρωση σκόνης από AeroTrak Y=Συγκέντρωση σκόνης από DustTrak		

5.2.3 Μετρήσεις σκόνης τσιμέντου.

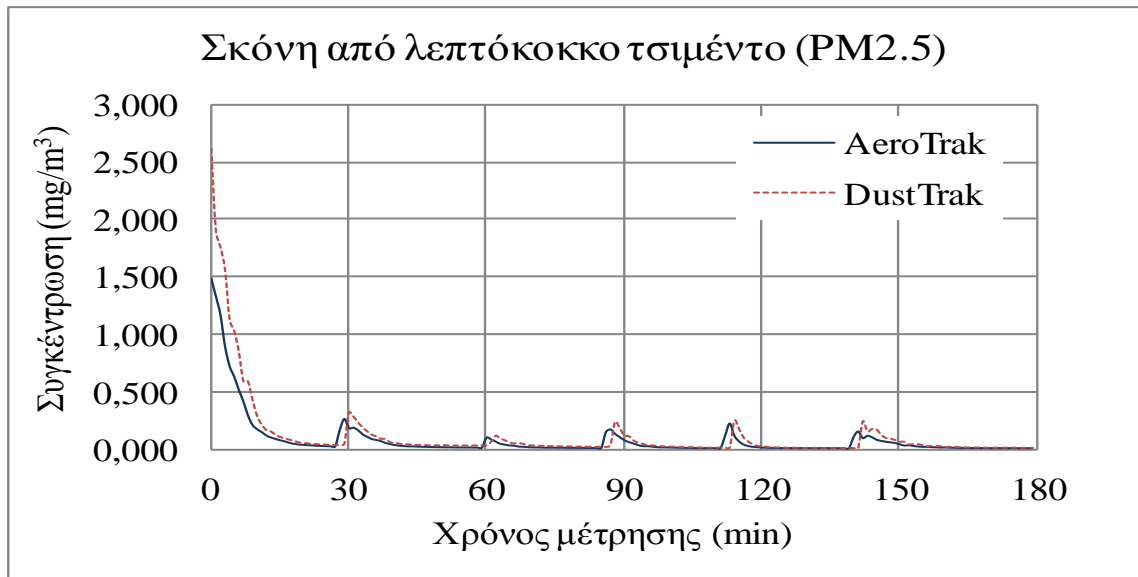
Οι μετρήσεις συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο πραγματοποιήθηκαν με το όργανο DustTrak Aerosol monitor για τρία διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα της στο PM_{10} , $PM_{2,5}$ και στο PM_1 . Η λήψη κάθε κλάσματος γίνεται με τη χρήση του αεροκυκλώνα και του αντίστοιχου φίλτρου διαχωρισμού. Το όργανο DustTrak Aerosol monitor, όπως έχει ήδη αναφερθεί μπορεί να μετρά τη συγκέντρωση ενός μόνο κλάσματος κάθε φορά. Αντίθετα με το AeroTrak Particle Counter είναι δυνατή η μέτρηση της συγκέντρωσης της σκόνης σε όλα τα κλάσματα ταυτόχρονα. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της σκόνης ήταν το ultra fine 12 ενώ κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της μέτρησης πραγματοποιήθηκαν αναδεύσεις του αέρα του θαλάμου με ισχυρή εμφύσηση αέρα ανά 30 min.

Στην εικόνα 5.10, φαίνεται μεταβολή των μετρήσεων των συγκεντρώσεων της σκόνης όπως καταγράφηκε από τα δύο όργανα για το κλάσμα PM_{10} του τσιμέντου. Όσον αφορά το όργανο AeroTrak Particle Counter, παρατηρείται έντονη ευαισθησία αυτού σε ταχείες και απότομες μεταβολές της σκόνης. Συγκεκριμένα, με κάθε ανάδευση του αέρα παρατηρούνται έντονες αιχμές του οργάνου στα 1,221, 3,528, 3,569, 1,377, 3,209 και 0,902 mg/m^3 αντίστοιχα όπως φαίνεται στο διάγραμμα σε αντίθεση με το όργανο DustTrak Particle Monitor, όπου λαμβάνει κατώτερες τιμές 0,559, 0,753, 0,638, 0,315, 0,617 και 0,22 mg/m^3 τις ίδιες χρονικές στιγμές.

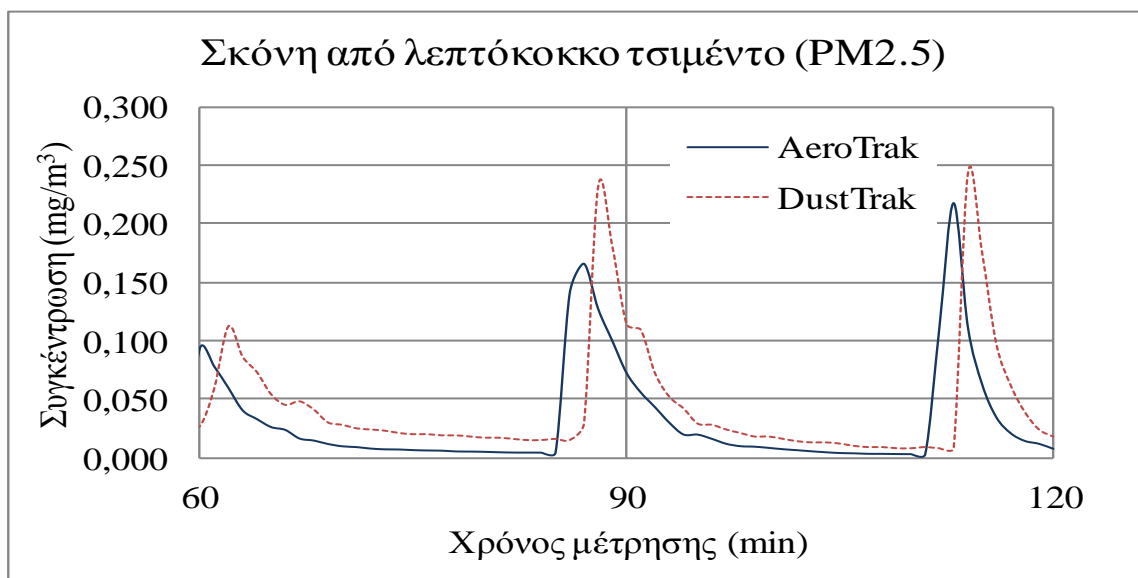


Εικόνα 5.10: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα PM_{10} , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά 30min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει

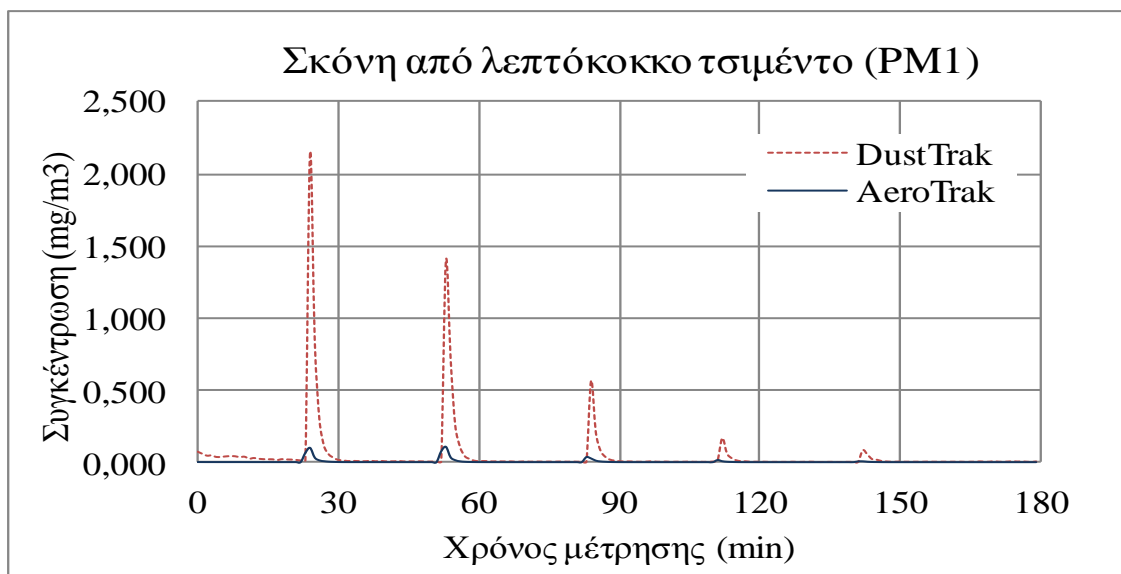
Παρόμοια συμπεριφορά στη διαχρονική εξέλιξη των μετρήσεων της σκόνης παρατηρήθηκε και για τα κλάσματα $PM_{2.5}$ και PM_1 , όπως φαίνεται στις εικόνες 5.11, 5.12 και 5.13.



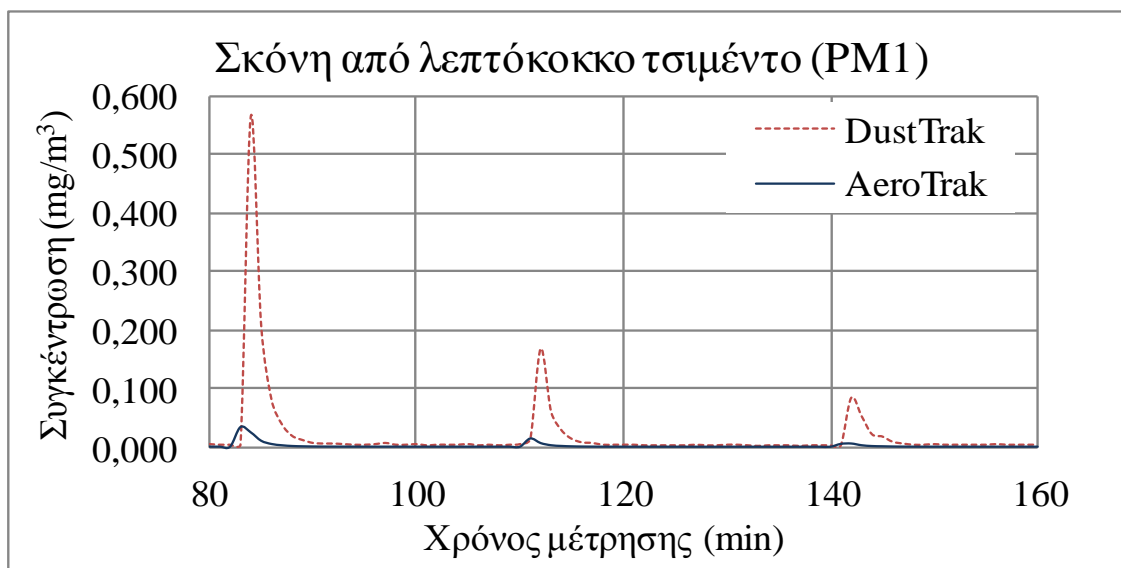
Εικόνα 5.11: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα PM_{2.5}, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά 30min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει



Εικόνα 5.12: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα PM_{2.5}, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak μετά από παρέλευση μίας ώρας. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά 30min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει



Εικόνα 5.13: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα $PM_{1.1}$, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά 30min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει



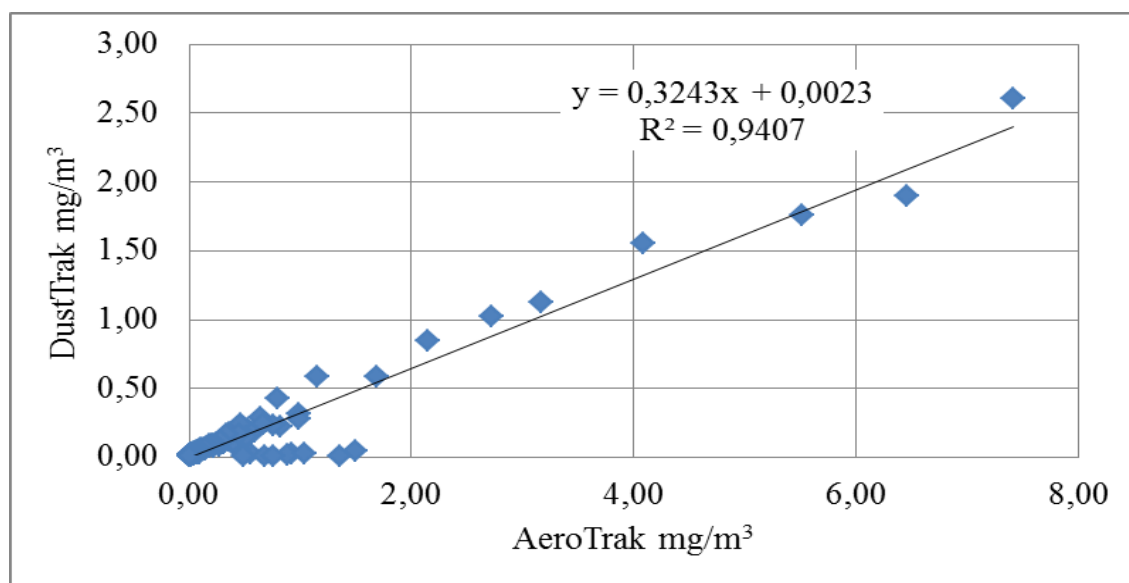
Εικόνα 5.14: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από τσιμέντο για το κλάσμα PM_1 , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak μετά από παρέλευση μίας ώρας. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά 30min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει

Οι συσχετίσεις των μετρήσεων της συγκέντρωσης με τις δυο μεθόδους σκέδασης είναι πολύ ικανοποιητικές, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης που προέκυψαν για κάθε ένα από τα κλάσματα PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 της

σκόνης του τσιμέντου και συνοψίζονται στον πίνακα 5.3 καθώς και από την εικόνα 5.15.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης για τη συσχέτιση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης από τσιμέντο για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα.

Κοκκομετρικό κλάσμα σκόνης από τσιμέντο	Εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης	Συντελεστής συσχέτισης R
PM ₁₀	$Y=0,1897x+0,0213$	0,7645
PM _{2,5}	$Y=1,5724x-0,0018$	0,9802
PM ₁	$Y=12,186x+0,0057$	0,8905
x=Συγκέντρωση σκόνης από AeroTrak Y=Συγκέντρωση σκόνης από DustTrak		



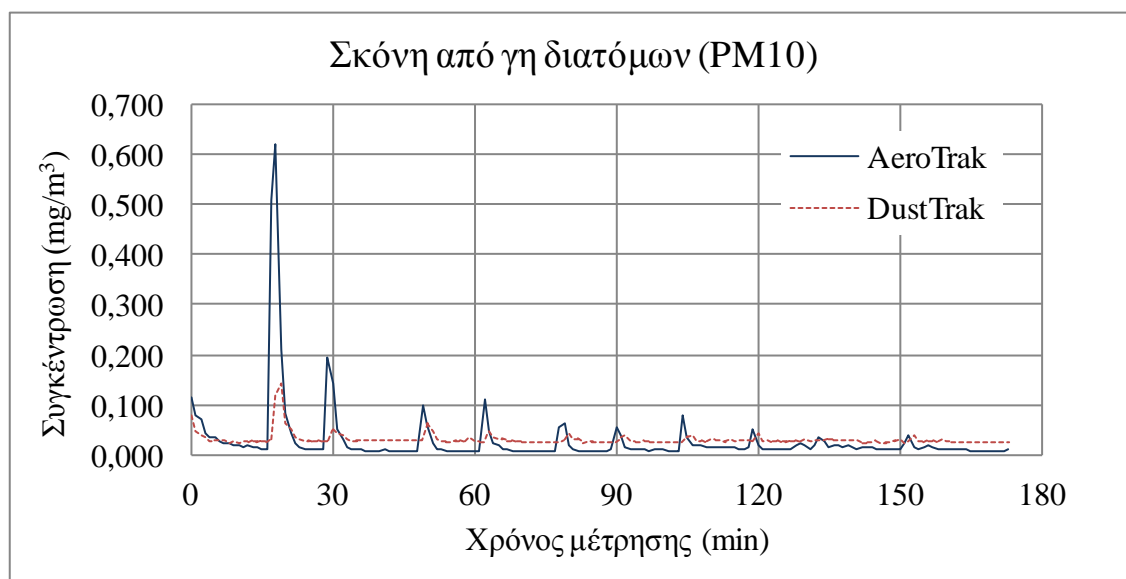
Εικόνα 5.15: Διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για το κλάσμα των PM_{2,5} λεπτόκοκκου τσιμέντου

Η ισχυρότερη συσχέτιση εμφανίζεται για το κλάσμα PM_{2,5} ενώ η ασθενέστερη για το PM₁₀. Οι συντελεστές συσχέτισης και για τη σκόνη του τσιμέντου εμφανίζονται από ισχυροί έως πολύ ισχυροί και επομένως είναι εφικτή η ακριβής μετατροπή των τιμών της συγκέντρωσης από τη μια μέθοδο στην άλλη.

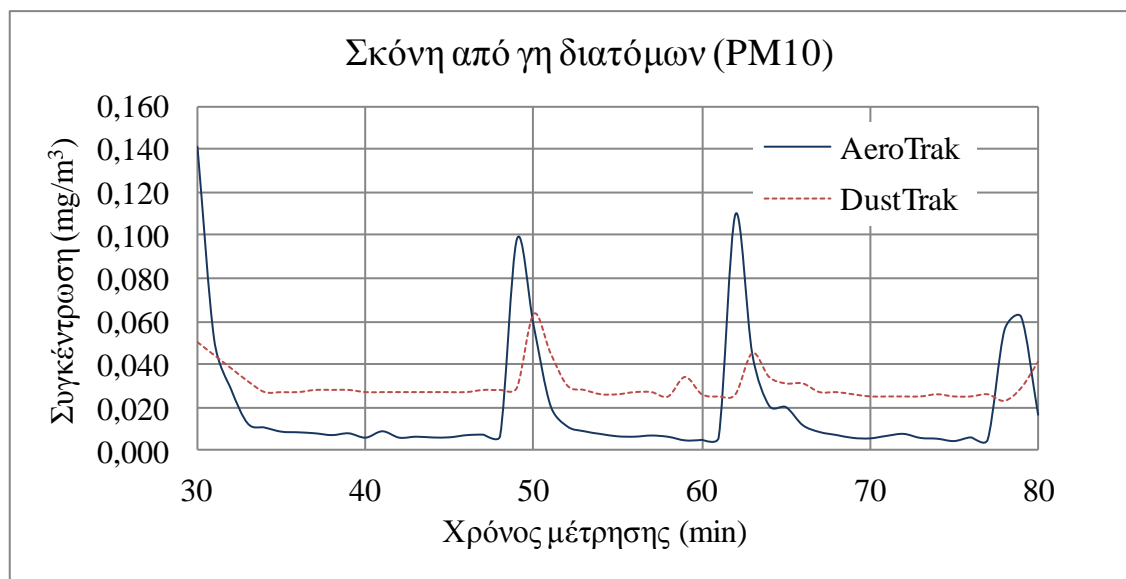
5.2.4. Μετρήσεις σκόνης από γη διατόμων

Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε είναι οι μετρήσεις συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρία διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα, στο PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 . Και στην περίπτωση αυτή πραγματοποιήθηκαν αναδεύσεις του αέρα εντός του θαλάμου της απαγωγού εστίας με εμφυσήσεις αέρα ανά δεκαπέντε λεπτά.

Στις εικόνες 5.16 και 5.17, παρουσιάζεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων της σκόνης για το κλάσμα PM_{10} για τη σκόνη από γη διατόμων, όπως μετρήθηκε από τα όργανα DustTrak και AeroTrak. Το όργανο AeroTrak Particle Counter αποκρίνεται με μεγαλύτερη ένταση στις ταχείες μεταβολές της συγκέντρωσης της σκόνης. Συγκεκριμένα, με κάθε περιδίνηση του αέρα που προκαλεί αύξηση της συγκέντρωσης της σκόνης λόγω αιώρησης και της σκόνης που έχει καθιζήσει, καταγράφονται κορυφοτιμές συγκέντρωσης στα 0,621, 0,194, 0,098, 0,110, 0,057, 0,037, 0,079, 0,050, 0,033 και 0,047 mg/m^3 από το AeroTrak (Εικόνα 5.16) ενώ οι αντίστοιχες κορυφοτιμές του DustTrak είναι χαμηλότερες 0,144, 0,050, 0,063, 0,045, 0,041, 0,034, 0,036, 0,045, 0,028 και 0,040 mg/m^3 .

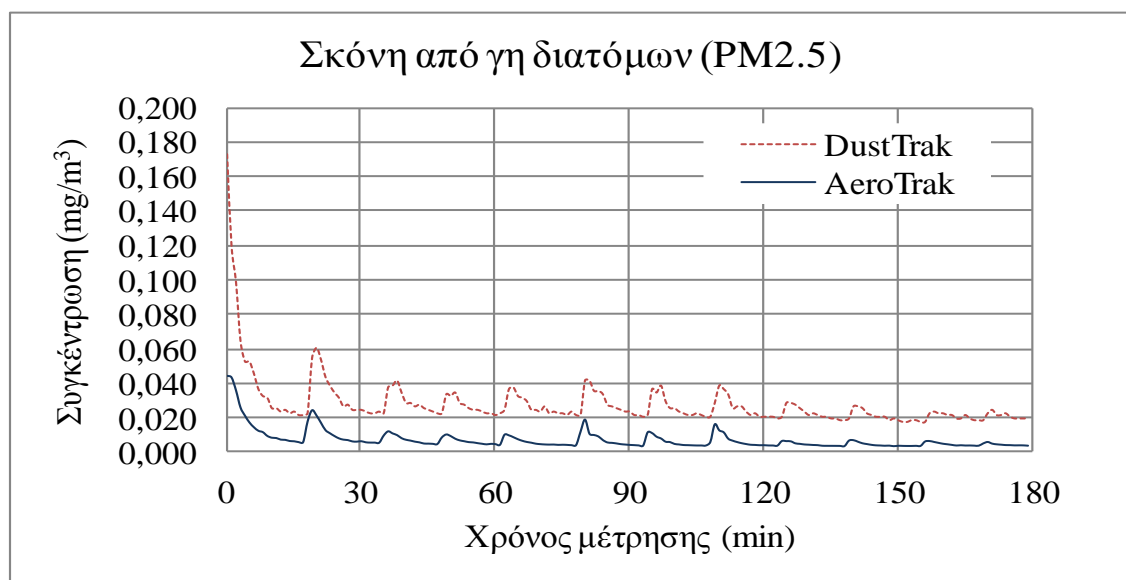


Εικόνα 5.16: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM_{10} , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak. Οι αιχμές της συγκέντρωσης οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει

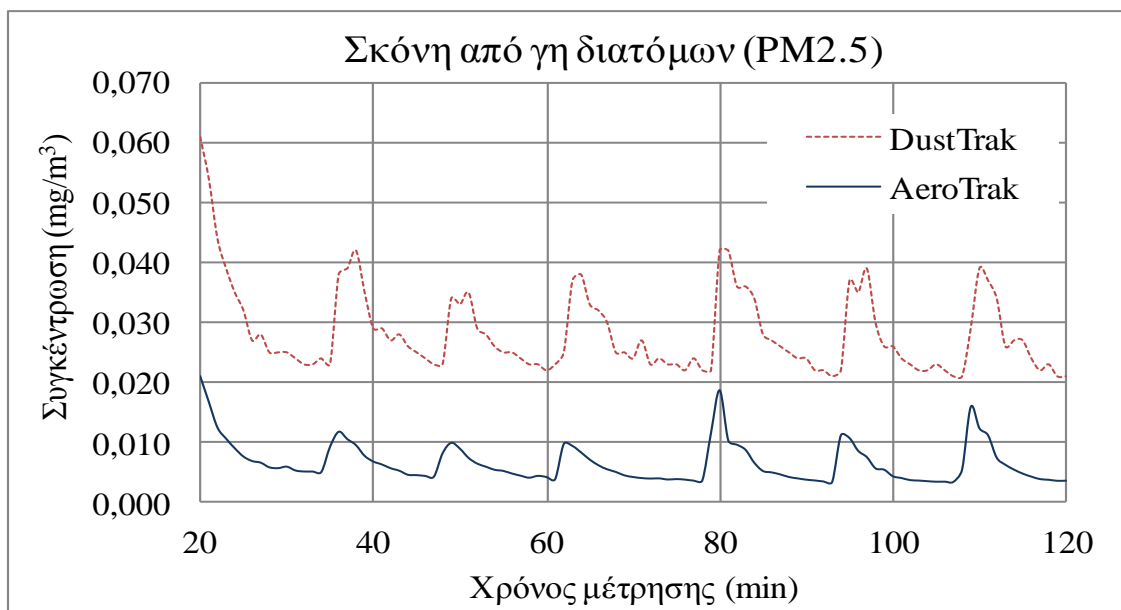


Εικόνα 5.17: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM₁₀, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak, μετά από παρέλευση μισής ώρας. Οι αιχμές της συγκέντρωσης οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει

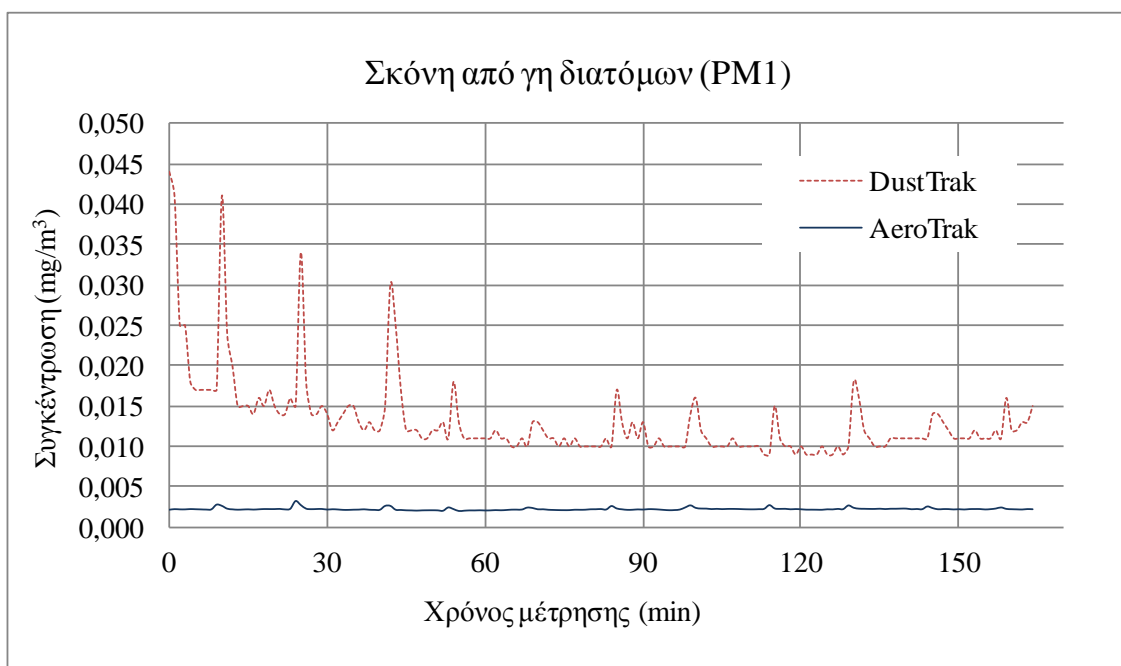
Η μεταβολή των μετρήσεων της σκόνης και για τα κλάσματα PM_{2.5} και PM₁, έδειξε παρόμοια συμπεριφορά, όπως φαίνεται στις εικόνες 5.18 έως 5.21.



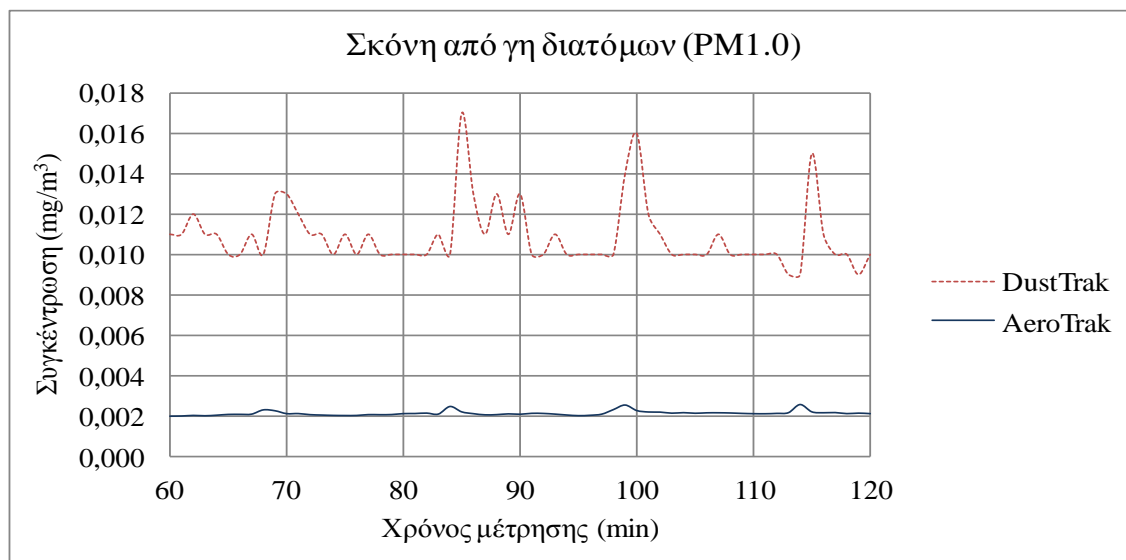
Εικόνα 5.18: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM_{2.5}, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά 15min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει



Εικόνα 5.19: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM_{2.5}, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak μετά από παρέλευση 20min. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά 30min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει



Εικόνα 5.20: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM₁, όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά ~15min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει

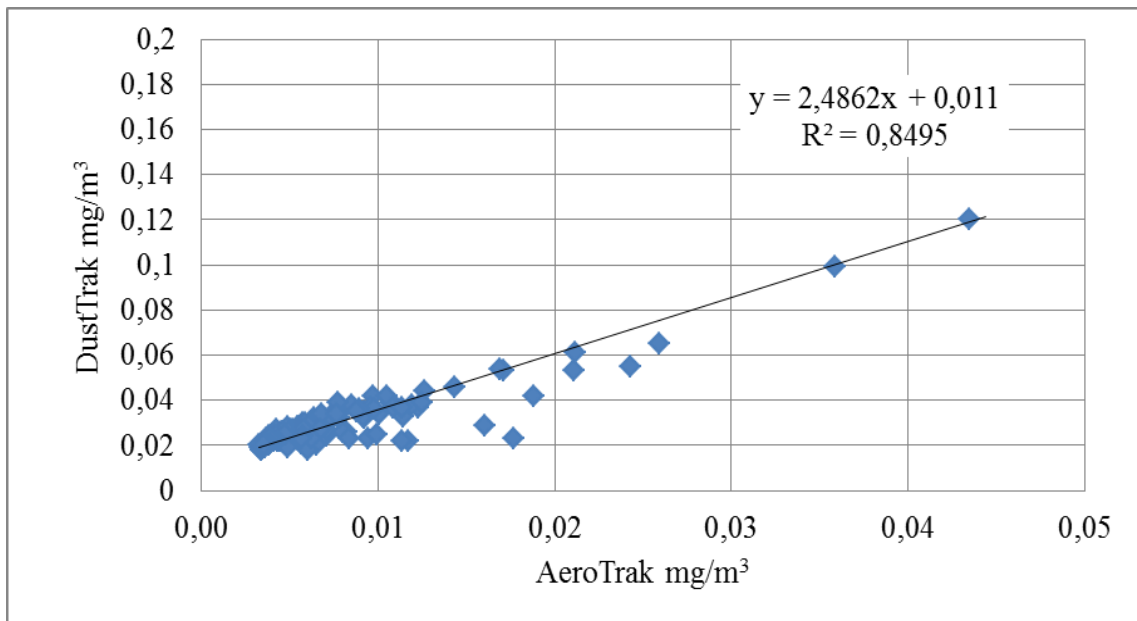


Εικόνα 5.21: Μεταβολή της συγκέντρωσης σκόνης από γη διατόμων για το κλάσμα PM_1 , όπως μετρήθηκε από το όργανο DustTrak και από το AeroTrak μετά από παρέλευση μίας ώρας. Οι αιχμές της συγκέντρωσης ανά ~ 15 min οφείλονται στη περιοδική ανάδευση του αέρα εντός του θαλάμου που συμπαρασύρει και τη σκόνη που έχει καθιζήσει.

Οι συσχετίσεις των μετρήσεων της συγκέντρωσης με τις δυο μεθόδους σκέδασης για την σκόνη από γη διατόμων εμφανίστηκαν πολύ ικανοποιητικές για το κλάσμα $PM_{2.5}$ (Εικόνα 5.22), σχετικά καλές για το PM_{10} και μη ικανοποιητικές για το κλάσμα PM_1 . Τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης που προέκυψαν για κάθε ένα από τα κλάσματα PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 της σκόνης της γη διατόμων συνοψίζονται στον πίνακα 5.4.

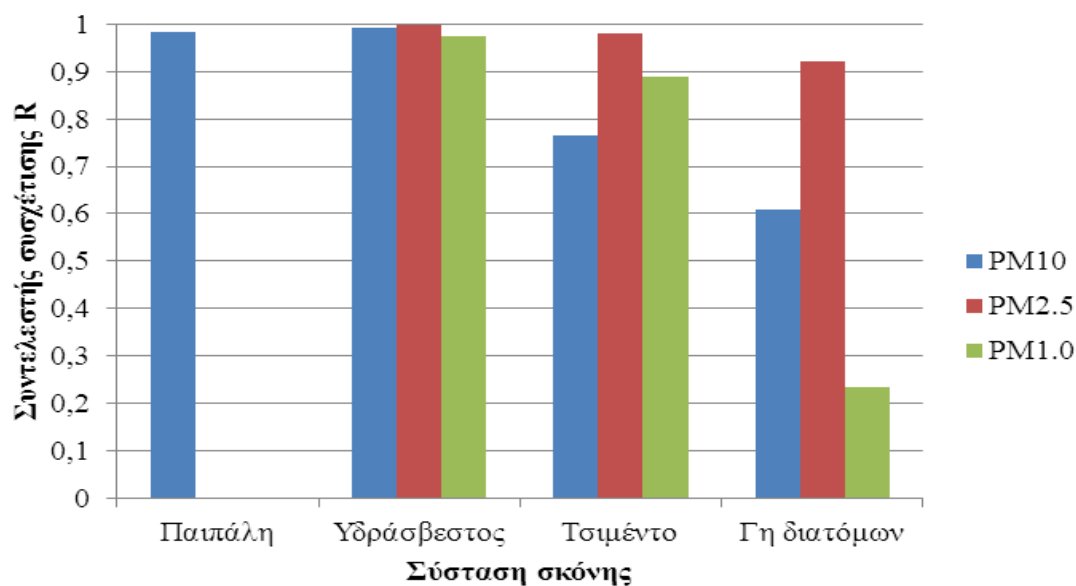
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης για τη συσχέτιση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης από γη διατόμων για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα.

Κοκκομετρικό κλάσμα σκόνης από γη διατόμων	Εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης	Συντελεστής συσχέτισης R
PM_{10}	$Y=0,1229x+0,0265$	0,6099
$PM_{2.5}$	$Y=2,4862x+0,011$	0,9216
PM_1	$Y=8,2483x-0,0043$	0,2345
x=Συγκέντρωση σκόνης από AeroTrak Y=Συγκέντρωση σκόνης από DustTrak		



Εικόνα 5.22: Διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για το κλάσμα των $PM_{2,5}$ γης διατόμων

Στο ιστόγραμμα της εικόνας 5.24 δίνονται οι τιμές του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R που υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις συγκεντρώσεις της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AeroTrak Particle Counter για όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1) και όλους τους τύπους σκόνης που εξετάστηκαν (ασβεστολιθική παιπάλη, υδράσβεστος, τσιμέντο και γη διατόμων). Για τη σκόνη από ασβεστολιθική παιπάλη μετρήθηκε μόνο το κλάσμα PM_{10} .



Εικόνα 5.23: Συγκεντρωτικό διάγραμμα σύγκρισης των συντελεστών συσχέτισης των συγκεντρώσεων της σκόνης που μετρώνται με το DustTrak Particle Monitor και το AaeroTrak Particle Counter για όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα και όλα τα είδη των σκονών που εξετάστηκαν.

5.2 Σύγκριση μεθόδων απευθείας μέτρησης με την αναλυτική

Εκτός από τις συγκρίσεις μεταξύ των μεθόδων άμεσης μέτρησης της συγκέντρωσης που βασίζονται στη σκέδαση του φωτός, συγκρίθηκαν και οι μέσες τιμές της συγκέντρωσης της σκόνης κάθε υλικού για το κλάσμα PM_{10} σε σχέση με εκείνη που υπολογίζεται με την αναλυτική βαρυτομετρική μέθοδο. Η επιλογή του κλάσματος PM_{10} έγινε με βάση την απαίτηση της ισχύουσας νομοθεσίας, ενώ η διάρκεια δειγματοληψίας ήταν τρεις ώρες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνοψίζονται στον πίνακα 5.5.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το όργανο DustTrak έδωσαν μέσες τιμές συγκεντρώσεων της σκόνης για το PM_{10} πλησιέστερα στη βαρυτομετρική μέθοδο, που θεωρείται η ακριβέστερη και συστήνεται από τη νομοθεσία. Μόνο για την σκόνη από γη διατόμων η μέση τιμή των μετρήσεων με το όργανο AeroTrak έδωσε τιμές πλησιέστερες στη βαρυτομετρική μέθοδο. Τα σχετικά σφάλματα του DustTrak σε σχέση με τη βαρυτομετρική κυμαίνονται από 8-16% ενώ του AeroTrak από 8-73%. Η διόρθωση των τιμών του AeroTrak με βάση τις εξισώσεις της γραμμικής παλινδρόμησης (Πίνακες 5.2 έως 5.4) που υπολογίστηκαν μείωσε σημαντικά το εύρος του σφάλματος στην περιοχή του 4-30%.

Πίνακας 5.5: Μέση τιμή της συγκέντρωσης της σκόνης με διαφορετικές μεθόδους μέτρησης

Σύσταση σκόνης PM ₁₀	Μέση τιμή της συγκέντρωσης της σκόνης (mg/m ³) με βάση τις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης				1-3 Διαφορά	1a-3 Διαφορά	2-3 Διαφορά	1-2 Διαφορά
	1	1a	2	3	%	%	%	%
Ασβεστολιθική παιπάλη	0,021	0,028	0,028	0,025	-16,0	12,0	12,0	-25,0
Υδράσβεστος	0,085	0,083	0,090	0,101	-15,8	-17,8	-10,9	-5,6
Τσιμέντο	0,061	0,162	0,209	0,227	-73,1	-29,5	-7,9	-70,8
Γη διατόμων	0,027	0,026	0,029	0,025	8,0	4,0	16,0	-6,9
1=AeroTrak 1a = Όπως η 1 με διόρθωση των τιμών με βάση τις εξισώσεις της γραμμικής παλινδρόμησης 2= DustTrak 3= Βαρυτομετρική (διαφορά βάρους φίλτρου)								

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων σε ορυχεία είναι ένα πεδίο που τα τελευταία χρόνια μελετάται εντατικά από την επιστημονική κοινότητα, κυρίως λόγω του ότι η έκθεση του εργαζομένου σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρουμένων σωματιδίων (PM) έχει συνδεθεί άμεσα με την εμφάνιση σοβαρών αναπνευστικών παθήσεων .

Σκοπός της προαναφερθείσας πειραματικής διαδικασίας ήταν η σύγκριση των μεθόδων φωτομετρικής μέτρησης σκόνης τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με τη συμβατική βαρυτομετρική μέθοδο, προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα τους στη μέτρηση των σωματιδίων που συναντώνται σε λατομικούς και μεταλλευτικούς χώρους.

Από τη σύγκριση των μεθόδων που εξετάστηκαν προκύπτει ότι οι μετρούμενες συγκεντρώσεις με το όργανο DustTrak Particle Monitor είναι κατά κανόνα (σε περιπτώσεις όπου δεν έχουμε απότομες αλλαγές της συγκέντρωσης της σκόνης) μεγαλύτερες εκείνων του AeroTrak Particle Counter. Αντίθετα, το AeroTrak Particle Counter παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε απότομη μεταβολή της συγκέντρωσης της σκόνης και εμφανίζει κορυφοτιμές υψηλότερες του DustTrak. Η διαφορετική αυτή συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το DustTrak ταξινομεί το κοκκομετρικό κλάσμα της σκόνης με βάση την αεροδυναμική της διάμετρο εκτιμώντας στη συνέχεια τη συγκέντρωση. Τα κοκκομετρικά κλάσματα που μετρούν κατά συνέπεια τα δυο αυτά όργανα δεν είναι τα ίδια αφού οι διάμετροι των σωματιδίων καθορίζονται με διαφορετικές αρχές. Επίσης, η είσοδος του αέρα στο DustTrak μέσω της κεφαλής δειγματοληψίας που περιλαμβάνει κυκλώνα-αεροταξινομητή-φίλτρο δημιουργεί μεγαλύτερο νεκρό χρόνο στο όργανο (όχι άμεση απόκριση) και ταυτόχρονα λειτουργεί και ως μηχανισμός εξομάλυνσης τιμών της συγκέντρωσης. Αντίθετα, το AeroTrak Particle Counter εισάγει άμεσα τον αέρα και αναγνωρίζει και καταμετρά αιωρούμενα σωματίδια με βάση τη διάμετρο που υπολογίζεται από τις εξισώσεις σκέδασης του φωτός κατά Mie. Αυτό το κάνει να αντιδρά αμεσότερα σε απότομες αλλαγές της συγκέντρωσης.

Από τα διαγράμματα συσχέτισης φάνηκε ότι οι καλύτερες συσχετίσεις επιτεύχθηκαν για το κλάσμα PM_{2.5} ενώ όσον αφορά το είδος της σκόνης οι καλύτερες συσχετίσεις επιτεύχθηκαν για τις σχετικά ομοιογενείς σκόνες από ασβεστολιθική παιπάλη και από υδράσβεστο.

Όσον αφορά τις αποκλίσεις των μέσων τιμών της συγκέντρωσης για το PM_{10} , σε σχέση με τη μέθοδο «διαφοράς βάρους φίλτρου», η μέθοδος άμεσης μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης με το όργανο DustTrak Particle Monitor έδωσε καλύτερα αποτελέσματα (απόκλιση 8-16%) σε σχέση με την άλλη μέθοδος άμεσης μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης με το όργανο AeroTrak Particle Counter (απόκλιση 8-70%). Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο αφού τόσο η βαρυτομετρική μέθοδος όσο και η μέθοδος άμεσης μέτρησης της συγκέντρωσης της σκόνης με το όργανο DustTrak Particle Monitor βασίζονται στις αεροδυναμικές διαμέτρους των σωματιδίων της σκόνης. Η διόρθωση των τιμών του οργάνου DustTrak Particle Monitor σύμφωνα με τις εξισώσεις της γραμμικής παλινδρόμησης που υπολογίστηκαν βελτίωσε σημαντικά και την ακρίβεια εκτίμησης της μέσης τιμής (4-30%). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η βαρυτομετρική μέθοδος είναι χρονόβορος και απαιτεί μεγάλη προσοχή κατά τη μεταφορά του δείγματος (φίλτρου) προς ζύγιση, καθώς μπορεί να επηρεαστεί από το εξωτερικό περιβάλλον (υγρασία και επιμόλυνση από σωματίδια), η χρήση αποκλειστικά άμεσων μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης αποτελεί μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα επιλογή και για την εκτίμηση της μέσης συγκέντρωσης της σκόνης του δωρου.

Για τη βελτίωση της ακρίβειας των άμεσων μετρήσεων προτείνεται να διερευνηθεί με νέα σειρά πειραμάτων που θα περιλαμβάνει περισσότερα υλικά τόσο η επίδραση της πυκνότητας όσο και της μορφολογίας των κόκκων της σκόνης στις άμεσες μετρήσεις τόσο του οργάνου DustTrak Particle Monitor και του AeroTrak Particle Counter.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής

- Basic Guide to Particle Counters and Particle Counting (2011). Particle Measuring Systems, Inc.
- Burrows, J. (1989). Environmental engineering in South African mines / The Mine Ventilation Society of South Africa, 2nd Edition, The Society, Johannesburg.
- Chaloulakou, A., Kassomenos, P., Spyrellis, N., Demokritou, P. and P. Koutrakis (2003). Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece. Atmospheric Environment, 37, 649-660.
- Chung, A., Chang, Daniel P.Y., Kleeman, M.J., Perry, K.D., Cahill, T.A., Dutcher D., McDougall, E.M. and K. Stroud (2001). Comparison of Real-Time Instruments Used To Monitor Airborne Particulate Matter, Journal of the Air & Waste Management Association.
- E.C. Technical Working Group on Particles (1996). Ambient Air Pollution by Particulate Matter - Draft Position Paper, Version 4.0
- Environmental Protection Agency (EPA) (2004). Air Quality Criteria for Particulate Matter, EPA/600/P-99/002aF, Volume I.
- Liu, Z., Wypych, P. and P. Cooper, (1999). Dust generation and air entrainment in bulk materials handling—A Review. Powder handling & processing.
- Manahan S.E. (1994). Environmental Chemistry, 6th Edition, Lewis Publishers, Florida.
- Morawska L. and T. Salthammer (2003), Indoor Environment Airborne Particles and Settled Dust, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Operation and Service Manual (2009), Model 9306 AEROTRAK Handheld Airborne Particle Counter, TSI.
- Operation and Service Manual (2005), Model 8520 DUSTTRAK Aerosol Monitor, TSI.
- Operating Instructions, Universal Sample Pump, SKC.
- Petavratzi, E., Kingman, S. and I. Lowndes, (2005). Particulates from mining operations: A review of sources, effects and regulations, Nottingham Mining

and Minerals Centre, School of Chemical, Environmental and Mining Engineering, University of Nottingham, University Park, Nottingham, UK p1185-1197.

- Ruzer, L.S. and N.H. Harley (2005). Aerosols Handbook Measurement, Dosimetry and Health Effects, CRC Press, Florida.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (2006). Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Wark, K., Warher C.F. and W.T. Davis (1998). Air Pollution: Its Origin and Control, Addison Wesley Longman.
- Watson, J.G., Chow, J.C., Dubois, D., Green, M., Frank N. and M. Pitchford (1997). Guidance for Network Design and Optimum Site Exposure for PM_{2.5} and PM₁₀, Office of Air Quality Planning and Standards - U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC27711).
- Wendehorst R. (2009). Δομικά Υλικά, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, 3^η έκδοση, Αθήνα.
- World Health Organization (1999). Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airborne Dust, World Health Organization, Switzerland.

Ελληνική

- Γαλετάκης, Μ. (2013). Εργαστηριακές ασκήσεις : Υγιεινή & Ασφάλεια σε Μεταλλευτικά & Υπόγεια Έργα, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Γαλετάκης, Μ. (2010). Υγιεινή και Ασφάλεια σε Μεταλλευτικά και Υπόγεια Έργα., Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Γεντεκάκης, Ι.Β. (2003). Ατμοσφαιρική Ρύπανση. Επιπτώσεις, Έλεγχος και Εναλλακτικές Τεχνολογίες, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Δρίβας, Σ. και Παπαδόπουλος Μ. Εκτίμηση του Επαγγελματικού Κινδύνου, http://www.elinyae.gr/el/lib_file_upload/_Ektimisi.1113226784021.pdf.
- ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε (2007). Ορυχεία-Μεταλλεία, Εκδόσεις ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, Α' έκδοση, p8-12, 103-104, Αθήνα.
- ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε (2003). Θέματα Υγείας & Ασφάλειας της Εργασίας, Εκδόσεις ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, Αθήνα.

- Κανονισμός Μεταλλευτικών και λατομικών Εργασιών (ΚΜΛΕ) (2012), Αθήνα.
- Κιρκινέζος, Ν. (2014). Εκτίμηση των Εκπομπών Αερομεταφερόμενων Σωματιδιακών Ρύπων από Συγκρότημα Παραγωγής Αδρανών Υλικών και Σκυροδέματος, Χανιά.
- Κορωνάιος, Αιμ. και Πουλάκος Γ. (2006). Τεχνικά Υλικά 1, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουϊμτζής, Θ., Φυτιανός, Κ. και Κ. Σαμαρά-Κωνσταντίνου (1998). Χημεία Περιβάλλοντος, Εκδόσεις University Study Press, Θεσσαλονίκη.
- Παπαγεωργίου, Κ. (2012). Εκτίμηση της Προσωπικής Έκθεσης Υποομάδων Πληθυσμού της Αθήνας σε Αιωρούμενα Σωματίδια Συνεισφορά Εσωτερικών και Εξωτερικών Πηγών Εκπομπής, Αθήνα.
- Σαραφόπουλος, Ν. (1985). Βιβλιογραφική Ανασκόπηση των Εργατικών Ατυχημάτων και των Επαγγελματικών Ασθενειών, Ευρωπαϊκό Ίδρυμα για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης και εργασίας, Πάτρα.
- Σταμπολιάδης, Η. (2008). Μηχανική Τεμαχιδίων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Τριανταφύλλου, Α. (2008). Δομικά Υλικά, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- Υπουργείο Εργασίας (2003). Επικίνδυνες χημικές ουσίες στους χώρους εργασίας, Αθήνα.
- Υπουργείο Εργασίας (2001). Μέσα Ατομικής Προστασίας, Αθήνα.
- Υπουργείο Εργασίας, (Αθήνα 2001-Β' Έκδοση). Μέθοδοι δειγματοληψίας και προσδιορισμού χημικών παραγόντων, Αθήνα.
- Υπουργείο Εργασίας (1993). Υγιεινή και Ασφάλεια στους Χώρους Εργασίας. Ειδική Έκδοση του Υπουργείου Εργασίας για το Ευρωπαϊκό Έτος 1992.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_counter
- <http://www.skinc.com/>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Mie_scattering
- http://en.wikipedia.org/wiki/Tyndall_effect
- <http://www.elinyae.gr/>

- <http://www.sciencedirect.com/>
- <http://www.tsi.com/aerosol-and-particle-research/>
- http://www.enochimiki.gr/Introduction_Diatomaceus_Earth.pdf
- http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/el_GR/Products2/ProdServ/Dir/Safety-Security/

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΓΙΑ ΟΡΥΚΤΕΣ ΣΚΟΝΕΣ

Πίνακες οριακών τιμών για ορυκτές σκόνες

ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΟΡΥΚΤΕΣ ΣΚΟΝΕΣ						
χημικός Παράγοντας	χημικός (Μοριακός) Τύπος	No Chemical Abstract System (CAS)	Ση- μεί- ωση	Οριακή Τιμή Έκθεσης	Ανώτατη Οριακή Τιμή έκθεσης	
				ppm mg/m ³	ppm mg/m ³	
Καθαρές μορφές κρυσταλλικού Ελεύθερου διοξειδίου του πυριτίου (SiO ₂)						
α. Χαλαζίας				0,1 (αναπν.)		
β. Τριπολίτης				0,1 (αναπν.)		
γ. Χριστοβαλίτης - τριδυμίτης				0,05 (αναπν.)		
Άνθρακας (<5% χαλαζία)	C	68131-74-8		2 (αναπν.)		
Ασβεστόλιθος	CaCO ₃			10 (εισπν.)		
Βωξίτης*				5 (αναπν.)		
Γραφίτης*	C	7782-42-5		10 (εισπν.)		
Γύψος*	CaSO ₄	7778-18-9		5 (αναπν.)		
Καολίνη*				10 (εισπν.)		
Μαγνησίτης*				5 (αναπν.)		
Μάρμαρο*	CaCO ₃	1317-65-3		10 (εισπν.)		
Σμύριδα*				5 (αναπν.)		
Τάλκης (χωρίς αμίαντο)	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	14807-96-6		10 (εισπν.)		
Αμίαντος (όλων των τύπων)				2 (αναπν.)		
*χωρίς ελεύθερο κρυσταλλικό διοξείδιο του πυριτίου (SiO ₂)				0,1 (ίνες/cm ³)		

ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΣΚΟΝΕΣ, ΑΤΜΟΥΣ, ΚΑΠΝΟΥΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΚΑΙ ΕΝΩΣΕΩΝ ΤΟΥΣ*

χημικός Παράγοντας	χημικός (Μοριακός) Τύπος	No CAS	Ση- μεί- ωση	Οριακή Τιμή Έκθεσης	Ανώτατη Οριακή Τιμή έκθεσης	
				ppm mg/m ³	ppm mg/m ³	
Αλουμίνα,	Al ₂ O ₃	1344-28-1		10 (αναπν.)		
Αντιμόνιο				5 (εισπν.)		
και ενώσεις του	Sb	7440-36-0		0,5		
Αργίλιο μεταλλικό	Al	7429-90-5		10 (αναπν.)		
				5 (εισπν.)		
Άργυρος (διαλυτές ενώσεις ως Ag)				0,01		
Αρσενικό και ενώσεις του (ως As)	7440-38-2			0,1		
Ασβέστιο ανθρ.	CaCO ₃	1317-65-3		10 (εισπν.)		
				5 (αναπν.)		
Ασβέστιο/πυριτικό	CaSiO ₃	1344-95-2		10 (εισπν.)		
				5 (αναπν.)		
Ασβεστίου οξείδιο	CaO	1305-78-8		5		
Ασβεστίου υδροξ.	Ca(OH) ₂	1305-62-0		5		
Βάριο (διαλυτές ενώσεις ως Ba)				0,5		
Κάδμιο και ενώσεις(ως Cd) Cd	7440-43-9			0,025		0,1

Κοβάλτιο(σκόνη-καπνοί)	Co	7440-48-4	0,1	
Κοβαλτίο-ενώσεις (ως Co)			0,1	
Μαγγανίου ενώσεις (ως Mn)			5	
Μαγνησίου, οξειδίο του MgO		1309-48-4	10 (εισπν.)	
			5 (αναπν.)	
Μολυβδένιο (αδιάλυτες ενώσεις ως Mo)			15	
Μολυβδένιο (διαλυτές ενώσεις ως Mo)			5	
Μολυβδος**			0,075	
Νικέλιο και ενώσεις του (ως Ni)			1	
Σιδήρου (διαλυτά άλατα ως Fe)			1	2
Σιδήρου (II) οξειδίο ως Fe	FeO	1345-25-1	10	10
Σιδήρου (III) οξειδίο ως Fe	Fe ₂ O ₃	1309-37-1	10	10
Τιτανίου διοξειδίο	TiO ₂	13463-67-7	10 (εισπν.)	
			5 (αναπν.)	
Υδράργυρος (Hg) και ενώσεις του ως Hg				
(εκτός των αλκυλενώσεων)	Hg	7439-97-6	Δ	0,1
Χαλκός (καπνός)	Cu	7440-50-8	0,2	
Χαλκός (σκόνη)	Cu	7440-50-8	1	2
Χρώμιο (μεταλλικό)	Cr	7440-47-3	1	
Χρωμίου (VI) διαλυτές ενώσεις (ως χρωμικό κάλιο)			0,5	
Χρωμίου (VI) μη διαλυτές ενώσεις			0,5	
Χρωμίου (III) ενώσεις ως χρώμιο			0,5	
Χρωμίου (III) ενώσεις ως χρώμιο			0,5	
Ψευδάργυρος χλωριούχος (καπνοί)	ZnCl ₂	7646-85-7	1	2
Ψευδαργύρου Οξειδίο (καπνοί)	ZnO	1314-13-2	5	10

*Οι οριακές τιμές, όπου δεν ορίζεται διαφορετικά, αναφέρονται σε μεταλλομονάδες του αντιστοίχου μετάλλου.

**Ειδικά για τον μόλυβδο εφαρμόζονται οι διατάξεις του Π.Δ. 94/87 «Προστασία των εργαζομένων που εκτίθενται στον μεταλλικό μόλυβδο και τις ενώσεις ιόντων του κατά την εργασία» (Φ.Ε.Κ. 54/Α/22-4-1987), όπως ισχύει.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακες μετρήσεων

α/α	Ημερομηνία	Χρόνος	AeroTrak	DustTrak
1	19/11/2013	12:16	3,779	1,671
2	19/11/2013	12:17	2,793	1,053
3	19/11/2013	12:18	2,314	0,793
4	19/11/2013	12:19	1,577	0,719
5	19/11/2013	12:20	1,069	0,493
6	19/11/2013	12:21	0,835	0,328
7	19/11/2013	12:22	0,512	0,265
8	19/11/2013	12:23	0,373	0,193
9	19/11/2013	12:24	0,250	0,159
10	19/11/2013	12:25	0,187	0,125
11	19/11/2013	12:26	0,145	0,109
12	19/11/2013	12:27	0,121	0,104
13	19/11/2013	12:28	0,108	0,100
14	19/11/2013	12:29	0,083	0,091
15	19/11/2013	12:30	0,073	0,086
16	19/11/2013	12:31	0,073	0,086
17	19/11/2013	12:32	0,068	0,084
18	19/11/2013	12:33	0,058	0,081
19	19/11/2013	12:34	0,053	0,078
20	19/11/2013	12:35	0,005	0,077
21	19/11/2013	12:36	0,044	0,074
22	19/11/2013	12:37	0,041	0,073
23	19/11/2013	12:38	0,043	0,074
24	19/11/2013	12:39	0,035	0,074
25	19/11/2013	12:40	0,033	0,069
26	19/11/2013	12:41	0,036	0,069
27	19/11/2013	12:42	0,030	0,072
28	19/11/2013	12:43	0,029	0,070
29	19/11/2013	12:44	0,028	0,069
30	19/11/2013	12:45	0,027	0,068

α/α	Ημερομηνία	Χρόνος	AeroTrak	DustTrak
31	19/11/2013	12:46	0,026	0,068
32	19/11/2013	12:47	0,021	0,065
33	19/11/2013	12:48	0,022	0,066
34	19/11/2013	12:49	0,019	0,068
35	19/11/2013	12:50	0,019	0,065
36	19/11/2013	12:51	0,019	0,066
37	19/11/2013	12:52	0,015	0,063
38	19/11/2013	12:53	0,015	0,065
39	19/11/2013	12:54	0,017	0,065
40	19/11/2013	12:55	0,016	0,065
41	19/11/2013	12:56	0,014	0,065
42	19/11/2013	12:57	0,015	0,061
43	19/11/2013	12:58	0,014	0,059
44	19/11/2013	12:59	0,016	0,061
45	19/11/2013	13:00	0,014	0,063
46	19/11/2013	13:01	0,015	0,060
47	19/11/2013	13:02	0,014	0,061
48	19/11/2013	13:03	0,012	0,061
49	19/11/2013	13:04	0,015	0,059
50	19/11/2013	13:05	0,014	0,058
51	19/11/2013	13:06	0,012	0,060
52	19/11/2013	13:07	0,013	0,059
53	19/11/2013	13:08	0,010	0,058
54	19/11/2013	13:09	0,011	0,057
55	19/11/2013	13:10	0,011	0,058
56	19/11/2013	13:11	0,010	0,057
57	19/11/2013	13:12	0,010	0,056
58	19/11/2013	13:13	0,009	0,056
59	19/11/2013	13:14	0,010	0,055
60	19/11/2013	13:15	0,009	0,057

α/α	Ημερομηνία	Χρόνος	AeroTrak	DustTrak
91	19/11/2013	13:46	0,010	0,054
92	19/11/2013	13:47	0,011	0,054
93	19/11/2013	13:48	0,009	0,054
94	19/11/2013	13:49	0,009	0,054
95	19/11/2013	13:50	0,008	0,053
96	19/11/2013	13:51	0,006	0,055
97	19/11/2013	13:52	0,007	0,055
98	19/11/2013	13:53	0,007	0,052
99	19/11/2013	13:54	0,007	0,052
100	19/11/2013	13:55	0,008	0,051
101	19/11/2013	13:56	0,007	0,052
102	19/11/2013	13:57	0,010	0,051
103	19/11/2013	13:58	0,009	0,051
104	19/11/2013	13:59	0,008	0,051
105	19/11/2013	14:00	0,008	0,050
106	19/11/2013	14:01	0,009	0,049
107	19/11/2013	14:02	0,007	0,053
108	19/11/2013	14:03	0,007	0,051
109	19/11/2013	14:04	0,007	0,054
110	19/11/2013	14:05	0,007	0,050
111	19/11/2013	14:06	0,007	0,051
112	19/11/2013	14:07	0,006	0,050
113	19/11/2013	14:08	0,006	0,050
114	19/11/2013	14:09	0,006	0,051
115	19/11/2013	14:10	0,006	0,050
116	19/11/2013	14:11	0,007	0,051
117	19/11/2013	14:12	0,007	0,051
118	19/11/2013	14:13	0,006	0,050
119	19/11/2013	14:14	0,005	0,051
120	19/11/2013	14:15	0,006	0,050

α/α	Ημερομηνία	Χρόνος	AeroTrak	DustTrak
121	19/11/2013	14:16	0,008	0,050
122	19/11/2013	14:17	0,006	0,049
123	19/11/2013	14:18	0,006	0,050
124	19/11/2013	14:19	0,007	0,049
125	19/11/2013	14:20	0,007	0,051
126	19/11/2013	14:21	0,005	0,049
127	19/11/2013	14:22	0,007	0,050
128	19/11/2013	14:23	0,008	0,049
129	19/11/2013	14:24	0,008	0,050
130	19/11/2013	14:25	0,008	0,050
131	19/11/2013	14:26	0,007	0,049
132	19/11/2013	14:27	0,006	0,049
133	19/11/2013	14:28	0,005	0,049
134	19/11/2013	14:29	0,005	0,052
135	19/11/2013	14:30	0,005	0,048
136	19/11/2013	14:31	0,007	0,058
137	19/11/2013	14:32	0,006	0,048
138	19/11/2013	14:33	0,005	0,049
139	19/11/2013	14:34	0,005	0,048
140	19/11/2013	14:35	0,004	0,047
141	19/11/2013	14:36	0,006	0,047
142	19/11/2013	14:37	0,005	0,048
143	19/11/2013	14:38	0,004	0,047
144	19/11/2013	14:39	0,005	0,047
145	19/11/2013	14:40	0,005	0,047
146	19/11/2013	14:41	0,005	0,048
147	19/11/2013	14:42	0,005	0,047
148	19/11/2013	14:43	0,005	0,048
149	19/11/2013	14:44	0,005	0,048
150	19/11/2013	14:45	0,006	0,048

α/α	Ημερομηνία	Χρόνος	AeroTrak	DustTrak
151	19/11/2013	14:46	0,006	0,050
152	19/11/2013	14:47	0,009	0,048
153	19/11/2013	14:48	0,011	0,048
154	19/11/2013	14:49	0,010	0,047
155	19/11/2013	14:50	0,010	0,048
156	19/11/2013	14:51	0,010	0,048
157	19/11/2013	14:52	0,013	0,048
158	19/11/2013	14:53	0,015	0,050
159	19/11/2013	14:54	0,012	0,052
160	19/11/2013	14:55	0,011	0,062
161	19/11/2013	14:56	0,010	0,048
162	19/11/2013	14:57	0,010	0,047
163	19/11/2013	14:58	0,010	0,047
164	19/11/2013	14:59	0,011	0,047
165	19/11/2013	15:00	0,010	0,047
166	19/11/2013	15:01	0,011	0,047
167	19/11/2013	15:02	0,010	0,046
168	19/11/2013	15:03	0,008	0,047
169	19/11/2013	15:04	0,008	0,047
170	19/11/2013	15:05	0,008	0,046
171	19/11/2013	15:06	0,009	0,046
172	19/11/2013	15:07	0,007	0,045
173	19/11/2013	15:08	0,006	0,046
174	19/11/2013	15:09	0,009	0,045
175	19/11/2013	15:10	0,008	0,045
176	19/11/2013	15:11	0,007	0,045
177	19/11/2013	15:12	0,009	0,045
178	19/11/2013	15:13	0,008	0,044
179	19/11/2013	15:14	0,008	0,046
180	19/11/2013	15:15	0,008	0,044