



# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

---

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική και Θεωρητική Διερεύνηση  
των Εκπομπών Ρύπων σε Εργοστάσιο  
Πυρόλυσης Ελαστικού

Εκπόνηση: Διβάνης Σωτήριος

Επιβλέπων: Σταπουντζής Ερρίκος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ ΙΟΥΝΙΟΣ 2004



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 3935/1  
Ημερ. Εισ.: 30-09-2004  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
628.4  
ΔΙΒ

Αφιερώνεται  
στην οικογένειά μου

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Οφείλω ευχαριστίες στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Νικόλαο Ανδρίτσο, για την πολύτιμη βοήθειά του στην πραγματοποίηση των χημικών αναλύσεων που αποτελούν τμήμα της πειραματικής μου μελέτης. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Βασίλη Μποντόζογλου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Νικόλαο Πελεκάση και Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Πετρόπουλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ τον Διοικητή του Στρατοπέδου 304 ΠΕΒ Σχη (ΤΧ) κ. Παναγιώτη Κοσμά, τον Διευθυντή στη Διεύθυνση Εξακρίβωσης και Ποιοτικού Ελέγχου του Στρατοπέδου 304 ΠΕΒ Δρ. Χημικό κ. Νικόλαο Μαρέδη, τον υπεύθυνο μηχανικό στη μονάδα ρευστομηχανικής κλίνης Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Αργύρη Κελαϊδόπουλο καθώς και τους εργαζομένους στη μονάδα ρευστομηχανικής κλίνης κ. Αποστόλη Ευσταθίου, κ. Δημήτριο Θεοδοσίου, κ. Ιωάννη Κουτίνα, κ. Κωνσταντίνο Κυρίτση, κ. Βασίλειο Μπαταγκιώνη, κ. Δημήτριο Παπαδόπουλο και κ. Αθανάσιο Παρλάντζα για την πολύτιμη βοήθειά τους στον προγραμματισμό και την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων. Ευχαριστώ τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξή τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Θεόδωρο και Ευαγγελία Διβάνη και στην αδελφή μου Μαρκέλλα, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	1
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	3
1.2.1 Στόχοι της εργασίας .....	4
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	6
2.1 ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ.....	6
2.1.1 Ροή μέσα από κλίνες στερεών.....	6
2.1.2 Ρευστοποίηση.....	10
2.1.2.1 Συνθήκες για την ρευστοποίηση.....	11
2.1.2.2 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης.....	14
2.1.3 Τύποι Ρευστοποίησης.....	15
2.1.3.1 Μικρομερής ρευστοποίηση.....	15
2.1.3.2 Ρευστοποίηση φυσαλίδων.....	17
2.1.3.3 Τυρβώδης ρευστοποίηση.....	18
2.1.3.4 Ρευστοποίηση μεταφοράς.....	19
2.1.4 Εφαρμογές της ρευστοποίησης.....	20
2.1.4.1 Χημικές Διεργασίες.....	21
2.1.4.2 Φυσικές Διεργασίες.....	23
2.2 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΥΛΗ.....	25
2.2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2.1.1 Ορισμός.....	25
2.2.1.2 Εμφάνιση – Δημιουργία.....	25
2.2.1.3 Κατηγοριοποίηση.....	25
2.2.1.4 Αιώρηση σωματιδιακής ύλης.....	27
2.2.1.5 Επίδραση στην ανθρώπινη υγεία.....	27
2.2.1.6 Όρια εκπομπής και έκθεσης.....	28
2.2.2 Γενικά στοιχεία.....	29
2.2.3 Πηγές εκπομπής σωματιδίων.....	30
2.2.4 Κατηγοριοποίηση.....	32
2.2.4.1 Ορισμός διαμέτρου σωματιδίων.....	32
2.2.4.2 Φυσική κατάσταση.....	34

2.2.4.3 Μέγεθος.....	35
2.2.4.4 Χημική κατάσταση .....	36
2.2.5 Αιώρηση της σωματιδιακής ύλης.....	38
2.2.6 Σωματιδιακή ύλη και ανθρώπινος οργανισμός .....	38
2.2.6.1 Έκθεση σε χημικό παράγοντα .....	38
2.2.6.2 Δομή αναπνευστικού συστήματος.....	40
2.2.6.3 Μηχανισμοί εναπόθεσης.....	41
2.2.6.4 Επίδραση των σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία .....	42
2.2.7 Έλεγχος ρύπανσης από σωματιδιακή ύλη.....	44
2.2.7.1 Θάλαμοι βαρύτητας .....	44
2.2.7.2 Κυκλώνες.....	44
2.2.7.3 Πύργοι έκπλυσης ή ψεκασμού.....	45
2.2.7.4 Σακκόφιλτρα .....	45
2.2.7.5 Ηλεκτροστατικά φίλτρα .....	48
2.3 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ .....	50
2.3.1 Εισαγωγή.....	50
2.3.2 Υγιεινή και ασφάλεια στους χώρους εργασίας .....	50
2.3.2.1 Ελληνική νομοθεσία.....	52
2.3.2.2 Προεδρικό Διάταγμα 307/1986 .....	52
2.3.2.3 Προεδρικό Διάταγμα 77/1993 .....	52
2.3.2.4 Προεδρικό Διάταγμα 90/1999 .....	53
2.3.2.5 Προεδρικό Διάταγμα 339/2001 .....	54
2.3.3 Σωματιδιακή ύλη και περιβαλλοντικός αέρας.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	55
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	55
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	58
3.2.1 Seghers Fluidised Bed Degradar System (SFDS).....	59
3.2.1.1 Χώρος ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων .....	61
3.2.1.2 Fluidised bed reactor .....	61
3.2.1.3 Θάλαμος καύσης .....	62
3.2.1.4 Θάλαμος μετάκαυσης .....	63
3.2.2 Ventilation and Pollution Abatement System.....	63
3.2.2.1 Τμήμα ψύξης καυσαερίων .....	64
3.2.2.2 Υδρόψυξη .....	65
3.2.2.3 Βαλβίδες ανάμιξης αέρα .....	66
3.2.2.4 Έγχυση μέσων προσρόφησης.....	66
3.2.2.5 Φίλτρο κεραμικών ινών (CEF).....	67

3.2.2.6 Θάλαμοι φίλτρων .....	67
3.2.2.7 Σύστημα καθαρισμού φίλτρων .....	68
3.2.2.8 Σωληνώσεις, ανεμιστήρας έλξης καυσαερίων (ID-fan), καμινάδα.....	68
3.2.2.9 Σύστημα συνεχούς ελέγχου εκπομπής ρύπων (CEMS) .....	69
3.2.2.10 Αέριοι ρύποι.....	70
3.2.2.11 Σωματίδια .....	71
3.2.2.12 Τιμές αναφοράς: πίεση, θερμοκρασία, παροχή.....	72
3.2.3 Feeding Systems .....	72
3.2.3.1 Material Handling System (MHDL).....	72
3.2.3.2 Continuous Part Feeding Equipment (CPFE).....	73
3.2.4 Quenching tank (QUTA) and Reactor Medium Recovery System (RMRS) .....	74
3.2.4.1 Quenching Tank (QUTA) .....	75
3.2.4.2 Reactor Medium Recovery System (RMRS).....	76
3.2.5 Controls system (CTRL).....	76
3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	78
3.3.1 Αρχή λειτουργίας.....	78
3.3.2 Σκοπός της διεργασίας.....	80
3.3.3 Τροφοδοσία των εξαρτημάτων .....	82
3.3.3.1 Σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες.....	83
3.3.3.2 Συνεχές σύστημα τροφοδοσίας.....	83
3.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ PM <sub>10</sub> .....	85
3.4.1 Αρχή λειτουργίας.....	85
3.4.2 TrakPro Data Analysis Software.....	86
3.4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	89
4.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	89
4.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΥΛΗΣ .....	90
4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΥΛΗΣ.....	90
4.3.1 Μετρήσεις για τον εντοπισμό των πιθανών πηγών ρύπανσης.....	91
4.3.2 Μετρήσεις στο χώρο εργασίας .....	92
4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	93
4.5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	94
4.5.1 Περιγραφή των μεθόδων SEM και EDS .....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	97
5.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	97
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	98

---

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ .....	106
5.3.1 Αποτελέσματα εντοπισμού πηγής ρύπανσης .....	106
5.3.2 Αποτελέσματα στο χώρο εργασίας .....	158
5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	166
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	168
6.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	168
6.2 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	169
6.3 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ .....	170
6.3.1 Εσωτερικός χώρος της εγκατάστασης .....	170
6.3.2 Συνεχές σύστημα τροφοδοσίας .....	170
6.3.3 Σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες .....	171
6.3.4 Χώρος εργασίας .....	172
6.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ .....	173
6.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	173
6.5.1 Πηγή ρύπανσης .....	173
6.5.1.1 Εισαγωγή – τροφοδοσία σε παρτίδες .....	173
6.5.1.2 Εξαγωγή – τροφοδοσία σε παρτίδες .....	175
6.5.1.3 Εισαγωγή – συνεχής τροφοδοσία .....	175
6.5.2 Τύπος μεταλλικών εξαρτημάτων .....	176
6.5.3 Χώρος εργασίας .....	176
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	178
7.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	178
7.2 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ .....	178
7.3 ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ .....	179
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	181



## ΣΧΗΜΑΤΑ – ΠΙΝΑΚΕΣ

Σχήμα 1.1 – Σωματιδιακή ύλη που έχει εναποτεθεί στο χώρο της εγκατάστασης .....	3
Σχήμα 2.1 – Μόνιμη και ρευστοποιημένη κλίνη .....	12
Σχήμα 2.2 – Πτώση πίεσης και ύψος κλίνης συναρτήσει της φαινόμενης ταχύτητας	13
Σχήμα 2.3 – Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης .....	16
Σχήμα 2.4 – Τύποι ρευστοποίησης .....	20
Σχήμα 2.5 – Εφαρμογές της ρευστοποιημένης κλίνης .....	21
Σχήμα 2.6 – Μονάδα αποτέφρωσης αποβλήτων .....	23
Σχήμα 2.7 – Κατηγοριοποίηση σωματιδίων κατά μέγεθος .....	36
Σχήμα 2.8 – Διάκριση σωματιδίων κατά μέγεθος και φυσική κατάσταση .....	37
Σχήμα 2.9 – Χρονικό διάγραμμα έκθεσης .....	39
Σχήμα 2.10 – Δομή αναπνευστικού συστήματος .....	40
Σχήμα 2.11 – Μηχανισμοί κατακράτησης σωματιδίων στα σακκόφιλτρα .....	47
Σχήμα 2.12 – Σακκόφιλτρο με μηχανική δόνηση .....	48
Σχήμα 2.13 – Ηλεκτροστατικό φίλτρο .....	49
Σχήμα 3.1 – Πρόσοψη του χώρου πραγματοποίησης των μετρήσεων .....	56
Σχήμα 3.2 – Κάτοψη του χώρου πραγματοποίησης των μετρήσεων .....	57
Σχήμα 3.3 – Απεικόνιση της εγκατάστασης .....	60
Σχήμα 3.4 – Απεικόνιση των διατάξεων του Seghers Fluidised Bed Degradation System (SFDS) .....	64
Σχήμα 3.5 – Απεικόνιση του Ventilation and Pollution Abatement System (VPAS) ..	65
Σχήμα 3.6 – Σύστημα καθαρισμού φίλτρων .....	69
Σχήμα 3.7 – Σύστημα συνεχούς ελέγχου εκπομπής ρύπων (CEMS) .....	70
Σχήμα 3.8 – Απεικόνιση του Material Handling System (MHDL) .....	73
Σχήμα 3.9 – Απεικόνιση του Continuous Part Feeding Equipment (CPFE) .....	74
Σχήμα 3.10 – Βασική μορφή του Scada .....	77
Σχήμα 3.11 – Μορφή λειτουργίας του Scada .....	77
Σχήμα 3.12 – Απεικόνιση της δεξαμενής ρευστομηχανικής κλίνης και του θαλάμου καύσης .....	79
Σχήμα 3.13 – Πίροι και διόπτρες πριν την επεξεργασία .....	81
Σχήμα 3.14 – Πίροι και διόπτρα μετά την επεξεργασία .....	81
Σχήμα 3.15 – Πέλματα πριν και μετά την επεξεργασία .....	81
Σχήμα 3.16 – Πίροι και διόπτρα πριν την επεξεργασία .....	82
Σχήμα 3.17 – Διόπτρα μετά την επεξεργασία .....	82
Σχήμα 3.18 – Απεικόνιση της διεργασίας σε σύστημα τροφοδοσίας με παρτίδες .....	84
Σχήμα 3.19 – Απεικόνιση της διεργασίας σε συνεχές σύστημα τροφοδοσίας .....	84

Σχήμα 3.20 – DustTrak Aerosol Monitor, Model 8520 .....	85
Σχήμα 3.21 – Αρχή λειτουργίας του DustTrak Aerosol Monitor.....	86
Σχήμα 3.22 – TrakPro Data Analysis Software.....	87
Σχήμα 3.23 – Επιλογή του υπομενού Time Constants .....	88
Σχήμα 4.1 – Απεικόνιση των σημείων μέτρησης της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης για τον προσδιορισμό των πηγών ρύπανσης του εσωτερικού χώρου .....	93
Σχήμα 4.2 – Επιλογή του υπομενού Receive, Export.....	95
Σχήμα 5.1 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 100 μm .....	98
Σχήμα 5.2 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 50 μm .....	99
Σχήμα 5.3 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 50 μm .....	99
Σχήμα 5.4 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 20 μm .....	100
Σχήμα 5.5 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 20 μm .....	100
Σχήμα 5.6 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 10 μm .....	101
Σχήμα 5.7 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 10 μm .....	101
Σχήμα 5.8 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 5 μm .....	102
Σχήμα 5.9 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 5 μm .....	102
Σχήμα 5.10 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 2 μm .....	103
Σχήμα 5.11 – Ανάλυση με τη μέθοδο EDS του δείγματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10.....	103
Σχήμα 5.12 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 5 μm .....	104
Σχήμα 5.13 – Ανάλυση με τη μέθοδο EDS του δείγματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.12.....	104
Σχήμα 5.14 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 10 μm .....	105
Σχήμα 5.15 – Ανάλυση με τη μέθοδο EDS του δείγματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.14.....	105
Σχήμα 5.16 – Απεικόνιση των σημείων μέτρησης της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης.....	107
Σχήμα 5.74 – Περιοχή μετρήσεων θερμοκρασίας.....	166
Σχήμα 5.75 – Μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο .....	167
Σχήμα 5.76 – Μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση .....	167
Σχήμα 6.1 – Εισαγωγή του μεταλλικού καλαθιού στο θάλαμο καύσης.....	174
Πίνακας 2.1 – Σφαιρικότητα υλικών.....	10
Πίνακας 2.2 – Πηγές εκπομπής συστατικών σωματιδιακής ύλης.....	31
Πίνακας 3.1 – Οριακές τιμές και εύρος τιμών του NDIR αναλυτή.....	71
Πίνακας 6.1 – Μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή των μέγιστων συγκεντρώσεων .....	176

## ΣΥΜΒΟΛΑ

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΣΗΜΑΣΙΑ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΕΞΙΣΩΣΗ
<b>Λατινικοί Χαρακτήρες</b>			
A	Επιφάνεια (εγκάρσια διατομή)	$L^2$	Εξ.(2.3)
$A_s$	Εγκάρσια επιφάνεια στρώματος στερεών σωματιδίων	$L^2$	Εξ.(2.3)
$A_w$	Ολική επιφάνεια επαφής ρευστού με στερεά σωματίδια	$L^2$	Εξ.(2.6)
$C_a$	Συντελεστής ολίσθησης Cunningham σχετικά με αεροδυναμική διάμετρο	L	Εξ.(2.35)
$C_p$	Συντελεστής ολίσθησης Cunningham σχετικά με διάμετρο Stokes	L	Εξ.(2.35)
$C_s$	Στιγμιαία έκθεση σε ρύπο	$M L^{-3}$	Εξ.(2.38)
$D_a$	Αεροδυναμική διάμετρος σωματιδίου	L	Εξ.(2.35)
$D_b$	Διάμετρος φυσαλίδας	L	Εξ.(2.32)
$D_p$	Διάμετρος Stokes σωματιδίου	L	Εξ.(2.35)
$d_\sigma$	Διάμετρος σωματιδίου	L	Εξ.(2.13)
$d_e$	Ισοδύναμη διάμετρος σωματιδίου	L	Εξ.(2.20)
f	Συντελεστής τριβής	[1]	Εξ.(2.16)
$f_b$	Κλάσμα κλίνης που καταλαμβάνεται από φυσαλίδες	[1]	Εξ.(2.29)
$F_D$	Ολική οπισθέλκουσα	$M L T^{-2}$	Εξ.(2.2)
$F_i$	Οπισθέλκουσα δυνάμεων αδράνειας	$M L T^{-2}$	Εξ.(2.2)
$F_w$	Οπισθέλκουσα δυνάμεων ιξώδους	$M L T^{-2}$	Εξ.(2.2)
Fr	Αριθμός Froude	[1]	Εξ.(2.33)
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	$L T^{-2}$	Εξ.(2.22)
$k_1, k_2$	Σταθερές	Διάφορες	Εξ.(2.2)
l	Ύψος ρευστοποιημένης κλίνης	L	Εξ.(2.7)
$l'$	Ύψος ρευστοποιημένης κλίνης κατά την έναρξη της ρευστοποίησης	L	Εξ.(2.23)

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΣΗΜΑΣΙΑ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΕΞΙΣΩΣΗ
Q	Ογκομετρική παροχή	$L^3 T^{-1}$	Εξ.(2.3)
$R_h$	Υδραυλική ακτίνα	L	Εξ.(2.9)
Re	Αριθμός Reynolds	[1]	Εξ.(2.17)
t	Χρόνος	T	Εξ.(2.38)
$u_b$	Μέση ταχύτητα φυσαλίδας	$L T^{-1}$	Εξ.(2.29)
V	Όγκος	$L^3$	Εξ.(2.1)
$V_\sigma$	Όγκος σωματιδίου	$L^3$	Εξ.(2.1)
$\bar{V}$	Μέση ταχύτητα σωματιδίου	$L T^{-1}$	Εξ.(2.3)
$\bar{V}_0$	Φαινόμενη ταχύτητα σωματιδίου	$L T^{-1}$	Εξ.(2.4)
$\bar{V}_{oM}$	Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης	$L T^{-1}$	Εξ.(2.24)

### Ελληνικοί Χαρακτήρες

$A_\sigma$	Επιφάνεια σωματιδίου	$L^2$	Εξ.(2.6)
$\Delta p$	Ολική πτώση πίεσης	$M L^{-1} T^{-2}$	Εξ.(2.11)
$\varepsilon$	Μέση έκθεση σε ρύπο	$M L^{-3}$	Εξ.(2.39)
$\varepsilon$	Πορώδες	[1]	Εξ.(2.1)
$\varepsilon_M$	Ελάχιστο πορώδες	[1]	Εξ.(2.23)
E	Συνολική έκθεση σε ρύπο	$M L^{-3} T$	Εξ.(2.38)
$\lambda$	Μέση ελεύθερη διαδρομή	L	Εξ.(2.36)
$\mu$	Δυναμικό ιξώδες	$M L^{-1} T^{-1}$	Εξ.(2.2)
$\rho$	Πυκνότητα	$M L^{-3}$	Εξ.(2.2)
$\rho_\sigma$	Πυκνότητα σωματιδίου	$M L^{-3}$	Εξ.(2.22)
$N_\sigma$	Αριθμός σωματιδίων	[1]	Εξ.(2.7)
$\Psi$	Σφαιρικότητα	[1]	Εξ.(2.21)

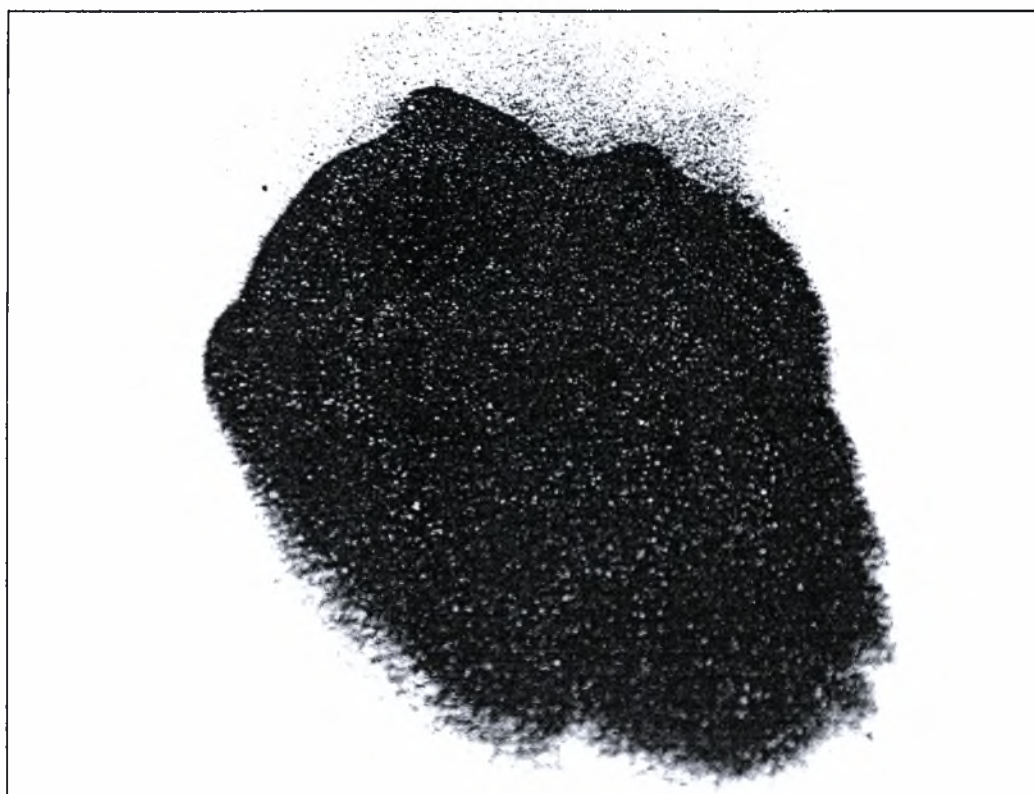
κατάλληλες για διακοπτόμενη λειτουργία – παύση λειτουργίας τη νύχτα ή το Σαββατοκύριακο – δεδομένης της μικρής πτώσης θερμοκρασίας της κλίνης. Εντούτοις, εξαιτίας της σχετικά νέας και εξειδικευμένης τεχνολογίας είναι δυνατόν να παρουσιαστούν προβλήματα κατά τη διάρκεια της διεργασίας που δεν είχαν προβλεφθεί από τους σχεδιαστές των εγκαταστάσεων, όπως οι υψηλές εκπομπές σωματιδιακής ύλης. Έτσι, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις ρευστομηχανικής κλίνης προσφέρουν ένα ευρύ και ενδιαφέρον πεδίο έρευνας σε νέους μηχανικούς αφού βρίσκονται στην αιχμή της τεχνολογίας και έχουν ελάχιστα μελετηθεί.

Η σωματιδιακή ύλη είναι μια νέα σχετικά κατηγορία αέριου ρύπου και θεωρείται οποιοδήποτε διασκορπισμένο υλικό, στερεής ή υγρής κατάστασης, στο οποίο τα μεμονωμένα σωματίδια έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από απλά μόρια, περίπου  $2 \cdot 10^{-4}$  μm, αλλά μικρότερη από περίπου  $5 \cdot 10^2$  μm. Στην διεθνή βιβλιογραφία συνήθως ονομάζεται με τον γενικό όρο "Particulate Matter" και συμβολίζεται ως PM. Ως κατηγορία ρύπου υπήρχε πάντοτε στην ατμόσφαιρα. Τα τελευταία χρόνια όμως, διεθνείς περιβαλλοντικές οργανώσεις και επιστήμονες διαφορετικών τομέων (ιατροί, περιβαλλοντολόγοι, μηχανολόγοι και χημικοί μηχανικοί) μελετούν την επίδρασή της στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ιατρικά ευρήματα και επιδημιολογικές μελέτες συσχετίζουν το ποσοστό συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στον εισπνεόμενο αέρα με συγκεκριμένες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Για το σκοπό αυτό, το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης με την κοινοτική οδηγία 1999/30/EK και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, μέσω των National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) της Environmental Protection Agency (EPA) έχει θεσπίσει οριακές τιμές για τη συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης στον αέρα του περιβάλλοντος.

Ουσιαστικά, κάθε βιομηχανική διεργασία είναι πιθανή πηγή εκπομπής σωματιδιακής ύλης είτε στο εξωτερικό περιβάλλον μέσω της καμινάδας είτε στον χώρο εργασίας εξαιτίας των μηχανικών επεξεργασιών. Ένας μεγάλος αριθμός ειδικών επιστημόνων, όπως οι υγιεινολόγοι βιομηχανικών διεργασιών, υποστηρίζει ότι οι οριακές τιμές ρύπων και οι συνθήκες στους χώρους εργασίας, ακόμα και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, πρέπει να είναι παρόμοιες με αυτές του ατμοσφαιρικού αέρα. Εντούτοις, οι κανονισμοί που ισχύουν για την υγιεινή και ασφάλεια των εργασιακών χώρων στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής μέσω του National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) και στην Ελλάδα μέσω της κείμενης νομοθεσίας είναι πολύ ελαστικοί επιτρέποντας την έκθεση των εργαζομένων σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις σωματιδιακής ύλης.

## 1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η συστηματική μελέτη της σωματιδιακής ρύπανσης που εμφανίζεται σε εγκατάσταση ρευστομηχανικής κλίνης. Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης πραγματοποιήθηκαν στο στρατόπεδο “304 Προκεχωρημένο Εργοστάσιο Βάσεως” που βρίσκεται στην περιοχή του Βελεστίνου, στο νομό Μαγνησίας, είκοσι περίπου χιλιόμετρα από την πόλη του Βόλου, κατόπιν άδειας από το Γενικό Επιτελείο Στρατού. Στο συγκεκριμένο στρατόπεδο είναι εγκατεστημένη η μονάδα ρευστομηχανικής κλίνης για τον καθαρισμό από υπολείμματα ελαστικού των μεταλλικών εξαρτημάτων που συνθέτουν την ερπύστρια των αρμάτων μάχης. Η μονάδα έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Seghers και το κύριο μέρος της βρίσκεται σε μεταλλικό κλειστό στέγαστρο. Στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης υπάρχουν έντονα και εμφανή δείγματα σημαντικής ρύπανσης από σωματιδιακή ύλη με φυσικές ιδιότητες παραπλήσιες του κάρβουνου σε λεπτό διαμερισμό (μαύρο χρώμα, έντονη βαφή σε κάθε επιφάνεια που εναποτίθεται). Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται ένα δείγμα της σωματιδιακής ύλης που συλλέχθηκε από το δάπεδο του χώρου της εγκατάστασης.



Σχήμα 1.1 – Σωματιδιακή ύλη που έχει εναποτεθεί στο χώρο της εγκατάστασης

Η μελέτη περιλαμβάνει μετρήσεις της συγκέντρωσης σωματιδίων PM<sub>10</sub> στο χώρο της εγκατάστασης με τη χρήση του DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 της εταιρείας TSI με σκοπό τον προσδιορισμό της πηγής ρύπανσης και τον καθορισμό των συνθηκών εργασίας των εργαζομένων στην εγκατάσταση.

### 1.2.1 Στόχοι της εργασίας

- Οι στόχοι της μεταπτυχιακής εργασίας είναι οι εξής:
- Ο εντοπισμός της πηγής της σωματιδιακής ύλης.
  - Ο προσδιορισμός της επιμέρους διαδικασίας που είναι υπεύθυνη για τη σωματιδιακή ρύπανση.
  - Η συσχέτιση της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης με τα υπό επεξεργασία διαφορετικού τύπου μεταλλικά εξαρτήματα.
  - Η μέτρηση της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στον αέρα του χώρου εργασίας και η εκτίμηση πιθανών κινδύνων της υγείας των εργαζομένων.
  - Ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης και της κατανομής μεγέθους των επιμέρους στοιχείων της σωματιδιακής ύλης.
  - Η παρουσίαση μέτρων για τον περιορισμό της ρύπανσης.
  - Η υπόδειξη στους εργαζόμενους της εγκατάστασης, αν είναι αναγκαία, των κατάλληλων μέτρων προφύλαξης.

### 1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ρευστομηχανική κλίση που μελετήθηκε είναι μία από τις συνολικά τρεις παρόμοιες εγκαταστάσεις παγκοσμίως (Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, Κορέα, Ελλάδα) οι οποίες ανήκουν στα Υπουργεία Εθνικής Άμυνας των αντίστοιχων χωρών, με αποτέλεσμα να είναι εξαιρετικά περιορισμένα τα δεδομένα από τις επικρατούσες συνθήκες στις παρόμοιες εγκαταστάσεις. Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν έχουν αναφερθεί μελέτες για εγκαταστάσεις αντίστοιχων βιομηχανικών εφαρμογών, παρά μόνο μετρήσεις σωματιδιακής ρύπανσης στο εξωτερικό περιβάλλον από εγκαταστάσεις ρευστομηχανικής κλίσης με καύσιμη ύλη μεταχειρισμένα ελαστικά. Επιπλέον, ελάχιστα έχει μελετηθεί η σωματιδιακή ρύπανση στο εσωτερικό περιβάλλον βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Οι ελάχιστες αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται κυρίως σε εγκαταστάσεις μηχανουργικής επεξεργασίας όπου παράγεται σωματιδιακή ύλη κατά την διάρκεια διεργασιών μορφοποίησης των μεταλλικών αντικειμένων. Με βάση τα παραπάνω, η μεταπτυχιακή εργασία σε πολλά

σημεία περιορίστηκε σε απλή θεωρητική αναφορά κάποιων στοιχείων χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα περαιτέρω εμβάθυνσης και σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχες δημοσιευμένες εργασίες.

Η δομή των κεφαλαίων της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται εισαγωγή στο αντικείμενο της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται θεωρητική ανάλυση του φαινομένου της ρευστοποίησης και της ρευστοποιημένης κλίνης, παρουσίαση των σύγχρονων απόψεων σχετικά με τη σωματιδιακή ύλη και αναφορά στη νομοθεσία που σχετίζεται με την υγιεινή και ασφάλεια στους χώρους εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή της εγκατάστασης, του χώρου εργασίας, της συνολικής επεξεργασίας και του οργάνου μέτρησης.

Στο Κεφάλαιο 4 αναφέρεται ο προγραμματισμός και οι μέθοδοι επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων και αναλύσεων.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται σχολιασμός και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 7 υποδεικνύονται προληπτικά μέτρα για την διασφάλιση της υγείας των εργαζομένων και διορθωτικές ενέργειες για τον περιορισμό της ρύπανσης.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα.

Στη Βιβλιογραφία αναφέρονται συγγράμματα και δικτυακές τοποθεσίες, στην ελληνική και αγγλική γλώσσα, όπου ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει για την πολύπλευρη ενημέρωσή του πάνω στα θέματα που διαπραγματεύεται η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ

#### 2.1.1 Ροή μέσα από κλίνες στερεών

Σε πολλές τεχνικές διεργασίες, ρευστά ρέουν διαμέσου στρωμάτων στερεών σωματιδίων. Η ροή ρευστών διαμέσου των κενών ενός στρώματος σωματιδίων συνεπάγεται σημαντική πτώση πίεσης, η οποία εξαρτάται από το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης) και το πορώδες του στρώματος. Ως πορώδες,  $\varepsilon$ , ενός στρώματος σωματιδίων ορίζεται το κλάσμα του όγκου του στρώματος το οποίο είναι ελεύθερο σωματιδίων. Δηλαδή:

$$\varepsilon = \frac{V - V_s}{V_s} = 1 - \frac{V_s}{V} \quad \text{Εξ. (2.1)}$$

όπου  $V_s$  είναι ο όγκος των στερεών που περιλαμβάνονται στον ολικό όγκο  $V$  του στρώματος. Η αριθμητική τιμή του  $\varepsilon$  εξαρτάται από το σχήμα και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων όπως, επίσης, και από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο για τη διαμόρφωση του στρώματος των στερεών.

Αν και έχει σημειωθεί πρόοδος στη συσχέτιση της ολικής πτώσης πίεσης,  $\Delta p$ , διαμέσου στρώματος στερεών με την οπισθέλκουσα δύναμη των ανεξάρτητων σωματιδίων, οι πιο κοινές μέθοδοι συσχετισμού βασίζονται σε υπολογισμούς της ολικής οπισθέλκουσας,  $F_D$ , επί των τοιχωμάτων των ελικοειδών καναλιών διαμέσου του στρώματος των σωματιδίων. Τα πραγματικά κανάλια του στρώματος είναι ακανόνιστου σχήματος, έχουν μεταβλητή εγκάρσια διατομή και προσανατολισμό και είναι αλληλοσυνδεόμενα. Όμως, στις συνήθεις μεθόδους ανάλυσης της ροής διαμέσου πορωδών μέσων, για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας,  $\bar{V}$ , γίνεται η παραδοχή ότι το δίκτυο των πραγματικών καναλιών διακίνησης του ρευστού μπορεί να αντικατασταθεί από μια δέσμη όμοιων παράλληλων αγωγών σταθερής εγκάρσιας διατομής. Επίσης, προκειμένου να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση των μεταβολών της εγκάρσιας διατομής και του σχήματος, η ολική οπισθέλκουσα θεωρείται ότι είναι άθροισμα δύο ειδών δυνάμεων, των οπισθελκουσών δυνάμεων ιξώδους,  $F_v$ , και αδράνειας,  $F_i$ , δηλαδή:

$$\frac{F_D}{A_w} = \frac{F_v}{A_w} + \frac{F_i}{A_w} = k_1 \cdot \frac{\mu \cdot \bar{V}}{R_h} + k_2 \cdot \rho \cdot \bar{V}^2 \quad \text{Εξ. (2.2)}$$

όπου  $A_w$  είναι η ολική επιφάνεια επαφής του ρευστού με τα στερεά σωματίδια,  $k_1$  και  $k_2$  σταθερές,  $R_h$  η υδραυλική ακτίνα του καναλιού,  $\rho$  η πυκνότητα,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες και  $\bar{V}$  η μέση ταχύτητα ροής διαμέσου των καναλιών στο στρώμα. Παρ' ότι οι παραδοχές αυτές απλουστεύουν το περίπλοκο πρόβλημα ροής σε πορώδη μέσα, εντούτοις, οι προβλέψεις του θεωρούμενου μοντέλου βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η μέση ταχύτητα ροής διαμέσου του στρώματος ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{V} = \frac{Q}{A - A_s} = \frac{Q}{\varepsilon \cdot A} \quad \text{Εξ. (2.3)}$$

όπου  $Q$  είναι η ογκομετρική παροχή και  $A_s$  το κλάσμα της εγκάρσιας επιφάνειας,  $A$ , του στρώματος που καταλαμβάνεται από στερεά. Στην Εξ.(2.2) είναι πιο βολικό να χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα του ρευστού  $\bar{V}_0$  λίγο πριν συναντήσει το πρώτο στρώμα των σωματιδίων. Η ταχύτητα  $\bar{V}_0$  ονομάζεται φαινόμενη ταχύτητα και ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{V}_0 = \frac{Q}{A} \quad \text{Εξ. (2.4)}$$

Από το συνδυασμό των Εξ.(2.3) και Εξ.(2.4), προκύπτει η σχέση:

$$\bar{V}_0 = \bar{V} \cdot \varepsilon \quad \text{Εξ.(2.5)}$$

Η ολική επιφάνεια  $A_w$  των στερεών δίνεται από την εξίσωση:

$$A_w = N_\sigma \cdot A_\sigma \quad \text{Εξ.(2.6)}$$

όπου  $N_\sigma$  είναι ο ολικός αριθμός των σωματιδίων του στρώματος και  $A_\sigma$  η επιφάνεια ενός σωματιδίου. Αν το στρώμα των στερεών έχει κυλινδρικό σχήμα ύψους  $l$  και διατομής  $A$ , ο αριθμός  $N_\sigma$  των σωματιδίων είναι:

$$N_\sigma = \frac{(1-\varepsilon) \cdot l \cdot A}{V_\sigma} \quad \text{Εξ.(2.7)}$$

όπου  $(1-\varepsilon) \cdot l \cdot A$  είναι ο όγκος των στερεών στο στρώμα και  $V_\sigma$  ο όγκος ενός σωματιδίου. Εισάγοντας την τελευταία έκφραση του αριθμού  $N_\sigma$  στην Εξ.(2.6), προκύπτει:

$$A_w = \frac{(1-\varepsilon) \cdot l \cdot A \cdot A_\sigma}{V_\sigma} \quad \text{Εξ.(2.8)}$$

Η υδραυλική ακτίνα,  $R_h$ , ενός αγωγού μη κυκλικής διατομής ορίζεται ως ο λόγος της εγκάρσιας διατομής του αγωγού προς την περίμετρο του αγωγού. Αν ο αριθμητής και ο παρανομαστής του λόγου αυτού πολλαπλασιαστούν και οι δύο επί το ύψος  $l$ , η ακτίνα  $R_h$  καθίσταται ο λόγος του όγκου κενών,  $\varepsilon \cdot l \cdot A$ , του στρώματος προς την ολική επιφάνεια,  $A_w$ , των στερεών. Επομένως, χρησιμοποιώντας την Εξ.(2.8), προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για την ακτίνα  $R_h$ :

$$R_h = \frac{\varepsilon \cdot l \cdot A}{A_w} = \frac{\varepsilon \cdot V_\sigma}{(1-\varepsilon) \cdot A_\sigma} \quad \text{Εξ.(2.9)}$$

Αντικαθιστώντας στην Εξ.(2.2) τα μεγέθη  $\bar{V}$ ,  $A_w$ , και  $R_h$  με τις αντίστοιχες εκφράσεις όπως δίνονται κατά σειρά από τις Εξ.(2.5), Εξ.(2.8), Εξ.(2.9), προκύπτει η σχέση:

$$F_D = \rho \cdot l \cdot A \cdot \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \cdot \left( \frac{A_\sigma}{V_\sigma} \right) \cdot \left[ k_1 \cdot (1-\varepsilon) \cdot \left( \frac{A_\sigma}{V_\sigma} \right) \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \bar{V}_0 + k_2 \cdot \bar{V}_0^2 \right] \quad \text{Εξ.(2.10)}$$

Η οπισθέλκουσα  $F_D$  πρέπει να είναι ίση με το γινόμενο της πτώσης πίεσης στο στρώμα επί το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής των καναλιών:

$$F_D = \Delta p \cdot \varepsilon \cdot A \quad \text{Εξ.(2.11)}$$

Απαλείφοντας την  $F_D$  από τις Εξ.(2.10) και Εξ.(2.11), προκύπτει:

$$\frac{\Delta p}{\rho} = l \cdot \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \cdot \left( \frac{A_\sigma}{V_\sigma} \right) \cdot \left[ k_1 \cdot (1-\varepsilon) \cdot \left( \frac{A_\sigma}{V_\sigma} \right) \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \bar{V}_0 + k_2 \cdot \bar{V}_0^2 \right] \quad \text{Εξ.(2.12)}$$

όπου  $\Delta p/\rho$  είναι η ενέργεια τριβών ανηγμένη στη μονάδα βάρους του ρέοντος ρευστού. Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η πτώση πίεσης ελαττώνεται με την αύξηση του πορώδους και του μεγέθους των σωματιδίων. Για στρώματα αποτελούμενα από σωματίδια σφαιρικού σχήματος, ο λόγος  $A_\sigma/V_\sigma$  του σωματιδίου είναι:

$$\frac{A_\sigma}{V_\sigma} = \frac{\pi \cdot d_\sigma^2}{\pi \cdot d_\sigma^3 / 6} = \frac{6}{d_\sigma} \quad \text{Εξ.(2.13)}$$

Σύμφωνα με τον Ergun, οι τιμές των σταθερών  $k_1$  και  $k_2$  είναι 150/36 και 1,75/6 αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας τις σταθερές με τις τιμές αυτές και απαλείφοντας το λόγο  $A_\sigma/V_\sigma$  από τις Εξ.(2.12) και Εξ.(2.13), προκύπτει η Εξ.(2.14), η οποία είναι γνωστή ως εξίσωση Ergun, (Ergun, 1952):

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \left( \frac{l}{d_\sigma} \right) \cdot \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \cdot \left[ \left( \frac{150 \cdot (1-\varepsilon) \cdot \mu \cdot \bar{V}_0}{\rho \cdot d_\sigma} \right) + 1,75 \cdot \bar{V}_0^2 \right] \quad \text{Εξ.(2.14)}$$

Η εξίσωση Ergun μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$f = \underbrace{\frac{150 \cdot (1-\varepsilon)}{Re}}_{\text{όρος στρωτής ροής}} + \underbrace{1,75}_{\text{όρος τυρβώδους ροής}} \quad \text{Εξ.(2.15)}$$

όπου  $f$  είναι ο συντελεστής τριβής του στρώματος των σωματιδίων:

$$f = \left( \frac{\Delta p}{\rho \cdot \bar{V}_0^2} \right) \cdot \left( \frac{d_\sigma}{l} \right) \cdot \left( \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \right) \quad \text{Εξ.(2.16)}$$

και  $Re$  ο αριθμός Reynolds της ροής διαμέσου του στρώματος:

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{V}_0 \cdot d_\sigma}{\mu} \quad \text{Εξ.(2.17)}$$

Για μικρούς αριθμούς Reynolds ( $Re < 10$ ), όπου η ροή ελέγχεται από τις ιξώδεις δυνάμεις (στρωτή ροή), η εξίσωση Ergun απλοποιείται στην Εξ.(2.18) που είναι γνωστή ως εξίσωση Kozeny – Carman:

$$f = \frac{150 \cdot (1-\varepsilon)}{Re} \quad \text{Εξ.(2.18)}$$

Για μεγάλους αριθμούς Reynolds ( $Re > 1000$ ), όπου υπερισχύουν οι δυνάμεις αδράνειας (τυρβώδης ροή), η εξίσωση Ergun απλοποιείται στην Εξ.(2.19) που είναι γνωστή ως εξίσωση Burke – Plummer, (Burke – Plummer, 1928):

$$f = 1,75 \quad \text{Εξ.(2.19)}$$

Η εξίσωση Ergun, Εξ.(2.14), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για στρώματα αποτελούμενα από μη σφαιρικά σωματίδια, αρκεί, στη θέση της διαμέτρου  $d_s$ , να τοποθετηθεί το γινόμενο της ισοδύναμης διαμέτρου,  $d_e$ , επί τη σφαιρικότητα,  $\Psi$ , του σωματιδίου:

$$d_s = \Psi \cdot d_e \quad \text{Εξ.(2.20)}$$

Ως σφαιρικότητα σωματιδίου ορίζεται ο λόγος της επιφάνειας της σφαίρας διαμέτρου  $d_e$  προς την πραγματική επιφάνεια του σωματιδίου:

$$\Psi = \left( \frac{\text{Επιφάνεια σφαίρας}}{\text{Επιφάνεια σωματιδίου}} \right)_{\text{ίδιου όγκου}} \quad \text{Εξ.(2.21)}$$

Με βάση τον ορισμό αυτό, τα σφαιρικά σωματίδια έχουν σφαιρικότητα  $\Psi = 1$  και όλα τα μη σφαιρικά σωματίδια,  $0 < \Psi < 1$ . Στον Πίνακα 2.1 δίνονται τυπικές τιμές της σφαιρικότητας για διάφορα υλικά.

Υλικό	Σφαιρικότητα	Υλικό	Σφαιρικότητα
Σφαίρες, κύβοι, κύλινδροι	1,0	Θρυμματισμένο γυαλί	0,65
Άμμος Ottawa	0,95	Άμμος πυρόλιθου	0,65
Στρογγυλεμένη άμμος	0,83	Δακτύλιοι Raschig	0,58

Πίνακας 2.1 – Σφαιρικότητα υλικών

Στην υπό μελέτη εγκατάσταση ρευστομηχανικής κλίνης το στρώμα στερεών σωματιδίων αποτελείται από άμμο τύπου "Alpha Quartz" με σύσταση 96%  $\text{SiO}_2$  και 2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και σφαιρικότητα 0,93.

### 2.1.2 Ρευστοποίησηση

Όταν ένα υγρό ή αέριο, κινούμενο από κάτω προς τα πάνω, διέρχεται με μικρή ταχύτητα από ένα στρώμα στερεών σωματιδίων, τα σωματίδια παραμένουν ακίνητα και η πτώση πίεσης στο στρώμα δίνεται από την εξίσωση Ergun, Εξ.(2.14). Αν η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται σταθερά, η πτώση πίεσης και η οπισθέλκουσα δύναμη επί των σωματιδίων αυξάνουν και, τελικώς, τα σωματίδια αρχίζουν να

κινούνται και να παραμένουν αιωρούμενα στο ρευστό. Η μετατροπή ενός στρώματος ακίνητων σωματιδίων σε στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων υπό την επενέργεια ενός υγρού ή αερίου ονομάζεται ρευστοποίηση και το στρώμα των αιωρούμενων σωματιδίων ρευστοποιημένη κλίνη. Από ρεολογική άποψη, οι ρευστοποιημένες κλίνες συμπεριφέρονται σαν ρευστά υψηλού ιξώδους.

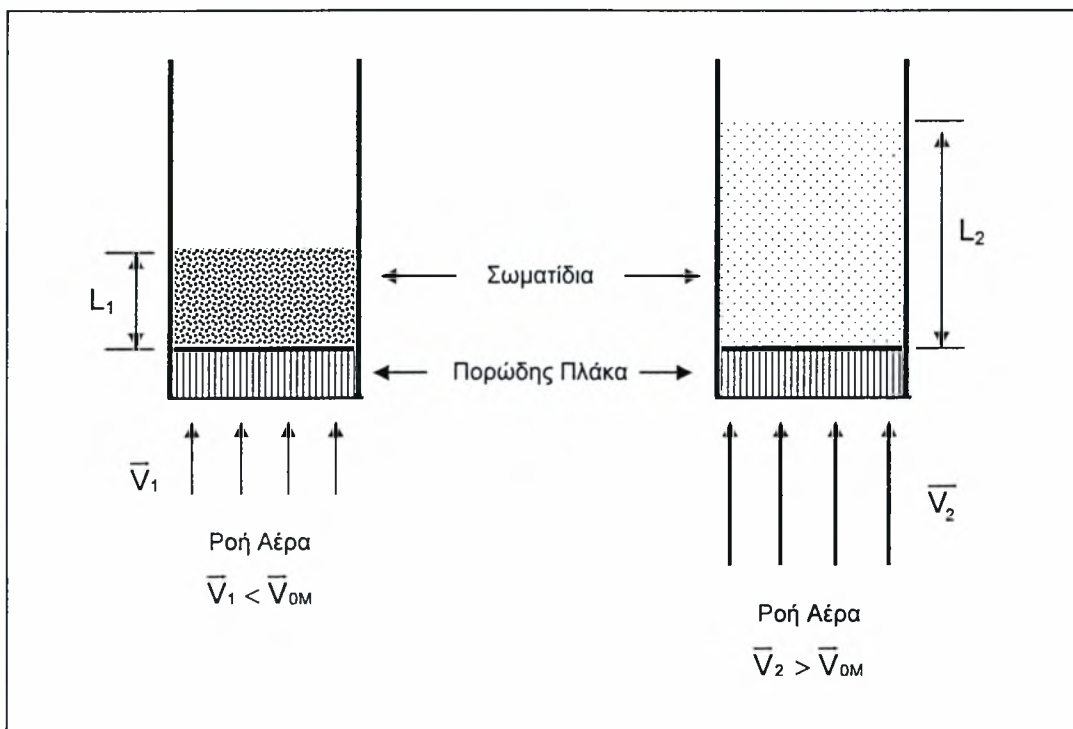
Το κυριότερο πλεονέκτημα της ρευστοποίησης είναι το γεγονός ότι το στερεό αναδεύεται έντονα από το ρευστό που περνά μέσα από την κλίνη και η ανάμιξη των στερεών σχεδόν εξασφαλίζει την απουσία των διαβαθμίσεων της θερμοκρασίας στην κλίνη, ακόμα και όταν οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι ισχυρά εξώθερμες ή ενδόθερμες. Η κίνηση των στερεών είναι έντονη και κατά συνέπεια ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στα τοιχώματα ή στους αυλούς ψύξης που είναι βυθισμένοι μέσα στην κλίνη είναι μεγάλος. Έτσι, ο ρυθμός πραγματοποίησης της επιδιωκόμενης διεργασίας, π.χ. μιας καταλυτικής χημικής αντίδρασης ή της ξήρανσης ενός κρυσταλλικού στερεού, είναι πολλαπλάσιος εκείνου μιας μόνιμης κλίνης.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της ρευστοποίησης αερίου-στερεού είναι η ανομοιόμορφη επαφή τους. Το μεγαλύτερο μέρος του αερίου περνά μέσα από το στερεό με τη μορφή φουσαλίδων και έρχεται σε άμεση επαφή μόνο με ένα μικρό μέρος του στερεού σε ένα λεπτό κέλυφος – γνωστό ως νέφος φουσαλίδας– γύρω από τη φουσαλίδα. Ένα μικρό ποσοστό του αερίου περνά μέσα από την πυκνή φάση που περιέχει όλο σχεδόν το στερεό. Υπάρχει μια μικρή ανταλλαγή αερίου ανάμεσα στις φουσαλίδες και την πυκνή φάση μέσω διάχυσης και τυρβωδών διαδικασιών, όπως η διάσπαση και η συσσωμάτωση των φουσαλίδων, όμως η μετατροπή ενός αερίου αντιδρώντος είναι μικρότερη απ' ό,τι όταν υπάρχει ομοιόμορφη επαφή στην ίδια θερμοκρασία, όπως σε έναν ιδανικό αντιδραστήρα εμβολικής ροής.

#### 2.1.2.1 Συνθήκες για την ρευστοποίηση

Έστω ένας κατακόρυφος σωλήνας γεμάτος ως ένα σημείο με ένα υλικό με τη μορφή μικρών κόκκων όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Η κορυφή του σωλήνα είναι ανοιχτή, ενώ στον πυθμένα υπάρχει μια πορώδης πλάκα η οποία συγκρατεί το στρώμα των σωματιδίων και κατανέμει ομοιόμορφα τη ροή σε όλη τη διατομή. Ο αέρας εισάγεται από ένα σημείο κάτω από την πλάκα με χαμηλό ρυθμό ροής, κινείται προς τα πάνω και περνά μέσα από την κλίνη χωρίς να προκαλέσει κίνηση των σωματιδίων. Αν τα σωματίδια είναι αρκετά μικρά, η ροή στα κανάλια που σχηματίζονται ανάμεσα στα σωματίδια θα είναι στρωτή και η πτώση της πίεσης στην κλίνη θα είναι ανάλογη της φαινόμενης ταχύτητας  $\bar{V}_0$ , όπως προβλέπεται από την εξίσωση Kozeny – Carman, Εξ.(2.18). Καθώς αυξάνεται σταδιακά η ταχύτητα, αυξάνεται και η πτώση πίεσης, όμως τα σωματίδια δεν κινούνται και το ύψος της

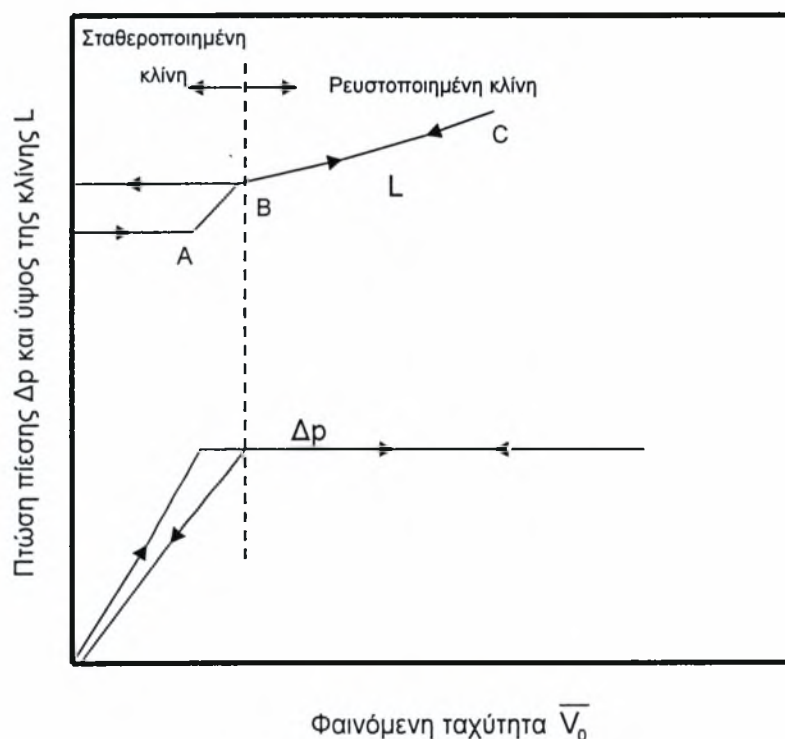
κλίνης παραμένει το ίδιο. Σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα η πτώση πίεσης στην κλίνη εξισορροπεί τη δύναμη της βαρύτητας στα σωματίδια ή το βάρος της κλίνης και οποιαδήποτε επιπλέον αύξηση της ταχύτητας προκαλεί την κίνηση των σωματιδίων. Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί στο σημείο A του διαγράμματος στο Σχήμα 2.2. Μερικές φορές η κλίνη επεκτείνεται λίγο ενώ τα σωματίδια βρίσκονται ακόμα σε επαφή, αφού μια μικρή αύξηση του  $\varepsilon$  μπορεί να αντισταθμίσει μια αύξηση του  $\bar{V}_0$  κατά αρκετές ποσοστιαίες μονάδες, ενώ το  $\Delta\rho$  διατηρείται σταθερό. Αν αυξηθεί και άλλο η ταχύτητα, τα σωματίδια διαχωρίζονται αρκετά ώστε να μπορούν να κινηθούν στην κλίνη. Στο σημείο αυτό (σημείο B του διαγράμματος στο Σχήμα 2.2) αρχίζει η πραγματική ρευστοποίηση.



Σχήμα 2.1 – Μόνιμη και ρευστοποιημένη κλίνη

Από τη στιγμή που ρευστοποιείται η κλίνη, η πτώση πίεσης παραμένει σταθερή, όμως όσο αυξάνεται η ροή αυξάνεται και το ύψος της κλίνης. Η κλίνη μπορεί να λειτουργήσει σε αρκετά μεγάλες ταχύτητες με ελάχιστη (έως καθόλου) απώλεια στερεών, αφού η φαινόμενη ταχύτητα που απαιτείται για τη στήριξη μιας κλίνης σωματιδίων είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα παράσυρσης των μεμονωμένων σωματιδίων, δηλαδή την ταχύτητα που τα σωματίδια συμπαρασύρονται από το κινούμενο ρευστό και η κλίνη παύει να υφίσταται.

Αν ο ρυθμός ροής στη ρευστοποιημένη κλίνη μειωθεί σταδιακά, η πτώση πίεσης παραμένει σταθερή και το ύψος της κλίνης μειώνεται ακολουθώντας τη γραμμή BC (την ίδια γραμμή ακολούθησε το ύψος κατά την αύξηση της ταχύτητας). Ωστόσο, το τελικό ύψος της κλίνης ενδέχεται να είναι μικρότερο από το αρχικό ύψος της σταθεροποιημένης κλίνης, επειδή τα στερεά που ρίχνονται μέσα σε έναν σωλήνα έχουν την τάση να τοποθετούνται πιο τακτικά από τα στερεά που κατακάθονται αργά από μια κατάσταση ρευστοποίησης. Η πτώση της πίεσης σε χαμηλές ταχύτητες είναι μικρότερη απ' ό,τι στην αρχική σταθεροποιημένη κλίνη. Κατά την επανέναρξη η πτώση της πίεσης αντισταθμίζει το βάρος της κλίνης στο σημείο B. Στο σημείο αυτό (και όχι στο A) θα πρέπει να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης  $\bar{V}_{oM}$ . Για να μετρηθεί η ταχύτητα  $\bar{V}_{oM}$  θα πρέπει να ρευστοποιηθεί έντονα η κλίνη, να αφεθεί να κατακαθίσει (να σταματήσει η ροή του αερίου) και στη συνέχεια να αυξηθεί σταδιακά ο ρυθμός ροής μέχρι να αρχίσει να επεκτείνεται η κλίνη. Μερικές φορές μπορεί να προκύψουν πιο αναπαραγωγίσιμες τιμές του  $\bar{V}_{oM}$  από την τομή διαγραμμάτων της πτώσης πίεσης σε μια σταθεροποιημένη κλίνη και σε μια ρευστοποιημένη κλίνη.



Σχήμα 2.2 – Πτώση πίεσης και ύψος κλίνης συναρτήσει της φαινόμενης ταχύτητας



### 2.1.2.2 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης

Μια εξίσωση υπολογισμού της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης μπορεί να εξαχθεί θέτοντας την πτώση πίεσης,  $\Delta p$ , της ροής διαμέσου της κλίνης ίση με τη συνισταμένη του βάρους του στρώματος των στερεών σωματιδίων και της άνωσης (ίση με το βάρος του εκτοπισμένου ρευστού) ανηγμένη στη μονάδα επιφάνειας της εγκάρσιας διατομής της κλίνης, δηλαδή:

$$\Delta p = g \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_\sigma - \rho) \cdot l \quad \text{Εξ. (2.22)}$$

όπου  $\rho_\sigma$  είναι η πυκνότητα των στερεών σωματιδίων.

Στην αρχική ρευστοποίηση το  $\varepsilon$  αντιπροσωπεύει το ελάχιστο πορώδες  $\varepsilon_M$  και το  $l$  το ύψος της κλίνης κατά την έναρξη της ρευστοποίησης  $l^*$ . Άρα:

$$\frac{\Delta p}{l^*} = g \cdot (1 - \varepsilon_M) \cdot (\rho_\sigma - \rho) \quad \text{Εξ. (2.23)}$$

Θεωρώντας ότι η κλίνη των στερεών αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια, εφαρμόζουμε στο σημείο έναρξης της ρευστοποίησης την εξίσωση Ergun, Εξ. (2.14):

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \left( \frac{l^*}{d_\sigma} \right) \cdot \left( \frac{1 - \varepsilon_M}{\varepsilon_M^3} \right) \cdot \left[ \left( \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_M) \cdot \mu \cdot \overline{V}_{oM}}{\rho \cdot d_\sigma} \right) + 1,75 \cdot \overline{V}_{oM}^2 \right] \quad \text{Εξ. (2.24)}$$

όπου  $\overline{V}_{oM}$  είναι η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Αντικαθιστώντας στην Εξ. (2.24) την πτώση πίεσης  $\Delta p$  από την Εξ. (2.23) προκύπτει μια δευτεροβάθμια εξίσωση για την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης  $\overline{V}_{oM}$ :

$$1,75 \cdot \overline{V}_{oM}^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_M) \cdot \mu}{\rho \cdot d_\sigma} \cdot \overline{V}_{oM} - g \cdot \left( \frac{\rho_\sigma}{\rho} - 1 \right) \cdot d_\sigma \cdot \varepsilon_M^3 = 0 \quad \text{Εξ. (2.25)}$$

Για μικρούς αριθμούς Reynolds ( $Re < 1$ ), μόνο ο όρος της στρωτής ροής, που σημειώνεται στην Εξ. (2.15), έχει σημαντική τιμή στην εξίσωση Ergun, οπότε η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\overline{V}_{oM} = \frac{g \cdot (\rho_\sigma - \rho) \cdot d_\sigma^2}{150 \cdot \mu} \cdot \frac{\varepsilon_M^3}{1 - \varepsilon_M} \quad \text{Εξ. (2.26)}$$

Σύμφωνα με πολλές εμπειρικές εξισώσεις η ταχύτητα  $\overline{V}_{oM}$  μεταβάλλεται με κάτι λιγότερο από το τετράγωνο του μεγέθους των σωματιδίων, ενώ δε μεταβάλλεται ακριβώς αντίστροφα με το ιξώδες. Οι μικρές αυτές αποκλίσεις από τους αναμενόμενους εκθέτες εμφανίζονται επειδή η παράλειψη του δεύτερου όρου της εξίσωσης Ergun επιφέρει κάποιο σφάλμα στους υπολογισμούς και επειδή το κλάσμα

κενού  $\varepsilon_M$  μπορεί να μεταβάλλεται με το μέγεθος των σωματιδίων. Για σχεδόν σφαιρικά σωματίδια το  $\varepsilon_M$  κυμαίνεται από 0,40 έως 0,45 και αυξάνεται ελαφρά όσο μειώνεται η διάμετρος του σωματιδίου. Για στερεά με ανώμαλο σχήμα η κύρια πηγή σφαλμάτων στον υπολογισμό του  $\overline{V_{oM}}$  από την Εξ.(2.25) ή την Εξ.(2.26) είναι πιθανότατα η αβεβαιότητα που συνοδεύει το  $\varepsilon_M$ .

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.3 παρουσιάζονται οι ελάχιστες ταχύτητες ρευστοποίησης για σωματίδια στον αέρα, που υπολογίζονται από την Εξ.(2.25). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξάρτηση από το  $d_\sigma^2$  ισχύει για σωματίδια με μέγεθος περίπου 300  $\mu\text{m}$  (πολλές φορές τα σωματίδια έχουν μέγεθος που κυμαίνεται από 30 έως 300  $\mu\text{m}$ ). Σε πολλές εφαρμογές της ρευστοποίησης τα σωματίδια έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 1mm, όπως στην καύση του άνθρακα μέσα σε ρευστοποιημένη κλίνη. Στο όριο των πολύ μεγάλων μεγεθών ο όρος της στρωτής ροής γίνεται αμελητέος και το  $\overline{V_{oM}}$  μεταβάλλεται με την τετραγωνική ρίζα του μεγέθους του σωματιδίου. Η εξίσωση που ισχύει για μεγάλους αριθμούς Reynolds ( $Re > 1000$ ) είναι η εξής:

$$\overline{V_{oM}} = \left[ \frac{g \cdot (\rho_\sigma - \rho) \cdot d_\sigma \cdot \varepsilon_M^3}{1,75 \cdot \rho} \right]^{1/2} \quad \text{Εξ.(2.27)}$$

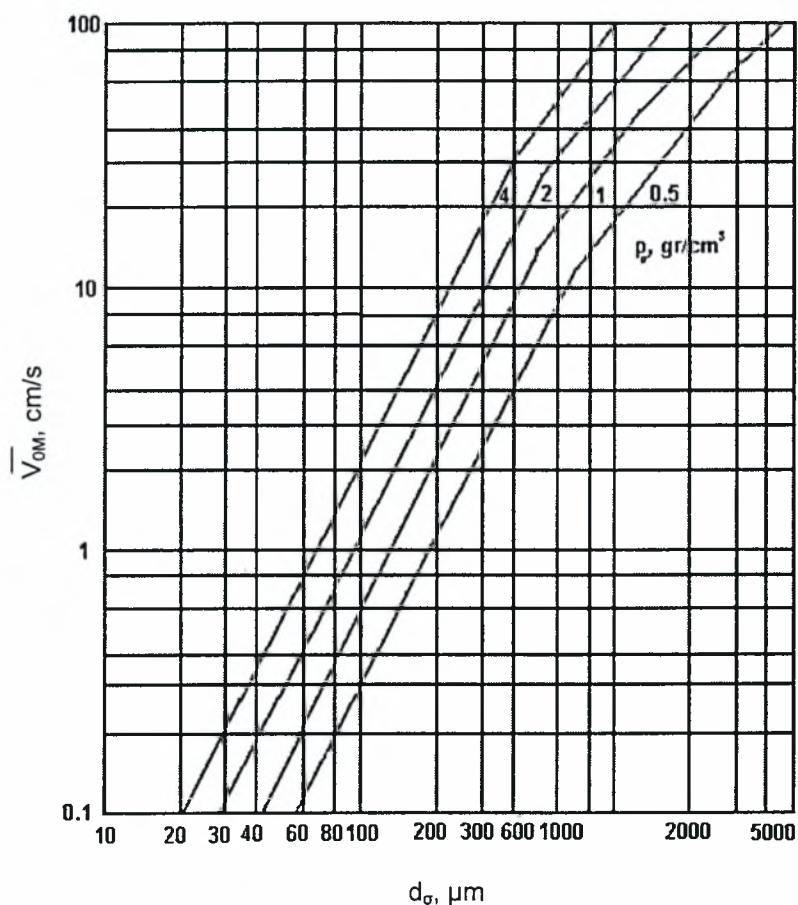
Στην υπό μελέτη εγκατάσταση ρευστομηχανικής κλίνης το στρώμα στερεών σωματιδίων αποτελείται από άμμο τύπου "Alpha Quartz" με διάμετρο σωματιδίων  $d_\sigma$  που κυμαίνεται από 400 – 600  $\mu\text{m}$ , πυκνότητα  $\rho_\sigma = 2500 \text{ kg/m}^3$  και ελάχιστο πορώδες ρευστοποίησης  $\varepsilon_M = 0,41$ .

### 2.1.3 Τύποι Ρευστοποίησης

#### 2.1.3.1 Μικρομερής ρευστοποίηση

Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν για την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης ισχύουν τόσο για υγρά όσο και για αέρια, όμως πέρα από το  $\overline{V_{oM}}$  η εμφάνιση κλινών ρευστοποιημένων με υγρά ή αέρια είναι συχνά πολύ διαφορετική. Κατά τη ρευστοποίηση της άμμου με νερό τα σωματίδια κινούνται αρκετά μακριά το ένα από το άλλο και όσο αυξάνεται η ταχύτητα, η κίνησή τους γίνεται όλο και πιο έντονη, όμως η μέση πυκνότητα του στρώματος των σωματιδίων της κλίνης σε μια δεδομένη ταχύτητα είναι στατιστικά η ίδια σε όλα τα τμήματα της κλίνης. Το φαινόμενο αυτό

ονομάζεται μικρομερής ρευστοποίηση και χαρακτηρίζεται από μια μεγάλη αλλά ομοιόμορφη επέκταση της κλίνης σε μεγάλες ταχύτητες.



Σχήμα 2.3 – Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης

Στην περίπτωση της μικρομερούς ρευστοποίησης η κλίνη επεκτείνεται ομοιόμορφα και η εξίσωση Ergun, η οποία ισχύει για μια σταθερή κλίνη, ενδέχεται να ισχύει κατά προσέγγιση για την ελαφρώς εκτεταμένη κλίνη. Αν υποθεθεί ότι η ροή ανάμεσα στα σωματίδια είναι στρωτή και χρησιμοποιηθεί ο πρώτος όρος της Εξ.(2.14) προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τις εκτεταμένες (διογκωμένες) κλίνες:

$$\frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = \frac{150 \cdot \mu \cdot \bar{V}_0}{g \cdot (\rho_{\sigma} - \rho) \cdot d_{\sigma}^2} \quad \text{Εξ. (2.28)}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η εξίσωση είναι παρόμοια με την Εξ.(2.26) για την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης, όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση το  $\bar{V}_0$  είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και το  $\varepsilon$  η εξαρτημένη. Σύμφωνα με την Εξ.(2.28) ο όρος  $\varepsilon^3/(1-\varepsilon)$ , είναι ανάλογος του  $\bar{V}_0$ , για τιμές μεγαλύτερες από  $\bar{V}_{0M}$ .

### 2.1.3.2 Ρευστοποίηση φυσαλίδων

Οι κλίνες των στερεών που είναι ρευστωμένες με αέρα εμφανίζουν συνήθως συσσωματώνουσα ρευστοποίηση ή ρευστοποίηση φυσαλίδων. Σε φαινόμενες ταχύτητες κάπως μεγαλύτερες από την  $\bar{V}_{oM}$  το περισσότερο αέριο περνά μέσα από την κλίνη με τη μορφή φυσαλίδων ή κενών που δεν περιέχουν σχεδόν καθόλου στερεά και μόνο ένα μικρό κλάσμα του αερίου ρέει στα κανάλια ανάμεσα στα σωματίδια. Τα σωματίδια κινούνται ακανόνιστα και στηρίζονται από το ρευστό, όμως στο διάστημα ανάμεσα στις φυσαλίδες το κλάσμα κενού είναι περίπου το ίδιο με εκείνο που αντιστοιχεί στην αρχική ρευστοποίηση. Η ανομοιόμορφη φύση της κλίνης αποδόθηκε αρχικά στη συσσωμάτωση των σωματιδίων και χρησιμοποιήθηκε ο όρος συσσωματώνουσα ρευστοποίηση. Ωστόσο δεν υπάρχει καμία απόδειξη ότι τα σωματίδια μένουν μαζί, οπότε ο όρος ρευστοποίηση φυσαλίδων, περιγράφει καλύτερα το φαινόμενο. Οι φυσαλίδες που δημιουργούνται συμπεριφέρονται περίπου όπως οι φυσαλίδες του αέρα στο νερό ή οι φυσαλίδες του ατμού στο υγρό που βράζει, πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος "ζέουσα κλίνη" για αυτό το είδος της ρευστοποίησης. Οι μελέτες που λαμβάνουν υπ' όψιν τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας ή μάζας ή τις χημικές αντιδράσεις σε μια ζέουσα κλίνη συχνά αναφέρουν την "θεωρία δύο φάσεων της ρευστοποίησης", σύμφωνα με την οποία οι φυσαλίδες αποτελούν τη μία φάση και η πυκνή κλίνη αιωρούμενων σωματιδίων την άλλη.

Η συμπεριφορά μιας ρευστοποιημένης κλίνης με φυσαλίδες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό και το μέγεθος των φυσαλίδων του αερίου, μεγέθη που πολλές φορές είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Το μέσο μέγεθος των φυσαλίδων εξαρτάται από τη φύση και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, το είδος της πλάκας του κατανομέα, τη φαινόμενη ταχύτητα και το βάθος της κλίνης. Οι φυσαλίδες έχουν την τάση να συσσωματώνονται και να μεγαλώνουν καθώς κινούνται προς τα πάνω μέσα στην κλίνη. Το μέγιστο σταθερό μέγεθος φυσαλίδας κυμαίνεται από μερικές ίντσες έως μερικά πόδια. Αν χρησιμοποιηθεί μια στήλη μικρής διαμέτρου και μια κλίνη στερεών με μεγάλο βάθος, οι φυσαλίδες μπορεί να μεγαλώσουν μέχρι να καταλάβουν όλη τη διατομή. Αν συμβεί κάτι τέτοιο τότε θα σχηματίζονται διαδοχικά πολλές φυσαλίδες οι οποίες θα κινούνται προς τα πάνω μέσα στη στήλη και ανάμεσα στις φυσαλίδες αυτές θα παρεμβάλλονται τμήματα στερεών. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συνένωση (slugging) και συνήθως είναι ανεπιθύμητο, επειδή προκαλεί διακυμάνσεις της πίεσης στην κλίνη, αυξημένο συμπαρασυρμό και δυσκολία στην κλιμάκωση μεγέθους.

Στη ρευστοποίηση φυσαλίδων η επέκταση της κλίνης δημιουργείται κυρίως από το χώρο που καταλαμβάνουν οι φυσαλίδες του αερίου, επειδή η πυκνή φάση δεν

επεκτείνεται σημαντικά όταν αυξάνεται η συνολική ροή. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει η ροή του αερίου μέσω της φάσης θεωρείται ίση με το γινόμενο του  $\overline{V}_{oM}$  επί το κλάσμα της κλίνης που καταλαμβάνει η πυκνή φάση, ενώ το υπόλοιπο της ροής του αερίου μεταφέρεται μέσω των φυσαλίδων. Άρα:

$$\overline{V}_0 = f_b \cdot u_b + (1 - f_b) \cdot \overline{V}_{oM} \quad \text{Εξ. (2.29)}$$

όπου:  $f_b$  = το κλάσμα της κλίνης που καταλαμβάνεται από τις φυσαλίδες

$u_b$  = μέση ταχύτητα φυσαλίδων

Αφού όλο το στερεό βρίσκεται στην πυκνή φάση, το γινόμενο του ύψους της εκτεταμένης κλίνης επί το κλάσμα της πυκνής φάσης θα είναι ίσο με το ύψος της κλίνης στην αρχική ρευστοποίηση:

$$l' = l \cdot (1 - f_b) \quad \text{Εξ. (2.30)}$$

Συνδυάζοντας τις Εξ.(2.29) και Εξ.(2.30) προκύπτει:

$$\frac{l}{l'} = \frac{u_b - \overline{V}_{oM}}{u_b - \overline{V}_0} \quad \text{Εξ. (2.31)}$$

Όταν η ταχύτητα  $u_b$  είναι πολύ μεγαλύτερη από την  $\overline{V}_0$ , η κλίση επεκτείνεται λίγο, έστω και αν το  $\overline{V}_0$  είναι πολλαπλάσιο του  $\overline{V}_{oM}$ .

Η ταχύτητα των φυσαλίδων σε μια ρευστοποιημένη κλίση μπορεί να υπολογιστεί από μια εμπειρική εξίσωση όπως η εξής:

$$u_b \approx 0,7 \cdot \sqrt{g \cdot D_b} \quad \text{Εξ. (2.32)}$$

Η επίδραση του μεγέθους ή του σχήματος των σωματιδίων στο συντελεστή της Εξ.(2.32) είναι μικρή. Μολονότι το σχήμα των μεγάλων φυσαλίδων μοιάζει περισσότερο με μανιτάρι παρά με σφαίρα, η εξίσωση αυτή ισχύει με αρκετή ακρίβεια.

### 2.1.3.3 Τυρβώδης ρευστοποίηση

Όταν η φαινόμενη ταχύτητα του αερίου αυξάνεται σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από τη  $\overline{V}_{oM}$ , τότε παρατηρείται μετάβαση από την αφρίζουσα ρευστοποίηση στη λεγόμενη τυρβώδη ή στροβιλώδη ρευστοποίηση (turbulent fluidisation) ή γρήγορη ρευστοποίηση. Η μετάβαση πραγματοποιείται όταν η κλίση έχει επεκταθεί τόσο πολύ που υπάρχουν μικρές περιοχές μικρής ή μεγάλης πυκνότητας κλίνης, με ταχύτατες διακυμάνσεις πυκνότητας σε όλα τα σημεία της κλίνης. Η ταχύτητα για τη μετάβαση στην τυρβώδη ρευστοποίηση κυμαίνεται γενικά στην περιοχή από 0,3 – 0,6 m/s.

Ωστόσο είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ταχύτητα μετάβασης, επειδή εξαρτάται από τις ιδιότητες των σωματιδίων και από το μέσο μέγεθος των φυσαλίδων.

Το φαινόμενο της ρευστοποίησης ελέγχεται ουσιαστικά από δύο είδη δυνάμεων, τις δυνάμεις αδράνειας και τις δυνάμεις βαρύτητας. Ο λόγος των δυνάμεων αυτών εκφράζεται ποσοτικά με τον αριθμό Froude,  $Fr$ , ο οποίος για ροή σε ρευστοποιημένη κλίνη ορίζεται από την Εξ.(2.33).

$$Fr = \frac{\overline{V}_0^2}{g \cdot d_\sigma} \quad \text{Εξ. (2.33)}$$

Επομένως, ο αριθμός Froude πρέπει να σχετίζεται άμεσα με τον τύπο της ρευστοποίησης. Όμως, σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση της ρευστοποιημένης κλίνης, παίζει και ο αριθμός Reynolds, Εξ.(2.17), ο οποίος παριστάνει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις ιξώδεις δυνάμεις. Οι Romero και Johanson, (1962) έδειξαν ότι υπάρχει τυρβώδης ρευστοποίηση αν:

$$Fr \cdot Re \cdot \left( \frac{\rho_\sigma - \rho}{\rho} \right) \cdot \left( \frac{l}{D} \right) > 100 \quad \text{Εξ. (2.34)}$$

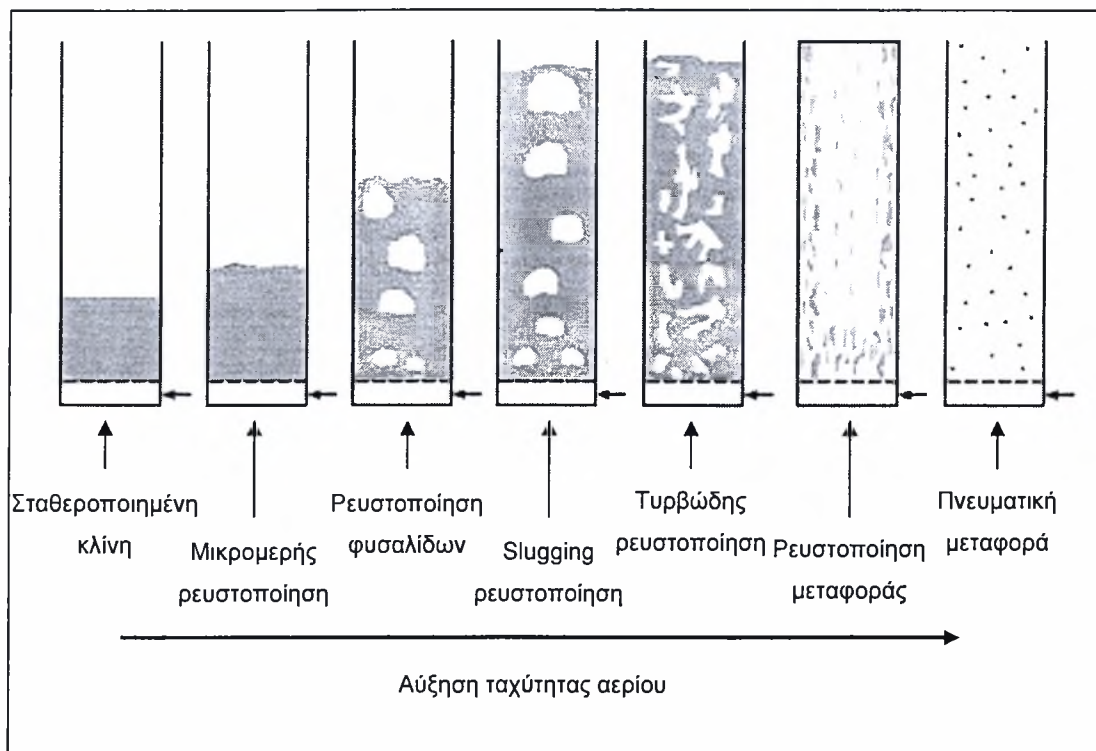
Οι αριθμοί Froude και Reynolds πρέπει να υπολογίζονται στο σημείο έναρξης της ρευστοποίησης. Στην υπό μελέτη εγκατάσταση ρευστομηχανικής κλίνης η φαινόμενη ταχύτητα του αερίου  $\overline{V}_{0M}$  είναι μεγαλύτερη από 0,4 m/s. Από την Εξ.(2.34) προκύπτει ότι επικρατεί τυρβώδης ρευστοποίηση.

#### 2.1.3.4 Ρευστοποίηση μεταφοράς

Σε ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες αερίων όλα τα τροφοδοτούμενα σωματίδια συμπαρασύρονται πολύ γρήγορα μαζί με το αέριο, όμως μπορούν να συλλεχθούν αν χρησιμοποιηθεί ένας κυκλώνας και να επιστραφούν στον πυθμένα, για να διατηρηθούν όλα τα στερεά στη μονάδα. Αυτό το σύστημα ονομάζεται ρευστοστερεά κλίνη κυκλοφορίας, έστω και αν δεν υπάρχει διακριτή κλίνη σωματιδίων. Το κλάσμα όγκου των στερεών στο αιώρημα είναι αρκετά μικρό. Ένα τέτοιο σύστημα μοιάζει πολύ με ένα σύστημα πνευματικής μεταφοράς.

Η γενίκευση ότι τα υγρά προκαλούν μικρομερή ρευστοποίηση των στερεών ενώ τα αέρια ρευστοποίηση με φυσαλίδες δεν ισχύει πάντα. Η διαφορά της πυκνότητας είναι μια σημαντική παράμετρος και το νερό μπορεί να προκαλέσει ρευστοποίηση με φυσαλίδες στα πολύ βαριά στερεά, ενώ τα αέρια σε υψηλές πιέσεις μπορούν να προκαλέσουν μικρομερή ρευστοποίηση στα λεπτόκοκκα στερεά. Τα λεπτόκοκκα στερεά με μέτρια πυκνότητα μπορεί να εμφανίζουν μικρομερή ρευστοποίηση σε μια

ορισμένη περιοχή ταχυτήτων και ρευστοποίηση με φυσαλίδες σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Οι τύποι ρευστοποίησης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4.

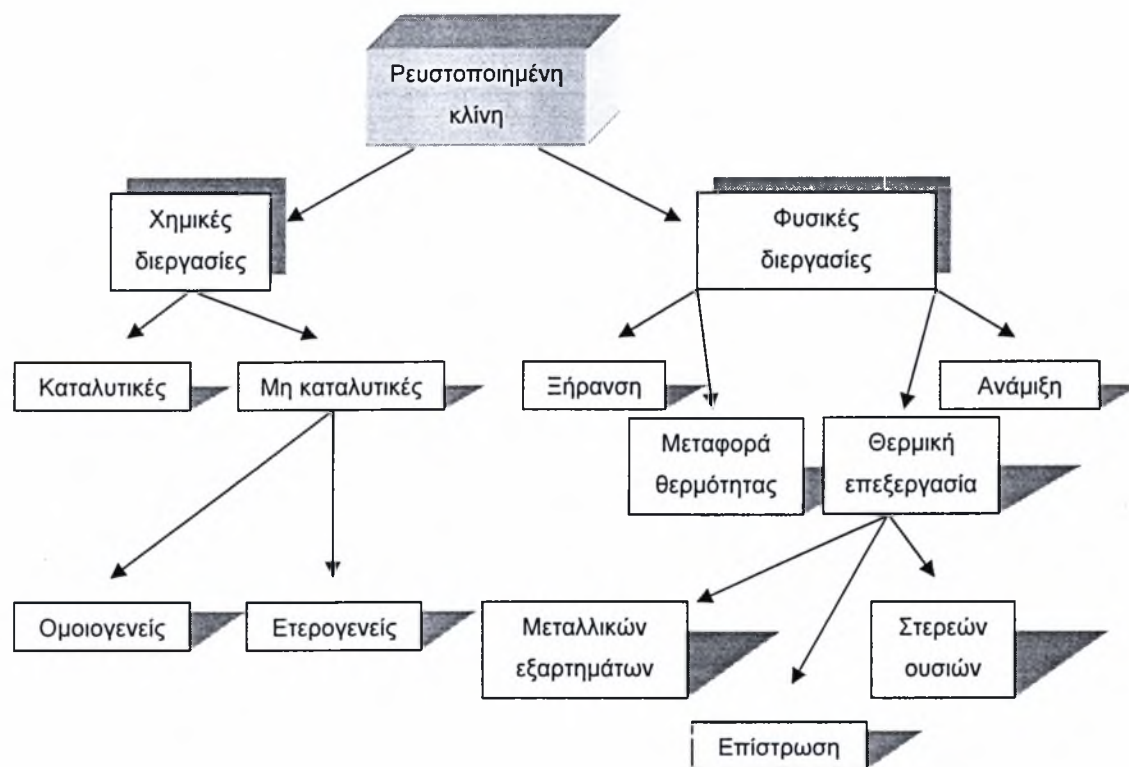


Σχήμα 2.4 – Τύποι ρευστοποίησης

### 2.1.4 Εφαρμογές της ρευστοποίησης

Το φαινόμενο της ρευστοποίησης βρίσκει σημαντικές βιομηχανικές εφαρμογές με την μορφή της ρευστοποιημένης κλίνης. Πολλές από αυτές σημειώνουν σημαντική εμπορική επιτυχία, ενώ ένας μεγάλος αριθμός εφαρμογών βρίσκεται σε στάδιο δοκιμής ή ανάπτυξης. Οι εγκαταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο στην κατασκευή και τροφοδοσία τους όσο στην προστασία του περιβάλλοντος από τις μειωμένες εκπομπές ρύπων. Συγκεκριμένα, η απλότητα της κατασκευής τους, η ευελιξία στην τροφοδοσία τους με στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα και η υψηλή απόδοση σε εντυπωσιακά χαμηλή θερμοκρασία που ελαχιστοποιεί τη θερμική παραγωγή  $\text{NO}_x$  είναι μερικά από αυτά. Επιπλέον, εμφανίζουν την δυνατότητα κατακράτησης του  $\text{SO}_2$  με τη χρήση ασβεστόλιθου ή δολομίτη ενώ είναι κατεξοχήν κατάλληλες για διακοπτόμενη λειτουργία – π.χ παύση λειτουργίας τη νύχτα ή το Σαββατοκύριακο – δεδομένης της μικρής πτώσης θερμοκρασίας της κλίνης. Εντούτοις, ο αριθμός εφαρμογών αυτής της τεχνολογίας έχει παραμείνει περιορισμένος εξαιτίας της σχετικά υψηλής λειτουργικής δαπάνης και επειδή η τεχνολογία είναι σχετικά νέα και εξειδικευμένη.

Γενικά, η ρευστοποιημένη κλίνη χρησιμοποιείται σε διεργασίες επαφής μεταξύ αερίων και στερεών ουσιών. Εντούτοις, σε ορισμένες περιπτώσεις η παρουσία του αερίου ή του στερεού είναι βοηθητική αφού δεν αποτελούν το υπό επεξεργασία υλικό αλλά χρησιμοποιούνται μόνο στη δημιουργία της ρευστοποιημένης κλίνης η οποία συντελεί στο τελικό αποτέλεσμα, όπως στην απόξεση λάστιχου από μεταλλικές επιφάνειες μέσω πυρόλυσης. Οι εγκαταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν για την εκμετάλλευση των αποβλήτων. Συγκεκριμένα, μεταχειρισμένα λάστιχα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο υλικό (αποτέφρωση) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ατμού ή να πυρολυθούν για την παραγωγή χημικών ουσιών. Οι εφαρμογές της ρευστοποιημένης κλίνης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5:



Σχήμα 2.5 – Εφαρμογές της ρευστοποιημένης κλίνης

#### 2.1.4.1 Χημικές Διεργασίες

##### ➤ Καταλυτικές

Οι καταλυτικές εφαρμογές της ρευστοποιημένης κλίνης έχουν προσφέρει τη μεγαλύτερη ώθηση στο πεδίο έρευνας, ανάπτυξης και χρήσης των ρευστοποιημένων στερεών. Ο καταλύτης είτε εισάγεται σε αέρια μορφή με το αέριο ρεύμα είτε τοποθετείται σαν ξεχωριστή στερεή ουσία στο στρώμα των σωματιδίων.



#### ✦ Διάσπαση υδρογονανθράκων

Η εξέλιξη της καταλυτικής διάσπασης υδρογονανθράκων από τις αρχές της δεκαετίας του '40 έχει οδηγήσει σε διάφορες διαμορφώσεις των συστημάτων ρευστοποιημένης κλίνης ανάλογα με τις ιδιαίτερες χρήσεις και απαιτήσεις του σχεδιαστή. Το υψηλό ποσοστό μεταφοράς των στερεών ουσιών μεταξύ του αναγεννητή και του αντιδραστήρα επιτρέπει μια εξισορρόπηση της εξώθερμης διεργασίας καύσης του άνθρακα στον αναγεννητή και της ενδόθερμης διεργασίας διάσπασης του πετρελαίου στον αντιδραστήρα. Έτσι, η θερμοκρασία και στις δύο μονάδες μπορεί να ελεγχθεί χωρίς τη χρήση βοηθητικών μηχανισμών ελέγχου θερμότητας. Η πρώτη εγκατάσταση καταλυτικής διάσπασης υδρογονανθράκων κατασκευάστηκε στο Baytown του Τέξας το 1942. Πολλές επιχειρήσεις παγκοσμίως συμμετέχουν στην ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων όπως οι Exxon Research & Engineering Co., Kellogg Co., Texaco Development Corporation, Gulf Research Development Co., Shell Oil Company. Με τη χρήση συστημάτων ρευστοποιημένης καταλυτικής διάσπασης υδρογονανθράκων παράγεται ένα μεγάλο πλήθος χημικών ουσιών (κυρίως παράγωγα του πετρελαίου) όπως αλκυλοχλωρίδια (alkyl chlorides), φθαλικός ανυδρίτης, ακριλονιτρίλιο (acrylonitrile).

#### ➤ Μη καταλυτικές

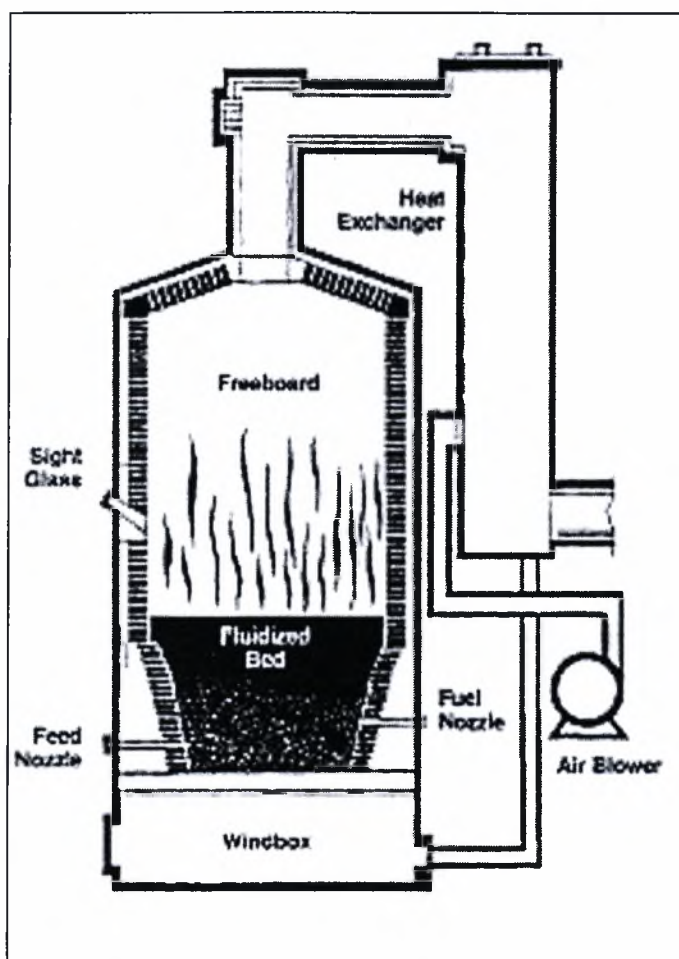
##### ✦ Ομοιογενείς

Οι ομοιογενείς μη καταλυτικές διεργασίες πραγματοποιούνται σε ρευστοποιημένη κλίνη για να επιτευχθεί ανάμιξη αερίων και έλεγχος θερμοκρασίας. Τα στερεά σωματίδια της κλίνης ενεργούν ως μέσο παραγωγής ή κατανάλωσης της θερμότητας και διευκολύνουν τη μεταφορά θερμότητας από ή προς το αέριο. Οι αντιδράσεις αυτού του τύπου περιλαμβάνουν τη χλωρίωση των υδρογονανθράκων ή την οξειδωση καυσίμων αέριας μορφής.

##### ✦ Ετερογενείς

Οι ετερογενείς μη καταλυτικές διεργασίες πραγματοποιούνται σε ρευστοποιημένη κλίνη για την επεξεργασία στερεών ουσιών. Αυτή η κατηγορία διεργασιών παρουσιάζει μεγάλη εμπορική χρήση. Η επεξεργασία των μεταλλευμάτων σουλφιδίου, αρσενικού, αντιμονίου για την παραγωγή χρυσού ή αργύρου, η επεξεργασία του πυρίτη ή των θειικών μεταλλευμάτων για την παραγωγή  $SO_2$  και η επεξεργασία των μεταλλευμάτων χαλκού, κοβαλτίου, ψευδάργυρου είναι οι σημαντικότερες μεταλλουργικές εφαρμογές. Επιπλέον, ο άνθρακας μπορεί να καεί στη ρευστοποιημένη κλίνη κατά τρόπο περιβαλλοντικά αποδεκτό με την προσθήκη ασβεστόλιθου

ο οποίος αντιδρά με το  $\text{SO}_2$  προς παραγωγή  $\text{CaSO}_4$ . Εξαιτίας της μέτριας θερμοκρασίας καύσης, περίπου  $800 - 900\text{ }^\circ\text{C}$ , τα οξειδία του αζώτου  $\text{NO}_x$  που παράγονται κατά την οξείδωση των ενώσεων του αζώτου που περιέχονται στον άνθρακα παραμένουν σε χαμηλό επίπεδο. Η καύση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες υπερπίεσης ή ατμοσφαιρικής πίεσης για την παραγωγή ατμού ή ενέργειας. Τέλος, σημαντική εφαρμογή αυτού του τύπου διεργασιών αποτελεί η αποτέφρωση αποβλήτων με ένα μεγάλο αριθμό τέτοιων μονάδων να βρίσκονται σε λειτουργία. Μια τέτοια εγκατάσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Τα υπό επεξεργασία υλικά είναι λάδια, ιατρικά απόβλητα, οικιστικά λύματα.



Σχήμα 2.6 – Μονάδα αποτέφρωσης αποβλήτων

#### 2.1.4.2 Φυσικές Διεργασίες

##### ➤ Ξήρανση

Οι μονάδες ρευστοποιημένης κλίνης για την ξήρανση στερεών, όπως άνθρακας, τσιμέντο, ασβεστόλιθος βρίσκουν ευρεία εφαρμογή. Οι οικονομικές

εκτιμήσεις καθιστούν αυτές τις μονάδες ιδιαίτερα ελκυστικές, ιδιαίτερα για την επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων στερεών υλικών. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου των εγκαταστάσεων ξήρανσης είναι ο έλεγχος των συνθηκών έτσι ώστε ένα προκαθορισμένο ποσό υγρασίας να παραμένει στα στερεά.

➤ **Θερμική επεξεργασία**

✦ **Στερεών ουσιών**

Πραγματοποιούνται γενικά σε πολύπλοκες, πολυμηματικές μονάδες με κύριο σκοπό τη συντήρηση της παραγόμενης θερμότητας.

✦ **Μεταλλικών εξαρτημάτων**

Η θερμική επεξεργασία των μεγάλων μεταλλικών αντικειμένων πραγματοποιείται σε μακρόστενες ρευστοποιημένες κλίνες. Τα προς επεξεργασία αντικείμενα μετακινούνται στο χώρο της κλίνης με υπερυψωμένα συστήματα μεταφορέων. Η ρευστοποιημένη κλίνη χρησιμοποιείται λόγω του υψηλού ποσοστού μεταφοράς θερμότητας και της ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Η υπό μελέτη εγκατάσταση ρευστομηχανικής κλίνης κατατάσσεται στην συγκεκριμένη κατηγορία.

✦ **Επίστρωση**

Οι ρευστοποιημένες κλίνες θερμοπλαστικών ρητινών χρησιμοποιούνται για την επίστρωση μεταλλικών εξαρτημάτων. Ένα κατάλληλα προετοιμασμένο μεταλλικό εξάρτημα βυθίζεται στη ρευστοποιημένη κλίνη. Εξαιτίας της αυξημένης θερμοκρασίας του εξαρτήματος λιώνει το θερμοπλαστικό, διαμορφώνοντας έτσι ένα συνεχές ομοιόμορφο επίστρωμα.

## 2.2 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΥΛΗ

### 2.2.1 Εισαγωγή

#### 2.2.1.1 Ορισμός

Ως σωματιδιακή ύλη ορίζεται οποιοδήποτε διασκορπισμένο υλικό, στερεής ή υγρής κατάστασης, στο οποίο τα μεμονωμένα σωματίδια έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από απλά μόρια, περίπου  $2 \cdot 10^{-4}$  μm, αλλά μικρότερη από περίπου  $5 \cdot 10^2$  μm. Στην διεθνή βιβλιογραφία συνήθως ονομάζεται με τον γενικό όρο "Particulate Matter" και συμβολίζεται ως PM. Το μέγεθος, η χημική σύνθεση και η συγκέντρωση των επιμέρους συστατικών αποτελούν σημαντικά χαρακτηριστικά, ποικίλουν και κατατάσσουν τη σωματιδιακή ύλη σε μια εξαιρετικά σύνθετη και διαφοροποιημένη κατηγορία ρύπων.

#### 2.2.1.2 Εμφάνιση – Δημιουργία

Ουσιαστικά, κάθε βιομηχανική διεργασία είναι πιθανή πηγή εκπομπής σωματιδιακής ύλης όπως η αποτέφρωση αποβλήτων, η καύση άνθρακα και αργού πετρελαίου για παραγωγή ενέργειας ή η επεξεργασία μετάλλων και άλλων υλικών. Επιπλέον, οι γεωργικές εργασίες αποτελούν σημαντική πηγή παραγωγής σωματιδίων ειδικά στην καλλιέργεια ξηρού εδάφους. Στις αστικές περιοχές, η κυκλοφορία οχημάτων στους δρόμους, οι εργασίες κατασκευής και κατεδάφισης είναι επίσης σημαντικές πηγές δημιουργίας σωματιδιακής ύλης. Τέλος, οι πυρκαγιές αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπής αερομεταφερόμενων σωματιδίων, όπως οι πυρκαγιές για το καθάρισμα του εδάφους για καλλιέργεια, το κάψιμο των απορριμμάτων και οι δασικές πυρκαγιές αν και οι τελευταίες θεωρούνται συνήθως ως φυσική (μη ανθρωπογενής) πηγή.

#### 2.2.1.3 Κατηγοριοποίηση

Όπως αναφέρθηκε στον ορισμό της σωματιδιακής ύλης το μέγεθος, η φυσική κατάσταση και η χημική σύνθεση των σωματιδίων που τη συνιστούν ποικίλουν και επομένως αποτελούν κριτήρια για την κατηγοριοποίησή της.

Με βάση τη φυσική κατάσταση, η σωματιδιακή ύλη διακρίνεται σε:

- Σκόνη – Dust: σωματίδια στερεής κατάστασης που προέρχονται από διεργασίες λείανσης ή θραύσης.
- Καπνός – Fumes: σωματίδια στερεής κατάστασης που προέρχονται από συμπύκνωση ατμών.

- Ομίχλη – Mist (ή πιο γενικά με τον όρο Fog): σωματίδια υγρής κατάστασης που διαμορφώνονται από τη συμπύκνωση ατμών.
- Αιθάλη – Soot: σωματίδια στερεής κατάστασης που αποτελούνται κυρίως από άνθρακα και προκύπτουν από ατελή καύση.
- Σταγονίδια – Spray: σωματίδια υγρής κατάστασης που διαμορφώνονται από τη διάσπαση σε απλούστερα στοιχεία μιας αρχικής ένωσης σε υγρή μορφή.

Στη γενική κατάσταση, η σωματιδιακή ύλη εμφανίζεται με ποικίλες και συχνά ανώμαλες μορφές. Εντούτοις, το μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια της ισοδύναμης αεροδυναμικής διαμέτρου που αντιστοιχεί στη διάμετρο ενός σφαιρικού σωματιδίου με πυκνότητα  $1 \text{ gr} / \text{cm}^3$  το οποίο κινείται σε σχέση με τον ατμοσφαιρικό αέρα στο πεδίο βαρύτητας με την ίδια ταχύτητα με το θεωρούμενο σωματίδιο. Το μέγεθος των σωματιδίων καθορίζει την φυσική τους συμπεριφορά και με βάση αυτό διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Εξαιρετικά λεπτά σωματίδια – Ultra fine particles: σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από  $0,1 \mu\text{m}$ . Αποτελούνται από τα προϊόντα καύσης, τους πυρήνες θαλασσινών αλάτων και τα τελικά προϊόντα των χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα που περιλαμβάνουν το όζον και τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC). Τα μικρότερα σωματίδια πλησιάζουν το μέγεθος των μορίων μεγάλων αερίων ενώσεων.
- Λεπτά σωματίδια – Fine particles: σωματίδια που η διάμετρός τους κυμαίνεται από  $0,1 \mu\text{m}$  έως  $2,5 \mu\text{m}$ . Αποτελούνται κυρίως από τα σωματίδια καπνού και σκόνης.
- Χονδροειδή σωματίδια – Coarse particles: σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από  $2,5 \mu\text{m}$ . Αποτελούνται κυρίως από τους σπόρους μυκήτων, τη γύρη και τα σωματίδια που παράγονται μέσω φυσικών διαδικασιών όπως η διάβρωση από τον αέρα και η ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Μια περαιτέρω διάκριση γίνεται με βάση την τροποποίηση της χημικής τους σύστασης και κατάστασης. Έτσι, η σωματιδιακή ύλη διακρίνεται σε:

- Πρωτεύοντα σωματίδια.
- Δευτερεύοντα σωματίδια.

Τα πρωτεύοντα σωματίδια εισάγονται άμεσα στην ατμόσφαιρα ενώ τα δευτερεύοντα διαμορφώνονται από χημικές αντιδράσεις μεταξύ των πρωτευόντων σωματιδίων και άλλων στοιχείων της ατμόσφαιρας. Για παράδειγμα, όταν αντιδρά το όζον με τις ακόρεστες πτητικές οργανικές ενώσεις, παράγονται νέες ενώσεις οι οποίες είτε κατακάθονται στα υπάρχοντα σωματίδια είτε δημιουργούν νέα, διαμορφώνοντας έτσι δευτερεύουσα σωματιδιακή ύλη.

### 2.2.1.4 Αιώρηση σωματιδιακής ύλης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο που η σωματιδιακή ύλη παραμένει αιωρούμενη στο περιβάλλον είναι:

- Υγρασία του αέρα.
- Θερμοκρασία του αέρα.
- Ταχύτητα και κατεύθυνση του αέρα.
- Μέγεθος και πυκνότητα των σωματιδίων.
- Ηλεκτροστατικό πεδίο.
- Σχηματισμός συσσωματωμάτων.

Ο σχηματισμός συσσωματωμάτων αναφέρεται στο γεγονός ότι για διάφορους λόγους τα σωματίδια στον αέρα μπορούν να συνενωθούν και να διαμορφώσουν έτσι μεγαλύτερα σωματίδια. Γενικότερα, τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο κάτω από 5 μm ακολουθούν την κίνηση του αέρα και μπορούν να παραμείνουν αιωρούμενα για ημέρες στην ατμόσφαιρα. Τα μεγαλύτερα σωματίδια, με αεροδυναμική διάμετρο πάνω από 10 μm κατακάθονται μέσα σε λίγες ώρες είτε λόγω του βάρους τους είτε μέσω της βροχής.

### 2.2.1.5 Επίδραση στην ανθρώπινη υγεία

Η σωματιδιακή ύλη ως αέριος ρύπος επηρεάζει κυρίως το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Τα εισπνεόμενα σωματίδια κατακάθονται στην αναπνευστική οδό και τους πνεύμονες με πέντε διαφορετικούς μηχανισμούς εναπόθεσης:

- Πρόσκρουση λόγω αδράνειας.
- Ιζηματάποθεση λόγω βαρύτητας.
- Διάχυση.
- Ηλεκτροστατική εναπόθεση.
- Ανάσχεση.

Συγκεκριμένα, τα σωματίδια μεγάλων διαστάσεων προσκρούουν στα επιφανειακά τοιχώματα του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος ξεφεύγοντας από το ρεύμα του εισπνεόμενου αέρα ή εναποθέτονται ιζηματικά λόγω βαρύτητας στους κατώτερους αναπνευστικούς αγωγούς ενώ οι μηχανισμοί της διάχυσης είναι σημαντικοί για την εναπόθεση των μικρών σωματιδίων βαθύτερα στους πνεύμονες. Σωματίδια με μέγεθος 10 μm ή μεγαλύτερο τείνουν να συγκρατηθούν στη μύτη, στην τραχεία και τις βρογχικές κοιλότητες του αναπνευστικού συστήματος. Στη συνέχεια μπορούν να απομακρυνθούν με το βήχα ή το φτάρνισμα. Τα μικρότερα σωματίδια που δεν συγκρατούνται και καταλήγουν στο τραχειοβρογχικό σύστημα μπορούν να κατακρατηθούν από τη βλέννα και να απομακρυνθούν με την κατάποση ή την απόπτυση. Εντούτοις, σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 10 μm, συχνά

καταφέρνουν να διαπεράσουν τους καμπύλους και πολύπλοκους αγωγούς του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος χωρίς να κατακρατηθούν από τη βλεννώδη επένδυσή τους και καταλήγουν στους πνεύμονες. Ανάλογα με το μέγεθός τους, ορισμένα σωματίδια τείνουν να ακολουθήσουν το ρεύμα του εκπνεόμενου αέρα και εξέρχονται από τον ανθρώπινο οργανισμό ενώ άλλα παραμένουν στην πνευμονική περιοχή όπου κατακρατούνται από τις μικροσκοπικές κυψελίδες των πνευμόνων.

Τα τελευταία χρόνια, η έκθεση στα λεπτά και εξαιρετικά λεπτά σωματίδια έχει προσδιοριστεί ως σημαντικός παράγοντας που έχει επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας – Π.Ο.Υ (World Health Organization, WHO) από το 1997 έχει αναθεωρήσει τα μέχρι τότε δεδομένα για τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία της σωματιδιακής ύλης. Η έκθεση της WHO κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι παρατηρούμενες επιπτώσεις συνδέονται κυρίως με τα λεπτά σωματίδια και όχι με τα χονδροειδή. Αυτή η έκθεση πρόσθεσε ότι οι μελλοντικοί κανονισμοί και διαδικασίες ελέγχου πρέπει να δώσουν έμφαση στις κατηγορίες των λεπτών και των εξαιρετικά λεπτών σωματιδίων. Τέλος, η έκθεση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των επιπτώσεων στην υγεία και του επιπέδου έκθεσης καθημερινά (σε μέσο όρο) σε σωματιδιακή ύλη.

### 2.2.1.6 Όρια εκπομπής και έκθεσης

Οι οριακές τιμές ρύπων στο περιβάλλον όπως αυτές ορίζονται με βάση την κοινοτική νομοθεσία αλλά και αυτήν στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής καθώς και η κείμενη νομοθεσία για την υγιεινή και ασφάλεια στους χώρους εργασίας θα αναπτυχθούν διεξοδικά στο Κεφάλαιο 2.3. Στο σημείο αυτό θα γίνει μια μικρή αναφορά ώστε να γίνουν κατανοητά κάποια στοιχεία που θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους.

Στην Ελλάδα, η υγιεινή και ασφάλεια στους χώρους εργασίας είναι τομέας που από κρατικής πλευράς υπάγεται στις αρμοδιότητες του Υπουργείου Εργασίας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων. Η κείμενη νομοθεσία περιλαμβάνει μια σειρά νόμων και προεδρικών διαταγμάτων με τελευταία αναθεώρηση το Προεδρικό Διάταγμα 90/1999. Στην νομοθεσία αυτή ορίζονται διάφορες έννοιες ενώ επιπλέον καθορίζονται οι οριακές τιμές έκθεσης σε διάφορους χημικούς παράγοντες. Το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης με την κοινοτική οδηγία 1999/30/ΕΚ έχει θεσπίσει οριακές τιμές για την συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης στον αέρα του περιβάλλοντος. Αντίστοιχα, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Environmental Protection Agency (EPA) έχει θεσπίσει οριακές τιμές για τη συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης με αεροδυναμική διάμετρο 2,5 μm (PM<sub>2,5</sub>) και 10 μm (PM<sub>10</sub>) στον αέρα του περιβάλλοντος μέσω των National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Είναι λογικό οι οριακές τιμές για

την συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης στον αέρα του περιβάλλοντος να είναι πιο αυστηρές σε σχέση με τα όρια έκθεσης στους χώρους εργασίας αφού σε αυτούς περιλαμβάνονται και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Σχεδόν το σύνολο των επιδημιολογικών ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης σωματιδιακής ύλης στον ανθρώπινο οργανισμό λαμβάνουν υπ' όψιν την έκθεση του ανθρώπου σε περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή σε συγκεντρώσεις σωματιδίων μικρότερες από αυτές που είναι νομοθετικά αποδεκτές στους χώρους εργασίας.

### 2.2.2 Γενικά στοιχεία

Σε αντίθεση με άλλους κοινούς αέριους ρύπους ( $O_3$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ), η σωματιδιακή ύλη δεν αποτελεί μια συγκεκριμένη χημική οντότητα αλλά είναι ένα μίγμα σωματιδίων διαφορετικού μεγέθους, σχήματος, σύνθεσης και φυσικών, χημικών και θερμοδυναμικών ιδιοτήτων που προέρχεται από διαφορετικές πηγές. Ως σωματιδιακή ύλη ορίζεται οποιοδήποτε διασκορπισμένο υλικό, στερεής ή υγρής κατάστασης, στο οποίο τα μεμονωμένα σωματίδια έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από απλά μόρια, περίπου  $2 \cdot 10^{-4}$   $\mu m$ , αλλά μικρότερη από περίπου  $5 \cdot 10^2$   $\mu m$ . Στην διεθνή βιβλιογραφία συνήθως ονομάζεται με τον γενικό όρο "Particulate Matter" και συμβολίζεται ως PM. Παραδείγματα σωματιδιακής ύλης αποτελούν τα σωματίδια που παράγονται σε διεργασίες καύσης, όπως η αιθάλη ή η τέφρα, σε φωτοχημικές διεργασίες, όπως τα σωματίδια που δημιουργούνται στην αστική ομίχλη και τα σωματίδια αλάτων που παράγονται από τη θάλασσα.

Όπως αναφέρθηκε στον ορισμό της, η σωματιδιακή ύλη μπορεί να είναι στερεής ή υγρής κατάστασης αλλά επιπλέον μπορεί να αποτελείται από ένα στερεό πυρήνα που περιβάλλεται από υγρή φάση. Η σύστασή της ποικίλει αφού μπορεί να περιλαμβάνει ανόργανα ιόντα, στοιχειώδη άνθρακα, μεταλλικές, οργανικές και κρυσταλλικές ενώσεις και επιπλέον νερό αν πρόκειται για υγροσκοπικά σωματίδια. Ιδιαίτερα ο αριθμός των οργανικών ενώσεων που είναι δυνατόν να συνιστούν τη σωματιδιακή ύλη ανέρχεται σε πολλές εκατοντάδες. Τα πρωτεύοντα σωματίδια εκπέμπονται άμεσα από τις πηγές ενώ τα δευτερεύοντα σωματίδια διαμορφώνονται μέσω χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα μεταξύ αερίων όπως το ατμοσφαιρικό οξυγόνο ( $O_2$ ) και ο υδρατμός ( $H_2O$ ), το όζον ( $O_3$ ), ριζών όπως το υδροξύλιο ( $OH\cdot$ ) και η νιτρική ρίζα ( $NO_3\cdot$ ) και άλλων ρύπων όπως το διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ), τα οξειδία του αζώτου ( $NO_x$ ) και τα οργανικά αέρια από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές. Η διαδικασία σχηματισμού δευτερεύουσας σωματιδιακής ύλης περιλαμβάνει την πυρηνοποίηση σωματιδίων που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα, την προσρόφηση αερίων στα υπάρχοντα σωματίδια και τη



συσσωμάτωσή τους. Κατά συνέπεια, οποιοδήποτε δεδομένο σωματίδιο μπορεί να περιέχει σωματιδιακή ύλη από πολλές πηγές. Επιπλέον, ένα σωματίδιο από μια δεδομένη πηγή είναι πιθανό να αποτελείται από ένα μίγμα χημικών συστατικών και σωματίδια από διαφορετικές πηγές μπορούν να συσσωματωθούν για να διαμορφώσουν ένα νέο σωματίδιο. Έτσι, η σωματιδιακή ύλη μπορεί να θεωρηθεί ως μίγμα διαφόρων μιγμάτων.

Η πλήρης περιγραφή της σωματιδιακής ύλης θα περιελάμβανε μια αθροιστική αναφορά στη χημική σύνθεση, τη μορφολογία, το μέγεθος κάθε επιμέρους σωματιδίου και τη σχετική συνεισφορά κάθε τύπου σωματιδίων στο συνολικό σχηματισμό (Friedlander, 1970). Μέχρι σήμερα, για τον υπολογισμό της επιφάνειας χρησιμοποιούνται οι κατανομές μεγέθους των σωματιδίων από την αεροδυναμική συμπεριφορά ή τη σκέδαση του φωτός. Η χημική σύσταση συνήθως καθορίζεται από την ανάλυση των δειγμάτων. Οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνικές ανάλυσης με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου με ακτίνες-Χ ή τη φασματομετρία μάζας παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου των μεμονωμένων σωματιδίων και επομένως φέρνουν την περιγραφή του Friedlander πιο κοντά στην πραγματικότητα.

### 2.2.3 Πηγές εκπομπής σωματιδίων

Οι πηγές εκπομπής σωματιδίων διακρίνονται σε ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές. Οι μεν πρώτες αναφέρονται σε διεργασίες που πραγματοποιούνται ηθελημένα με ανθρώπινη παρέμβαση με σκοπό την παραγωγή έργου, ενώ οι δεύτερες αναφέρονται σε τυχαίες συνήθως διεργασίες που πραγματοποιούνται με φυσικό τρόπο στην ατμόσφαιρα.

Οι ανθρωπογενείς πηγές μπορούν περαιτέρω να διαιρεθούν σε σταθερές και κινητές πηγές. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται διεργασίες όπως η καύση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας, η κεντρική θέρμανση κατοικιών και χώρων εργασίας, οι βιομηχανικές διεργασίες, η επεξεργασία μετάλλων, ορυκτών και πετροχημικών, οι εργασίες κατασκευής και κατεδάφισης, οι γεωργικές εργασίες ιδιαίτερα σε ξερά και διαβρωμένα εδάφη, η διάθεση και ανακύκλωση αποβλήτων. Οι κινητές πηγές εκπομπής σωματιδίων περιλαμβάνουν τις άμεσες εκπομπές πρωτεύουσας και δευτερεύουσας σωματιδιακής ύλης από οδικά και μη οχήματα όπως αυτοκίνητα, τρένα, πλοία, αεροπλάνα.

Οι φυσικές πηγές εκπομπής σωματιδίων περιλαμβάνουν τη μεταφερόμενη σκόνη μέσω του ανέμου από το έδαφος, τη θαλασσινή αύρα και τα υπολείμματα φυτών και εντόμων. Επιπλέον, οι πυρκαγιές από φυσικά αίτια, οι εκρήξεις ηφαιστειών και η διάβρωση επιφανειών από τον άνεμο αποτελούν διεργασίες εκπομπής σημαντικών

ποσοτήτων σωματιδιακής ύλης στην ατμόσφαιρα. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι πηγές εκπομπής, ανθρωπογενείς και φυσικές, των σημαντικότερων επιμέρους συστατικών της σωματιδιακής ύλης.

Συστατικά σωματιδιακής ύλης	Πρωτεύουσα		Δευτερεύουσα	
	Φυσική	Ανθρωπογενής	Φυσική	Ανθρωπογενής
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Θαλασσινή αύρα	Καύση ορυκτών καυσίμων	Οξειδωση ενώσεων S από πυρκαγιές, ηφαιστεια	Οξειδωση ενώσεων S από καύση ορυκτών καυσίμων
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-	Οξειδωση NO <sub>x</sub> από πυρκαγιές	Οξειδωση NO <sub>x</sub> από καύση ορυκτών καυσίμων
Ορυκτά	Διάβρωση	Κατασκευές και κατεδαφίσεις, αγροτικές εργασίες	-	-
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-	-	Εκπομπές NH <sub>3</sub> από άγρια ζώα	Εκπομπές NH <sub>3</sub> από υπονόμους, λιπάσματα
Οργανικός C	Πυρκαγιές	Φωτιές, εξατμίσεις οχημάτων, φθορά ασφάλτου και λάστιχων	Οξειδωση υδρογονανθράκων από φυτά και πυρκαγιές	Οξειδωση υδρογονανθράκων από εξατμίσεις οχημάτων
Στοιχειακός C	Πυρκαγιές	Εξατμίσεις οχημάτων, φθορά ασφάλτου και λάστιχων	-	-
Μέταλλα	Ηφαιστειακή δραστηριότητα, διάβρωση	Καύση ορυκτών καυσίμων, φθορά	-	-
Βιολογικά	Βακτήρια, ιοί, υπολείμματα φυτών και ζώων, γύρη	-	-	-

Πίνακας 2.2 – Πηγές εκπομπής συστατικών σωματιδιακής ύλης

## 2.2.4 Κατηγοριοποίηση

### 2.2.4.1 Ορισμός διαμέτρου σωματιδίων

Η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου μπορεί να καθοριστεί με τη χρήση οπτικού ή ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, μέσω της σκέδασης του φωτός, τη θεωρία του Mie ή την αεροδυναμική του συμπεριφορά. Εντούτοις, η σωματιδιακή ύλη συνήθως δεν είναι σφαιρικού σχήματος. Επομένως, για την περιγραφή της πρέπει να οριστεί και χρησιμοποιηθεί μια ισοδύναμη διάμετρος. Έτσι, ισοδύναμη διάμετρος θεωρείται η διάμετρος μιας σφαίρας που έχει την ίδια φυσική συμπεριφορά με το θεωρούμενο σωματίδιο. Η ισοδύναμη διάμετρος συνήθως λαμβάνει τρεις μορφές:

- Οπτική διάμετρος.
- Διάμετρος Stokes.
- Αεροδυναμική διάμετρος.

Η διάχυση και η κατακάθιση λόγω βαρύτητας είναι σημαντικές φυσικές συμπεριφορές που καθορίζουν τις διαδικασίες μεταφοράς (στο περιβάλλον), συλλογής ή αφαίρεσης (σε βιομηχανικές διεργασίες) και εναπόθεσης των σωματιδίων στην αναπνευστική οδό. Έτσι, ανάλογα με την υπό ανάλυση διεργασία χρησιμοποιείται η κατάλληλη ισοδύναμη διάμετρος στον ορισμό των διαστάσεων και των άλλων σχετικών χαρακτηριστικών της σωματιδιακής ύλης. Για παράδειγμα, η διάχυση είναι σημαντικότερη για τα μικρότερα σωματίδια και επομένως χρησιμοποιείται πιο συχνά η διάμετρος Stokes ενώ στα μεγαλύτερα σωματίδια επιδρά περισσότερο η βαρύτητα και επομένως χρησιμοποιείται συχνά η αεροδυναμική διάμετρος.

Οπτική διάμετρος είναι η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου με τον ίδιο δείκτη διάθλασης με το θεωρούμενο σωματίδιο.

Η διάμετρος Stokes  $D_p$  περιγράφει το μέγεθος των σωματιδίων με βάση την αεροδυναμική οπισθέλκουσα. Συγκεκριμένα, η διάμετρος Stokes ορίζεται ως η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου το οποίο έχει την ίδια πυκνότητα και την ίδια αεροδυναμική οπισθέλκουσα με το θεωρούμενο σωματίδιο όταν η ταχύτητά του διαφέρει από αυτή του περιβάλλοντος ρευστού. Για ένα ομαλό, σφαιρικού σχήματος σωματίδιο, το  $D_p$  είναι ακριβώς ίσο με τη φυσική διάμετρο του σωματιδίου. Η διάμετρος Stokes είναι η κατάλληλη παράμετρος για την περιγραφή σωματιδίων των οποίων η συμπεριφορά ορίζεται από τα φαινόμενα διάχυσης. Επιπλέον, είναι ανεξάρτητη από την πυκνότητα των σωματιδίων και χρησιμοποιείται στις κατανομές μεγέθους, όταν αυτές πραγματοποιούνται με βάση την σκέδαση του φωτός και την ηλεκτρική κινητικότητα.

Η αεροδυναμική διάμετρος  $D_a$  αντιστοιχεί στη διάμετρο ενός σφαιρικού σωματιδίου με πυκνότητα  $1 \text{ gr} / \text{cm}^3$  το οποίο κινείται σε σχέση με τον ατμοσφαιρικό αέρα στο πεδίο βαρύτητας με την ίδια ταχύτητα με το θεωρούμενο σωματίδιο. Συνήθως, η κατηγοριοποίηση των σωματιδίων με βάση το μέγεθος γίνεται συγκρίνοντας την αεροδυναμική διάμετρο. Έτσι, ο καθορισμός των  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  και της εισπνεύσιμης σωματιδιακής ύλης αναφέρεται στην αεροδυναμική διάμετρο. Για σωματίδια μεγαλύτερα από  $0,5 \mu\text{m}$  συνήθως χρησιμοποιείται η αεροδυναμική διάμετρος ενώ για μικρότερα η διάμετρος Stokes. Η αεροδυναμική διάμετρος εξαρτάται από την πυκνότητα των σωματιδίων. Έτσι, σωματίδια με το ίδιο φυσικό μέγεθος και μορφή αλλά διαφορετική πυκνότητα θα έχουν την ίδια διάμετρο Stokes αλλά διαφορετική αεροδυναμική διάμετρο.

Η αεροδυναμική διάμετρος  $D_a$  συνδέεται με την διάμετρο Stokes  $D_p$  μέσω της Εξ.(2.35):

$$D_a = D_p \cdot \left( \frac{\rho \cdot C_p}{C_a} \right)^{1/2} \quad \text{Εξ. (2.35)}$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα των σωματιδίων και  $C_p$ ,  $C_a$  είναι οι συντελεστές ολίσθησης Cunningham που σχετίζονται με τις διαμέτρους  $D_p$  και  $D_a$  αντίστοιχα. Ο συντελεστής ολίσθησης είναι μια συνάρτηση του λόγου της διαμέτρου των σωματιδίων με την μέση ελεύθερη διαδρομή του περιβάλλοντος αερίου (για τον αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση και  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  είναι  $0,066 \mu\text{m}$ ). Ουσιαστικά, ο συντελεστής Cunningham αποτελεί ένα εμπειρικό συντελεστή που λαμβάνει υπ' όψιν του τη μείωση της οπισθέλκουσας που ασκείται στα σωματίδια λόγω της ολίσθησης των μορίων του περιβάλλοντος αερίου στην επιφάνεια των σωματιδίων. Για τα μεγάλα σωματίδια ( $D_p > 5 \mu\text{m}$ ) είναι  $C = 1$ , ενώ για τα μικρότερα  $C > 1$ .

Για τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από τη μέση ελεύθερη διαδρομή  $\lambda$ , δηλαδή  $D_p > \lambda$ , η αεροδυναμική διάμετρος που δίνεται από την Εξ.(2.35) προσεγγίζεται από:

$$D_a = D_p \cdot (\rho)^{1/2} \quad \text{Εξ. (2.36)}$$

Η παραπάνω σχέση δηλώνει ότι η αεροδυναμική διάμετρος είναι ευθέως ανάλογη προς την τετραγωνική ρίζα της πυκνότητας των σωματιδίων. Για τα σωματίδια με διάμετρο πολύ μικρότερη από τη μέση ελεύθερη διαδρομή  $\lambda$ , δηλαδή  $D_p \ll \lambda$ , ο συντελεστής ολίσθησης πρέπει να ληφθεί υπόψη. Σε αυτήν την περίπτωση η αεροδυναμική διάμετρος είναι ευθέως ανάλογη προς την πυκνότητα των σωματιδίων:

$$D_a = D_p \cdot \rho \quad \text{Εξ. (2.37)}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η αεροδυναμική διάμετρος έχει διαστάσεις  $(\text{μήκος}) \cdot [(\text{μάζα})/(\text{μήκος})^3]^{1/2}$ . Αν και είναι παράδοξη η συγκεκριμένη παραδοχή, εντούτοις χρησιμοποιείται συχνά (Noel de Nevers, 1995). Οι λεπτομερείς ορισμοί των διαφόρων μεγεθών και των σχέσεών τους δίνονται σε εξειδικευμένα εγχειρίδια σωματιδιακής ύλης όπως των Friedlander (2000), Reist (1984, 1993), Seinfeld και Pandis (1998), Hinds (1999), Vincent (1989, 1995), Willeke και Baron (1993, 2002), Fuchs (1964, 1989).

#### 2.2.4.2 Φυσική κατάσταση

Με βάση τη φυσική κατάσταση, η σωματιδιακή ύλη διακρίνεται σε:

- Σκόνη – Dust: σωματίδια στερεής κατάστασης και αρκετά μεγάλης διαμέτρου, περίπου 100 μm. Τα σωματίδια προέρχονται από διεργασίες λείανσης ή θραύσης και είτε παράγονται σ' αυτές και συμπαρασύρονται από αέρια κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, όπως το κάρβουνο και το τσιμέντο, είτε χρησιμοποιούνται άμεσα, όπως η άμμος σε εργασίες αμμοβολής.
- Καπνός – Fumes: σωματίδια στερεής κατάστασης και αρκετά μικρής διαμέτρου, περίπου 0,03 έως 0,3 μm. Συνήθως πρόκειται για οξειδία μετάλλων που προέρχονται από συμπύκνωση ατμών μέσω εξάχνωσης, απόσταξης ή διαπύρωσης. Παραδείγματα καπνών αποτελούν τα οξειδία του ψευδαργύρου και του μολύβδου που παράγονται κατά την συμπύκνωση και οξείδωση των μετάλλων σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Ομίχλη – Mist (ή πιο γενικά με τον όρο Fog): σωματίδια υγρής κατάστασης και διαμέτρου που κυμαίνεται από 0,5 έως 3,0 μm. Διαμορφώνονται από τη συμπύκνωση ατμών και μερικές φορές από χημικές αντιδράσεις. Παράδειγμα αποτελεί ο σχηματισμός της ομίχλης θειικού οξέος. Το αέριο τριοξείδιο του θείου SO<sub>3</sub> γίνεται υγρό δεδομένου ότι το σημείο δρόσου του είναι στους 22 °C. Τα μόριά του είναι υγροσκοπικά και έτσι παράγεται ομίχλη H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- Αιθάλη – Soot: σωματίδια στερεής κατάστασης και διαμέτρου που κυμαίνεται από 0,05 έως 1,0 μm και είναι προϊόντα ατελούς καύσης οργανικών ενώσεων. Κατά τη διάρκεια της καύσης οργανικών ενώσεων παράγονται επιπλέον υδρογονάνθρακες, οργανικά οξέα, οξειδία του θείου και του αζώτου. Εντούτοις, μόνο τα στερεά σωματίδια που προκύπτουν κατά την ατελή καύση των οργανικών ενώσεων ονομάζονται καπνός.
- Σταγονίδια – Spray: σωματίδια υγρής κατάστασης που διαμορφώνονται από τη διάσπαση σε απλούστερα στοιχεία μιας αρχικής ένωσης σε υγρή μορφή.

### 2.2.4.3 Μέγεθος

Η κατηγοριοποίηση που ακολουθεί ουσιαστικά αναφέρεται στο μέγεθος της σωματιδιακής ύλης αλλά περιλαμβάνει και άλλα κριτήρια όπως η πηγή παραγωγής της και η ηλικία της.

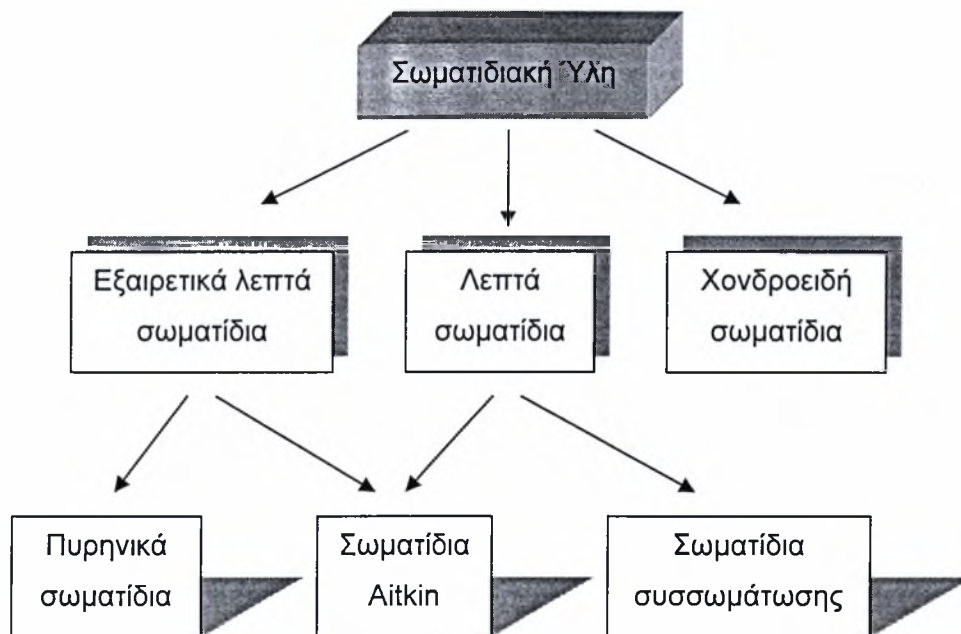
- Εξαιρετικά λεπτά σωματίδια – Ultra fine particles: σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,1  $\mu\text{m}$ . Αποτελούνται από τα προϊόντα καύσης, τους πυρήνες θαλασσιών αλάτων και τα τελικά προϊόντα των χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα που περιλαμβάνουν το όζον και τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC). Τα μικρότερα σωματίδια πλησιάζουν το μέγεθος των μορίων μεγάλων αερίων ενώσεων.
- Λεπτά σωματίδια – Fine particles: σωματίδια που η διάμετρός τους κυμαίνεται από 0,1  $\mu\text{m}$  έως 2,5  $\mu\text{m}$ . Αποτελούνται κυρίως από τα σωματίδια καπνού και σκόνης και περιλαμβάνουν μέταλλα, στοιχειακό και οργανικό άνθρακα καθώς και θειικά και νιτρικά άλατα.
- Χονδροειδή σωματίδια – Coarse particles: σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 2,5  $\mu\text{m}$ . Αποτελούνται κυρίως από τους σπόρους μυκήτων, τη γύρη και τα σωματίδια που παράγονται μέσω φυσικών διαδικασιών όπως η διάβρωση από τον αέρα και η ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Μια περαιτέρω διάκριση των πολύ μικρού μεγέθους σωματιδίων τα κατατάσσει στις εξής κατηγορίες:

- Πυρηνοποιημένα σωματίδια – Nucleation particles: πρόσφατα διαμορφωμένα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 nm που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ενεργών πυρηνικών διεργασιών. Οι σύγχρονες τεχνικές ανάλυσης περιορίζουν τις μετρήσεις σε μεγέθη μεγαλύτερα από 3 nm.
- Σωματίδια Aitkin – Aitkin particles: πρόσφατα διαμορφωμένα σωματίδια με διάμετρο μεταξύ 10 και 100 nm. Τα σωματίδια Aitkin προκύπτουν από την ανάπτυξη των μικρότερων σωματιδίων.
- Σωματίδια συσσωμάτωσης – Accumulation particles: πρόκειται για σωματίδια με διάμετρο μεταξύ 0,1 και 2,5  $\mu\text{m}$ . Τα σωματίδια συσσωμάτωσης σχηματίζονται όταν πυρηνικά και Aitkin σωματίδια συνενώνονται ή προσροφούνται πάνω σε άλλα σωματίδια.

Επιπλέον πολύ συχνά χρησιμοποιούνται οι συμβολισμοί  $\text{PM}_{10}$  και  $\text{PM}_{2,5}$  για να χαρακτηριστούν τα σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 10 και 2,5  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα. Σχηματικά η συνολική κατηγοριοποίηση κατά μέγεθος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7, ενώ στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται μια διάκριση διαφόρων σωματιδίων κατά μέγεθος και φυσική κατάσταση. Στην υπό μελέτη ρευστομηχανική κλίνη πραγματοποιούνται

μετρήσεις σωματιδίων  $PM_{10}$ . Με βάση τη φυσική τους κατάσταση τα εκπεμπόμενα σωματίδια θεωρούνται σωματίδια αιθάλης.



Σχήμα 2.7 – Κατηγοριοποίηση σωματιδίων κατά μέγεθος

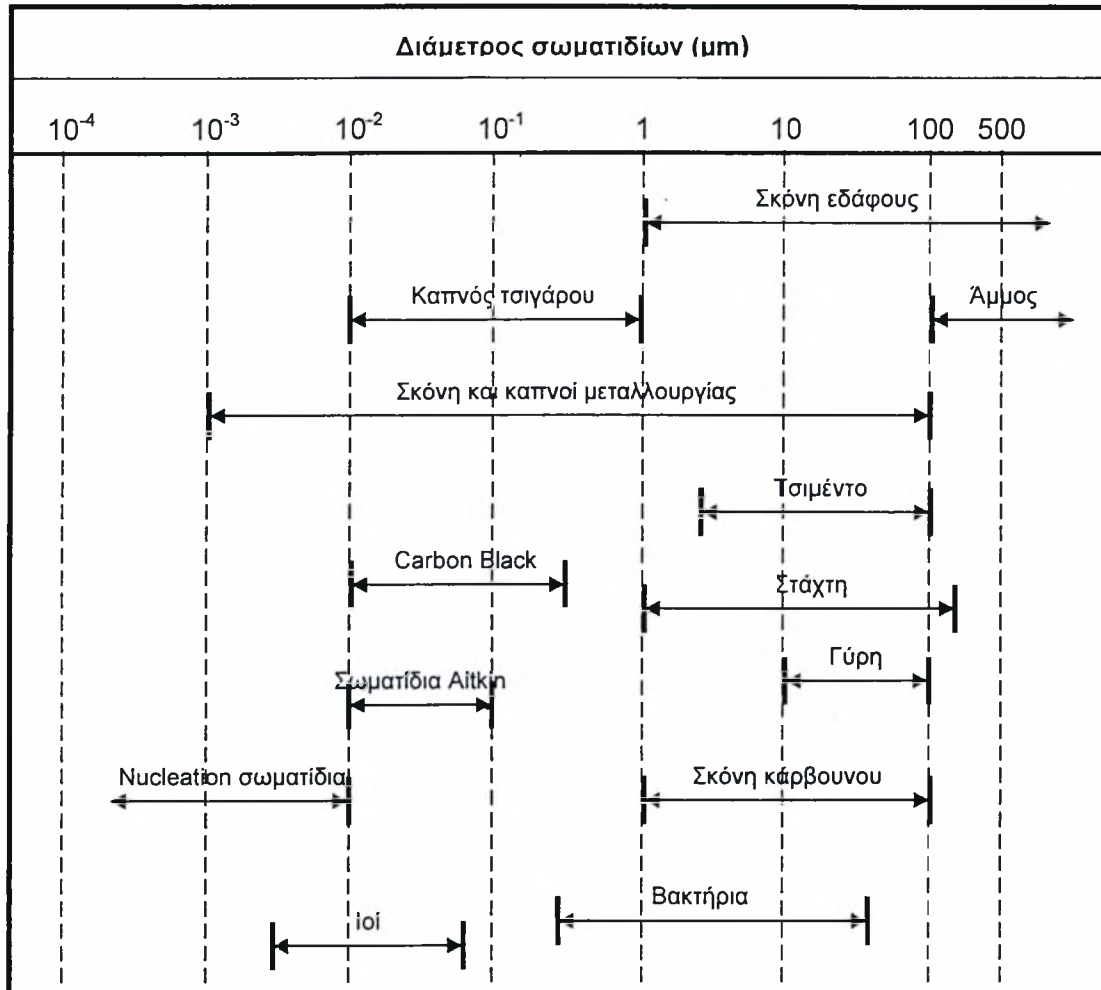
#### 2.2.4.4 Χημική κατάσταση

Μια περαιτέρω διάκριση γίνεται με βάση την τροποποίηση της χημικής τους σύστασης και κατάστασης. Έτσι, η σωματιδιακή ύλη διακρίνεται σε:

- Πρωτεύοντα σωματίδια.
- Δευτερεύοντα σωματίδια.

Τα πρωτεύοντα σωματίδια εισάγονται άμεσα στην ατμόσφαιρα και παραμένουν μετά την εκπομπή τους στην ίδια χημική κατάσταση ενώ τα δευτερεύοντα διαμορφώνονται από χημικές αντιδράσεις μεταξύ των πρωτευόντων σωματιδίων και άλλων στοιχείων της ατμόσφαιρας.

Τα πρωτεύοντα χονδροειδή σωματίδια παράγονται κυρίως από μηχανικές διεργασίες και αποτελούνται από σωματίδια που μεταφέρονται μέσω του ανέμου, από σκόνη που παράγουν τα οχήματα και σωματίδια που παράγονται κατά την καύση όπως η τέφρα και η αιθάλη. Τα πρωτεύοντα λεπτά σωματίδια εκπέμπονται από τις πηγές είτε άμεσα ως σωματίδια είτε ως ατμοί που συμπυκνώνονται γρήγορα. Αποτελούνται κυρίως από αιθάλη από τους κινητήρες diesel, από μια μεγάλη ποικιλία οργανικών ενώσεων και στοιχεία όπως As, Se, Zn. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα εκπεμπόμενα σωματίδια στην υπό μελέτη εγκατάσταση ρευστομηχανικής κλίνης.



Σχήμα 2.8 – Διάκριση σωματιδίων κατά μέγεθος και φυσική κατάσταση

Η δευτερεύουσα σωματιδιακή ύλη παράγεται συνήθως από χημικές αντιδράσεις μεταξύ πρωτεύουσας σωματιδιακής ύλης και ελεύθερων ή προσροφημένων αερίων. Οι διαδικασίες σχηματισμού μπορούν να οδηγήσουν είτε στο σχηματισμό νέων σωματιδίων είτε στην προσρόφηση σωματιδιακής ύλης στα προϋπάρχοντα σωματίδια. Το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων θειικών και νιτρικών αλάτων διαμορφώνονται από χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα. Ο σχηματισμός δευτερεύουσας σωματιδιακής ύλης εξαρτάται από πολυάριθμους παράγοντες συμπεριλαμβανομένων της συγκέντρωσης των πρωτευόντων σωματιδίων, της συγκέντρωσης άλλων αερίων δραστικών ουσιών όπως το όζον, το υδροξύλιο και οι ρίζες, των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία). Για παράδειγμα, όταν αντιδρά το όζον με τις ακόρεστες πτητικές οργανικές ενώσεις, παράγονται νέες ενώσεις οι οποίες είτε κατακάθονται στα υπάρχοντα σωματίδια είτε δημιουργούν νέα, διαμορφώνοντας έτσι δευτερεύουσα σωματιδιακή ύλη.



### 2.2.5 Αιώρηση της σωματιδιακής ύλης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο που η σωματιδιακή ύλη παραμένει αιωρούμενη στο περιβάλλον είναι:

- Υγρασία του αέρα.
- Θερμοκρασία του αέρα.
- Ταχύτητα και κατεύθυνση του αέρα.
- Μέγεθος και πυκνότητα των σωματιδίων.
- Ηλεκτροστατικό πεδίο.
- Σχηματισμός συσσωματωμάτων.

Τα σωματίδια απομακρύνονται από το περιβάλλον με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς:

- Βαρύτητα.
- Επαφή με τη γήινη επιφάνεια.
- Απόπλυση.

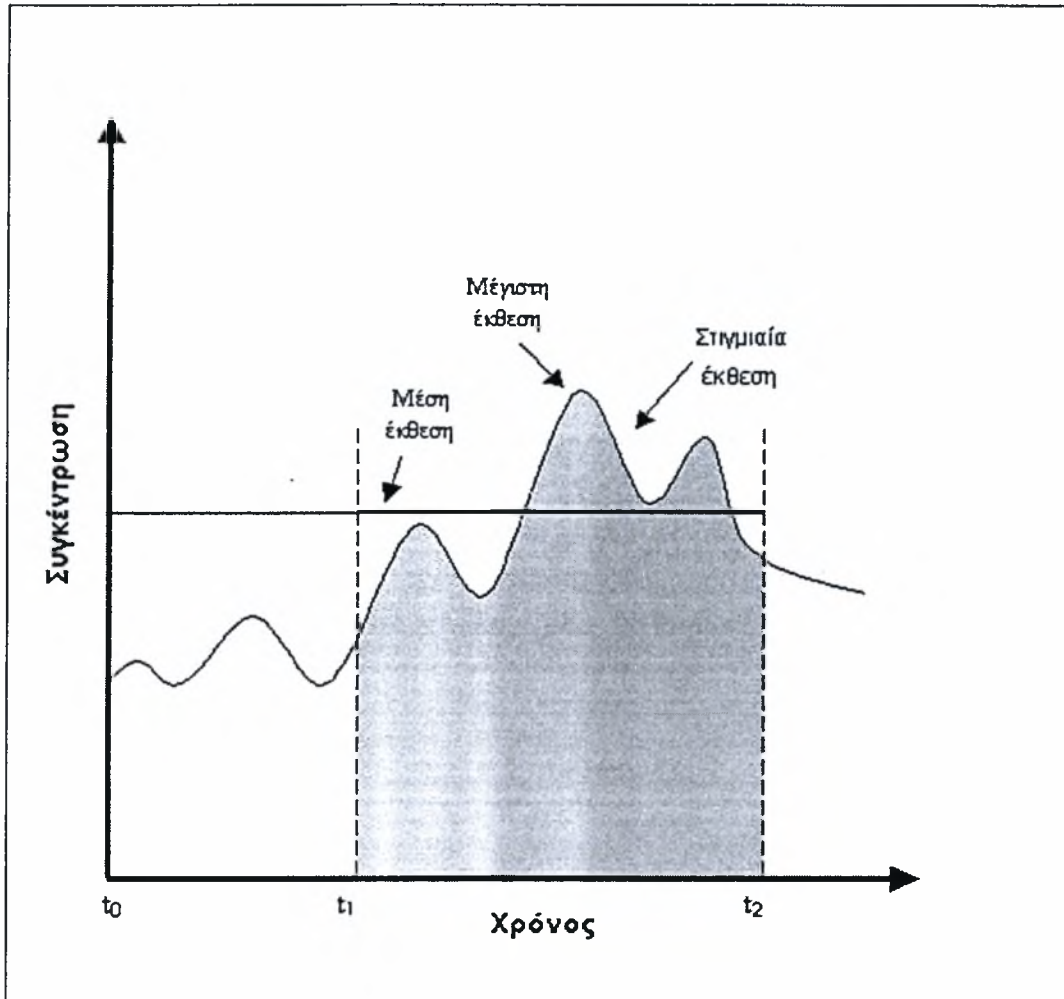
Ο κυριότερος μηχανισμός κατακάθισης της σωματιδιακής ύλης μεγάλου μεγέθους είναι η βαρύτητα η οποία εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του σωματιδίου όπως αυτό εκφράζεται με την ισοδύναμη διάμετρο. Η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων είναι πολύ μικρή, έτσι για παράδειγμα ένα σωματίδιο διαμέτρου 1  $\mu\text{m}$  έχει ταχύτητα καθίζησης περίπου 1  $\text{cm} / \text{sec}$  σε ιδανικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Εξαιτίας όμως του τυρβώδους ροϊκού πεδίου της γήινης ατμόσφαιρας τα σωματίδια που είναι μικρότερα από 20  $\mu\text{m}$  σπάνια καθιζάνουν λόγω βαρύτητας. Ο δεύτερος μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η επαφή με τη γήινη επιφάνεια. Πολλά σωματίδια όταν έρχονται σε επαφή με τη βλάστηση ή με επιφανειακά νερά προσροφούνται και καθιζάνουν. Τέλος, ο τρίτος σημαντικός μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η απόπλυση. Η βροχή παρασέρνει τα σωματίδια τα οποία εγκλωβίζονται στις σταγόνες και έτσι καθιζάνουν στην γήινη επιφάνεια.

### 2.2.6 Σωματιδιακή ύλη και ανθρώπινος οργανισμός

#### 2.2.6.1 Έκθεση σε χημικό παράγοντα

Ο προσδιορισμός της τιμής έκθεσης με εισπνοή σε σωματιδιακή ύλη πραγματοποιείται με μέτρηση της συγκέντρωσης του ρύπου στη ζώνη αναπνοής του ατόμου από ατομική μετρητική διάταξη καθώς αυτό κινείται στο χώρο. Ως ζώνη αναπνοής ορίζεται ένα ημισφαίριο ακτίνας 300  $\text{mm}$  που εκτείνεται μπροστά από το πρόσωπο του ατόμου. Κέντρο του ημισφαιρίου θεωρείται το μέσο της νοητής ευθείας που ενώνει τα αυτιά. Οι σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών ποσοτήτων έκθεσης

μπορούν εύκολα να φανούν στο υποθετικό χρονικό διάγραμμα έκθεσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Η μέγιστη, η στιγμιαία και η μέση έκθεση έχουν μονάδες συγκέντρωσης που συνήθως για σωματιδιακή ύλη είναι  $mg / m^3$ , ενώ η συνολική έκθεση μονάδες συγκέντρωσης επί χρόνο.



Σχήμα 2.9 – Χρονικό διάγραμμα έκθεσης

Η συνολική έκθεση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$E(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} C_s(t) dt \quad \text{Εξ. (2.38)}$$

όπου,  $E(t_1, t_2)$  είναι η συνολική έκθεση κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος από  $t_1$  έως  $t_2$  και  $C_s$  είναι η στιγμιαία έκθεση του ατόμου καθώς κινείται στο χώρο και το χρόνο.

Η μέση έκθεση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

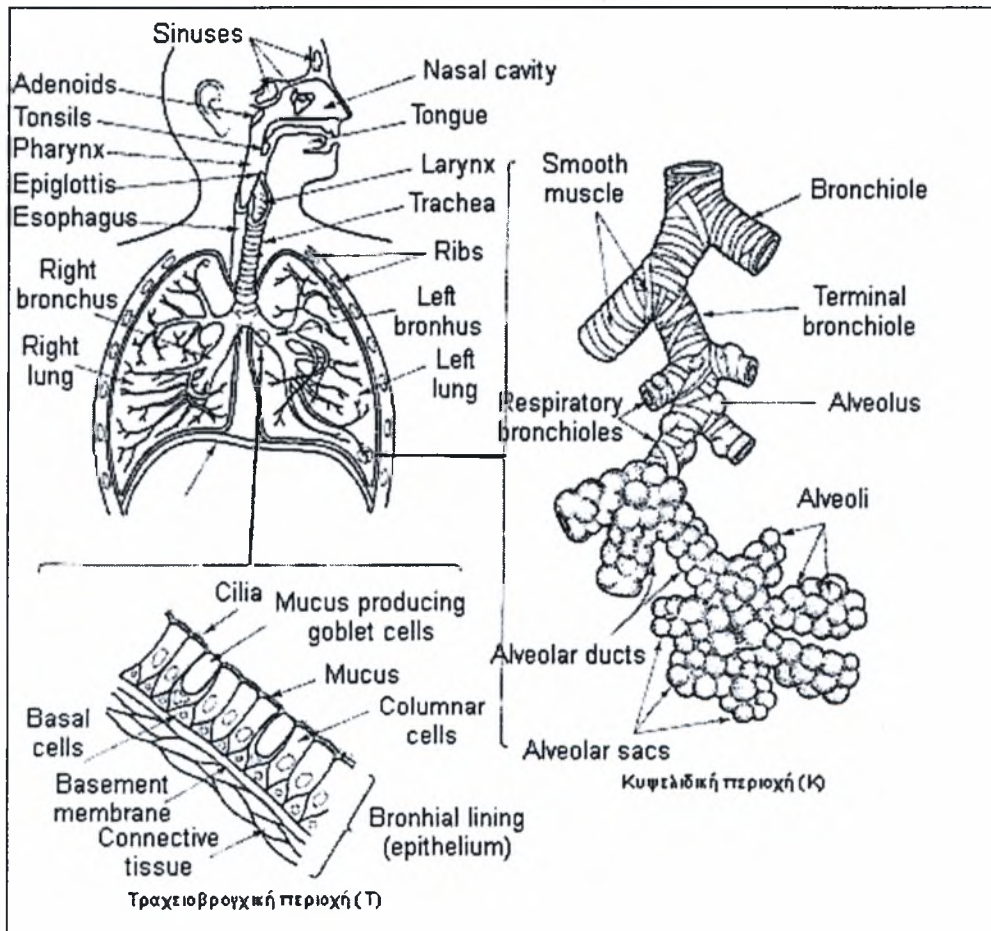
$$\varepsilon(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} C_s(t) dt \quad \text{Εξ. (2.39)}$$

όπου,  $\varepsilon(t_1, t_2)$  είναι η μέση έκθεση στο χρονικό διάστημα από  $t_1$  έως  $t_2$ .

### 2.2.6.2 Δομή αναπνευστικού συστήματος

Το αναπνευστικό σύστημα μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις περιοχές όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10:

- Εξωθωρακική (Ε).
- Τραχειοβρογχική (Τ).
- Κυψελιδική (Κ).



Σχήμα 2.10 – Δομή αναπνευστικού συστήματος

Η εξωθωρακική περιοχή (Ε) αποτελείται από τους ανώτερους αεραγωγούς δηλαδή τις ρινικές και στοματικές κοιλότητες και περιλαμβάνει τις περιοχές διαμέσου των οποίων περνάει πρώτα ο εισπνεύσιμος αέρας. Από την εξωθωρακική περιοχή ο

εισπνεύσιμος αέρας εισέρχεται στην τραχειοβρογχική περιοχή (Τ) στην τραχεία. Από το επίπεδο της τραχείας, οι ανώτεροι αεραγωγοί διακλαδίζονται σε πολλαπλούς μικρότερους αγωγούς. Το τελικό βρογχιόλιο είναι το πιο απομακρυσμένο σημείο των περιφερικών αεραγωγών και οδηγεί στην περιοχή εισπνοής – εκπνοής η οποία αποτελείται από τα αναπνευστικά βρογχιόλια, τους κυψελιδικούς αεραγωγούς, τους κυψελιδικούς θύλακες και τις κυψελίδες που συνθέτουν την κυψελιδική περιοχή (Κ). Πρέπει να σημειωθεί ότι το αναπνευστικό σύστημα αποτελείται από διάφορους τύπους κυττάρων και ότι υπάρχουν ευδιάκριτες διαφορές στις επιφάνειες των τριών περιοχών (Ε, Τ και Κ) από τις οποίες αποτελείται. Η λεπτομερειακή ανάλυση του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος είναι πέρα από τους σκοπούς αυτής της εργασίας, περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν σε εξειδικευμένες πηγές (Crystal et al., 1997).

### 2.2.6.3 Μηχανισμοί εναπόθεσης

Η σωματιδιακή ύλη ως αέριος ρύπος επηρεάζει κυρίως το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Τα εισπνεόμενα σωματίδια κατακάθονται στην αναπνευστική οδό και τους πνεύμονες με πέντε διαφορετικούς μηχανισμούς εναπόθεσης:

- Πρόσκρουση λόγω αδράνειας.
- Ιζηματοπόθεση λόγω βαρύτητας.
- Διάχυση.
- Ηλεκτροστατική εναπόθεση.
- Ανάσχεση.

Η πρόσκρουση λόγω αδράνειας αποτελεί σημαντικό μηχανισμό εναπόθεσης για σωματίδια με ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 2 μm. Εξαιτίας των ξαφνικών αλλαγών στην κατεύθυνση και την ταχύτητα του εισπνεόμενου αέρα, ορισμένα σωματίδια αποτυγχάνουν να ακολουθήσουν τη ροή με αποτέλεσμα να έρχονται σε επαφή – πρόσκρουση – με την επιφάνεια των αεραγωγών. Οι αεραγωγοί της εξωθωρακικής και ανώτερης τραχειοβρογχικής περιοχής χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες αέρα και απότομες αλλαγές της διεύθυνσής του. Επομένως, αποτελούν τις περιοχές της κύριας εναπόθεσης με το μηχανισμό της πρόσκρουσης λόγω αδράνειας.

Όλα τα σωματίδια επηρεάζονται από τη βαρύτητα, αλλά μόνο στη σωματιδιακή ύλη με ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 1 μm αυτή η επίδραση μπορεί να οδηγήσει σε εναπόθεση. Ο μηχανισμός της ιζηματοπόθεσης λόγω βαρύτητας δρα στην εξωθωρακική και τραχειοβρογχική περιοχή και κυρίως στους μικρότερους αεραγωγούς.

Η ηλεκτροστατική εναπόθεση είναι ένας μηχανισμός που σχετίζεται με το ηλεκτρικό φορτίο των σωματιδίων. Τα σωματίδια συνήθως έχουν κάποιο ελάχιστο φορτίο εξαιτίας της τυχαίας σύγκρουσής τους με τα ιόντα του αέρα. Αυτό το ηλεκτρικό φορτίο ενισχύει την εναπόθεση συγκριτικά με τα αφόρτιστα σωματίδια. Βέβαια ο μηχανισμός της ηλεκτροστατικής εναπόθεσης έχει μικρή σχετικά επίδραση στη διαδικασία σε σχέση με τους άλλους μηχανισμούς.

Στα σωματίδια με ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 1 μm δρα κυρίως ο μηχανισμός εναπόθεσης λόγω διάχυσης εξαιτίας της έντονης ανάμιξής τους με τα μόρια του εισπνεόμενου αέρα. Τέλος, η ανάσχεση οφείλεται στη φυσική επαφή των σωματιδίων με τις επιφάνειες των αεραγωγών και εξαρτάται από το μέγεθος της σωματιδιακής ύλης.

#### 2.2.6.4 Επίδραση των σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία

Τα σωματίδια με μέγεθος 10 μm ή μεγαλύτερο τείνουν να συγκρατηθούν στη μύτη, στην τραχεία και τις βρογχικές περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Στη συνέχεια μπορούν να απομακρυνθούν με το βήχα ή το φτάρνισμα. Τα μικρότερα σωματίδια που δεν συγκρατούνται και καταλήγουν στο τραχειοβρογχικό σύστημα μπορούν να κατακρατηθούν από τη βλέννα και να απομακρυνθούν με την κατάποση, την απόπτωση ή να απορροφηθούν μέσω του αίματος από τον ανθρώπινο οργανισμό. Εντούτοις, σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 10 μm, συχνά καταφέρνουν να διαπεράσουν τους καμπύλους και πολύπλοκους αγωγούς του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος χωρίς να κατακρατηθούν από τη βλεννώδη επένδυσή τους και καταλήγουν στους πνεύμονες. Ανάλογα με το μέγεθός τους, ορισμένα σωματίδια τείνουν να ακολουθήσουν το ρεύμα του εκπνεόμενου αέρα και εξέρχονται από τον ανθρώπινο οργανισμό ενώ άλλα παραμένουν στην πνευμονική περιοχή όπου κατακρατούνται από τις μικροσκοπικές κυψελίδες των πνευμόνων.

Τα τελευταία χρόνια, η έκθεση στα λεπτά και εξαιρετικά λεπτά σωματίδια έχει προσδιοριστεί ως σημαντικός παράγοντας που έχει επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας – Π.Ο.Υ (World Health Organization, WHO) από το 1997 έχει αναθεωρήσει τα μέχρι τότε δεδομένα για τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία της σωματιδιακής ύλης. Η έκθεση της WHO κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι παρατηρούμενες επιπτώσεις συνδέονται κυρίως με τα λεπτά σωματίδια και όχι με τα χονδροειδή. Αυτή η έκθεση πρόσθεσε ότι οι μελλοντικοί κανονισμοί και διαδικασίες ελέγχου πρέπει να δώσουν έμφαση στις κατηγορίες των λεπτών και των εξαιρετικά λεπτών σωματιδίων. Τέλος, η έκθεση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των επιπτώσεων στην υγεία και του επιπέδου έκθεσης καθημερινά (σε μέσο όρο) σε σωματιδιακή ύλη.

Αν και οι πνεύμονες είναι το σημαντικότερο ανθρώπινο όργανο που επηρεάζεται από την εισπνοή σωματιδιακής ύλης, σήμερα υπάρχουν πολλά τοξικολογικά και επιδημιολογικά στοιχεία ότι το καρδιαγγειακό σύστημα επηρεάζεται επίσης σε μεγάλο βαθμό άμεσα ή έμμεσα. Η κατανόηση των μηχανισμών που η σωματιδιακή ύλη προκαλεί προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία παραμένει σημαντικός στόχος. Αυτή τη στιγμή, δεν υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες πληροφορίες για να εξηγήσουν τους μηχανισμούς επίδρασης. Εντούτοις, υπάρχουν κάποια τοξικολογικά στοιχεία που οδηγούν τους επιστήμονες να συνδέσουν τις επιπτώσεις στην υγεία με τον αριθμό των εισπνεόμενων σωματιδίων ή τη φύση των ουσιών που προσροφούνται στην επιφάνειά τους (τοξικές, δραστικές). Οι υποθετικοί μηχανισμοί απαιτούν σημαντική έρευνα κυρίως σε κλινικό και τοξικολογικό επίπεδο για να αποδειχθούν.

Οι σημαντικότερες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό αναφέρονται παρακάτω και αφορούν τους πνεύμονες και το καρδιαγγειακό σύστημα άμεσα ή έμμεσα εξαιτίας των παθήσεων του αναπνευστικού. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένας σημαντικός αριθμός ερευνών πραγματοποιείται για την επίδραση στην ανθρώπινη υγεία ουσιών που θεωρούνται τοξικές ή καρκινογενείς και είναι δυνατόν να προσροφηθούν στη σωματιδιακή ύλη, να εγκλωβιστούν στους πνεύμονες και επομένως να προκαλέσουν σημαντικότερα προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία.

➤ Πνεύμονες:

- + Προκαλεί τραυματισμό των πνευμόνων και δημιουργεί φλεγμονές.
- + Προκαλεί αυξημένη ευαισθησία σε λοιμώξεις του αναπνευστικού.
- + Επιδεινώνει το άσθμα.

➤ Καρδιαγγειακό σύστημα – Έμμεσα:

- + Ο τραυματισμός των πνευμόνων προκαλεί μειωμένη οξυγόνωση και επομένως αυξανόμενη λειτουργία της αναπνοής που έχει επιπτώσεις στην καρδιά.
- + Οι φλεγμονές στους πνεύμονες αυξάνουν την παραγωγή κυτοκίνης που προκαλεί δυσμενή συστηματικά αιμοδυναμικά αποτελέσματα.
- + Οι φλεγμονές στους πνεύμονες αυξάνουν την πηκτικότητα του αίματος αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα καρδιακών προσβολών.
- + Η αλληλεπίδραση της σωματιδιακής ύλης με τους πνεύμονες επηρεάζει την αιμοποίηση.

➤ Καρδιαγγειακό σύστημα – Άμεσα:

- + Απορροφάται από το κυκλοφορικό σύστημα ή απελευθερώνει άλλες διαλυτές ουσίες στο αίμα.
- + Επηρεάζει τον αυτόνομο έλεγχο της καρδιάς και του καρδιαγγειακού συστήματος.

### 2.2.7 Έλεγχος ρύπανσης από σωματιδιακή ύλη

Οι πρόσφατες κλινικές και τοξικολογικές μελέτες για την επίδραση της σωματιδιακής ύλης στην ανθρώπινη υγεία έχουν καταστήσει επιτακτική ανάγκη τον έλεγχο της εκπομπής σωματιδίων από τις ανθρωπογενείς πηγές και την χρήση κατάλληλων συστημάτων για την κατακράτησή τους. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται και θα αναφερθούν παρακάτω εφαρμόζονται κυρίως στη βιομηχανία, στον καθαρισμό των καυσαερίων, καθώς επίσης στις εξατμίσεις των αυτοκινήτων όπως τα φίλτρα αιθάλης. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος κατακράτησης της σωματιδιακής ύλης καθορίζεται από πολλούς παράγοντες όπως η διάμετρος των σωματιδίων, οι φυσικοχημικές τους ιδιότητες και η παρουσία άλλων τοξικών αερίων όπως  $SO_2$ ,  $NO_x$ , HF. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την κατακράτηση των σωματιδίων μπορούν να χωρισθούν στις παρακάτω πέντε κατηγορίες:

- Μέθοδοι βαρύτητας – θάλαμοι βαρύτητας ( $d > 50 \mu m$ ).
- Μέθοδοι φυγοκεντρικού διαχωρισμού – κυκλώνες ( $d > 1 \mu m$ ).
- Μέθοδοι υγρής δέσμευσης – πύργοι έκπλυσης ή ψεκασμού ( $d > 0,05 \mu m$ ).
- Μέθοδοι διήθησης (φιλτραρίσματος) – σακκόφιλτρα ( $d > 0,01 \mu m$ ).
- Μέθοδοι ηλεκτροστατικής καθίζησης – ηλεκτροστατικά φίλτρα ( $d > 0,005 \mu m$ ).

Στις παρενθέσεις δίνεται η διάμετρος των σωματιδίων μέχρι την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κάθε μέθοδος. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται σε σειρά δυο διαφορετικές τεχνικές.

#### 2.2.7.1 Θάλαμοι βαρύτητας

Είναι η απλούστερη τεχνική κατακράτησης σωματιδιακής ύλης. Οι θάλαμοι βαρύτητας αποτελούνται από ένα μεγάλο θάλαμο μέσα στον οποίο, όταν εισέρχονται τα σωματίδια, ελαττώνεται απότομα η ταχύτητά τους με αποτέλεσμα την κατακάθισή τους με την επίδραση της βαρύτητας. Η αποτελεσματικότητα του θαλάμου βαρύτητας αυξάνει όταν προσθέσουμε μέσα σ' αυτόν κατάλληλα εμπόδια (ανακλαστήρες) έτσι ώστε να αυξηθεί η διαδρομή των αερίων μέσα στο θάλαμο και να ελαττωθεί η απόσταση που έχουν να διανύσουν τα σωματίδια μέχρι να κατακαθίσουν. Σαν τεχνική είναι πολύ απλή και έχει χαμηλό κόστος κατασκευής.

#### 2.2.7.2 Κυκλώνες

Οι κυκλώνες θεωρούνται τα πιο διαδεδομένα συστήματα κατακράτησης σωματιδίων. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην ανάπτυξη φυγοκεντρικών δυνάμεων στα σωματίδια ώστε να απομακρυνθούν από το μέσο μεταφοράς τους. Οι κυκλώνες στην απλοποιημένη τους μορφή αποτελούνται από ένα κύλινδρο στο επάνω μέρος

και ένα κωνικό δοχείο από κάτω. Η σωματιδιακή ύλη εισέρχεται εφαπτομενικά στο επάνω μέρος της συσκευής και κινείται προς τα κάτω δημιουργώντας ένα σπειροειδές ρεύμα. Όταν το ρεύμα εισέλθει στο κωνικό μέρος της συσκευής, αλλάζει κατεύθυνση και σχηματίζεται ένα δεύτερο σπειροειδές ρεύμα στο εσωτερικό του πρώτου. Το ρεύμα αυτό οδηγείται προς το πάνω μέρος της συσκευής και τελικά εξέρχεται απ' αυτή. Στο διάστημα αυτό τα σωματίδια αποκτούν φυγόκεντρες δυνάμεις προς τα τοιχώματα της συσκευής, αποχωρίζονται από το μέσο που τα μεταφέρει και τελικά συλλέγονται στο κάτω μέρος.

### 2.2.7.3 Πύργοι έκπλυσης ή ψεκασμού

Μια ακόμη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την κατακράτηση σωματιδιακής ύλης είναι και οι πύργοι έκπλυσης ή ψεκασμού. Στη διεθνή βιβλιογραφία η τεχνική είναι γνωστή σαν "wet scrubbing" και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται ονομάζονται "wet scrubbers". Μια απλή κατασκευή αποτελείται από ένα πύργο άδειο ή γεμάτο με κατάλληλο πληρωτικό υλικό. Από την κορυφή του πύργου ψεκάζεται το κατάλληλο υγρό (κατά κανόνα νερό) ενώ από το κάτω μέρος του πύργου εισάγονται τα καυσαέρια. Με την επαφή των δυο φάσεων τα σωματίδια μεταφέρονται από την αέρια στην υγρή φάση. Έτσι, τα καυσαέρια βγαίνουν καθαρά στην ατμόσφαιρα, ενώ η υγρή φάση που βγαίνει από το κάτω μέρος του πύργου συγκεντρώνεται σε ειδικούς χώρους. Η μεταφορά των σωματιδίων από την αέρια στην υγρή φάση επιτελείται με πολλούς μηχανισμούς όπως η κατακάθιση λόγω βαρύτητας, η πρόσκρουση λόγω αδράνειας, η ανάσχεση, η διάχυση, η ηλεκτροστατική καθίζηση, η συμπύκνωση πάνω στα σωματίδια και η διάλυση.

### 2.2.7.4 Σακκόφιλτρα\*

Μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των καυσαερίων από τα σωματίδια είναι τα σακκόφιλτρα. Παλαιότερα η εφαρμογή τους ήταν περιορισμένη κυρίως σε μικρές εγκαταστάσεις. Η εφαρμογή νέων ανθεκτικών υλικών, κυρίως από συνθετικές ίνες, επέτρεψε την εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα για το καθάρισμα των φίλτρων, που ήταν ένα από τα βασικά τους προβλήματα. Έτσι σήμερα τα σακκόφιλτρα βρίσκουν σημαντική εφαρμογή ακόμη και σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. Η αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται η συλλογή των σωματιδίων από τα σακκόφιλτρα είναι απλή. Τα καυσαέρια αναγκάζονται να περάσουν μέσα από ένα φίλτρο (από ύφασμα ή από άλλο υλικό), που συγκρατεί τη σκόνη και αφήνει να

---

\* Η υπό μελέτη εγκατάσταση χρησιμοποιεί σακκόφιλτρα για τον περιορισμό της σωματιδιακής ρύπανσης



περάσουν τα αέρια. Πάνω στο φίλτρο σχηματίζεται ένα στρώμα σκόνης, που στη συνέχεια επενεργεί κι αυτό σαν φίλτρο για παραπέρα συλλογή σωματιδίων μικρότερης διαμέτρου, όπως γενικά συμβαίνει στη διήθηση. Με την πάροδο του χρόνου το στρώμα σκόνης αυξάνει σημαντικά και δημιουργεί προβλήματα στη διόδο των αερίων. Έτσι λοιπόν πρέπει μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα η σκόνη που συγκεντρώνεται στα φίλτρα να απομακρύνεται.

Οι μηχανισμοί που συμμετέχουν στην κατακράτηση των σωματιδίων στα σακκόφιλτρα απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 2.11 και είναι:

➤ Κατακάθιση λόγω βαρύτητας (gravitational settling).

Τα σωματίδια λόγω του βάρους δεν ακολουθούν τις ρευστοδυναμικές γραμμές, αλλά κατακάθονται στις ίνες του φίλτρου.

➤ Πρόσκρουση λόγω αδράνειας (inertial impaction).

Τα σωματίδια λόγω της αδράνειας που έχουν δεν ακολουθούν τις ρευστοδυναμικές γραμμές γύρω από την ίνα, αλλά προσκρούουν σ' αυτή και συγκρατούνται. Ο μηχανισμός αυτός εμφανίζεται για σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη του 1 μm.

➤ Ανάσχεση (interception).

Ο μηχανισμός αυτός αναφέρεται στα σωματίδια που κινούνται ανάμεσα στις ίνες και στις ρευστοδυναμικές γραμμές. Όταν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη από τη διάμετρο των σωματιδίων, αυτά παρεμποδίζονται, δεν μπορούν να ακολουθήσουν το ρεύμα των αερίων και κατακρατούνται στις ίνες του φίλτρου.

➤ Ηλεκτροστατική καθίζηση (electrostatic precipitation).

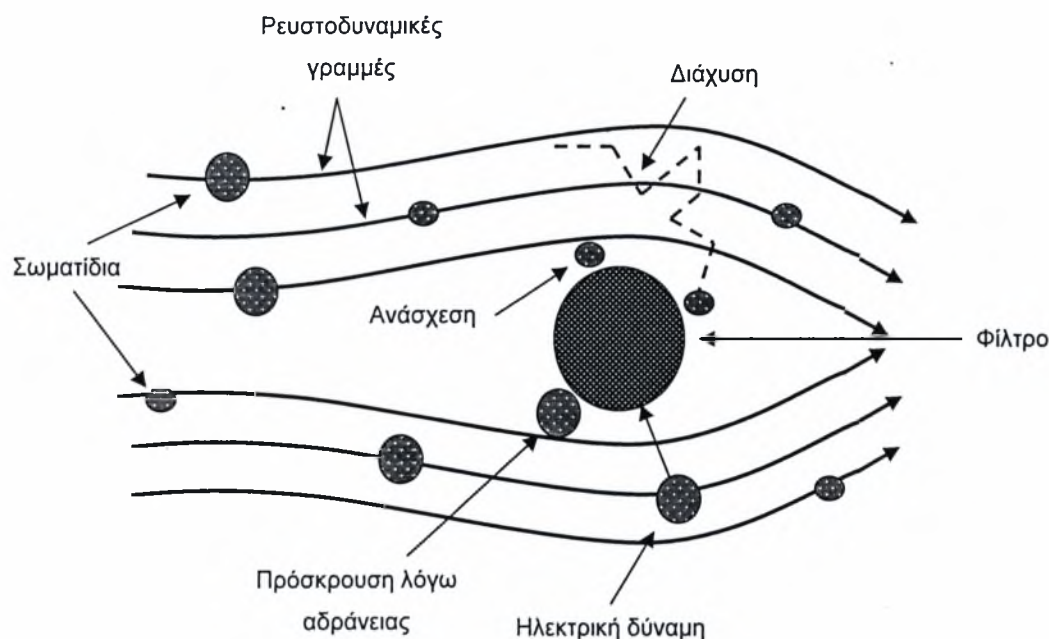
Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν αντίθετα ηλεκτρικά φορτία στα σωματίδια και στις ίνες του φίλτρου. Έτσι τα σωματίδια έλκονται από τις ίνες και συγκρατούνται.

➤ Διάχυση (diffusion).

Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0,5 μm φεύγουν από τις ρευστοδυναμικές γραμμές, επειδή υπόκεινται στην κίνηση Brown. Έτσι στην ακανόνιστη κίνηση τους είναι δυνατό να πέσουν πάνω στις ίνες και να συγκρατηθούν. Ο μηχανισμός αυτός συμμετέχει σε μεγάλο ποσοστό όταν το μέγεθος των σωματιδίων γίνει μικρότερο του 0,1 μm.

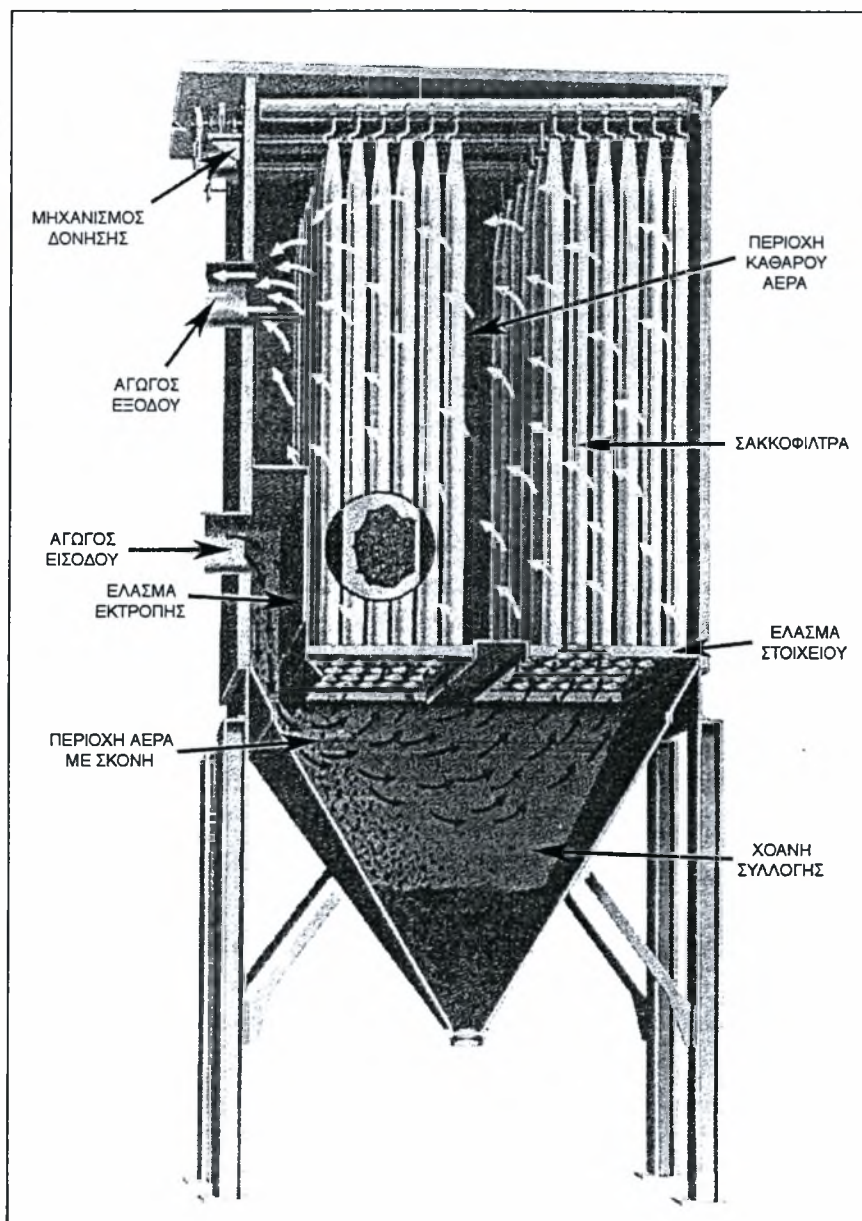
Υπάρχουν πολλοί τύποι σακκόφιλτρων. Οι κατασκευαστικές και λειτουργικές τους διαφορές αναφέρονται κυρίως στα υλικά κατασκευής τους και στον τρόπο με τον οποίο γίνεται το περιοδικό τίναγμα (απομάκρυνση) της σκόνης. Συνολικά χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί καθαρισμού των φίλτρων που ορίζουν τρία διαφορετικά είδη σακκόφιλτρων. Στο πρώτο είδος, ο καθαρισμός των φίλτρων από τη σκόνη γίνεται με αντίστροφη εισαγωγή πεπιεσμένου αέρα. Τα

σακκόφιλτρα αυτά είναι γνωστά σαν “Pulse Jet” και θεωρούνται ότι έχουν τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και ταχύτητα στο τίναγμα της σκόνης. Στο δεύτερο είδος, ο καθαρισμός των σακκόφιλτρων γίνεται με αντιστροφή του ρεύματος των καυσαερίων. Ο τύπος αυτός είναι γνωστός σαν “Reverse flow”. Τέλος, ο τρίτος τρόπος που χρησιμοποιείται για το καθάρισμα των φίλτρων από τη σκόνη που συγκεντρώνεται σ' αυτά είναι αυτός που πετυχαίνεται τόσο με περιοδικά κτυπήματα όσο και με δονήσεις με τη χρήση μηχανικού δονητή για το τίναγμα της σκόνης.



Σχήμα 2.11 – Μηχανισμοί κατακράτησης σωματιδίων στα σακκόφιλτρα

Το υλικό που επιλέγεται για την κατασκευή των σακκόφιλτρων καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των καυσαερίων, όπως θερμοκρασία, όξινος ή βασικός χαρακτήρας αυτών, παροχή. Τα υφάσματα από φυσικές ίνες (βαμβάκι, μαλλί), που παλαιότερα είχαν μεγάλη εφαρμογή, έχουν σήμερα αντικατασταθεί από συνθετικά, όπως ακρυλικά, πολυεστέρα, νάιλον, ίνες ύαλου. Ένας παράγοντας που καθορίζει την απόδοση των σακκόφιλτρων και επομένως το σχεδιασμό και την κατασκευή τους είναι τα ηλεκτρικά φορτία, που δημιουργούνται τόσο στα σωματίδια όσο και στις ίνες του φίλτρου. Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται επηρεάζουν (ιδιαίτερα για σωματίδια μικρότερα των 3  $\mu\text{m}$ ) τόσο τη συγκράτηση της σκόνης όσο και μετέπειτα την απομάκρυνση της σκόνης από τα φίλτρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο στα φίλτρα για την αποτελεσματικότερη συγκράτηση των σωματιδίων. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται ένα σακκόφιλτρο με μηχανική δόνηση.

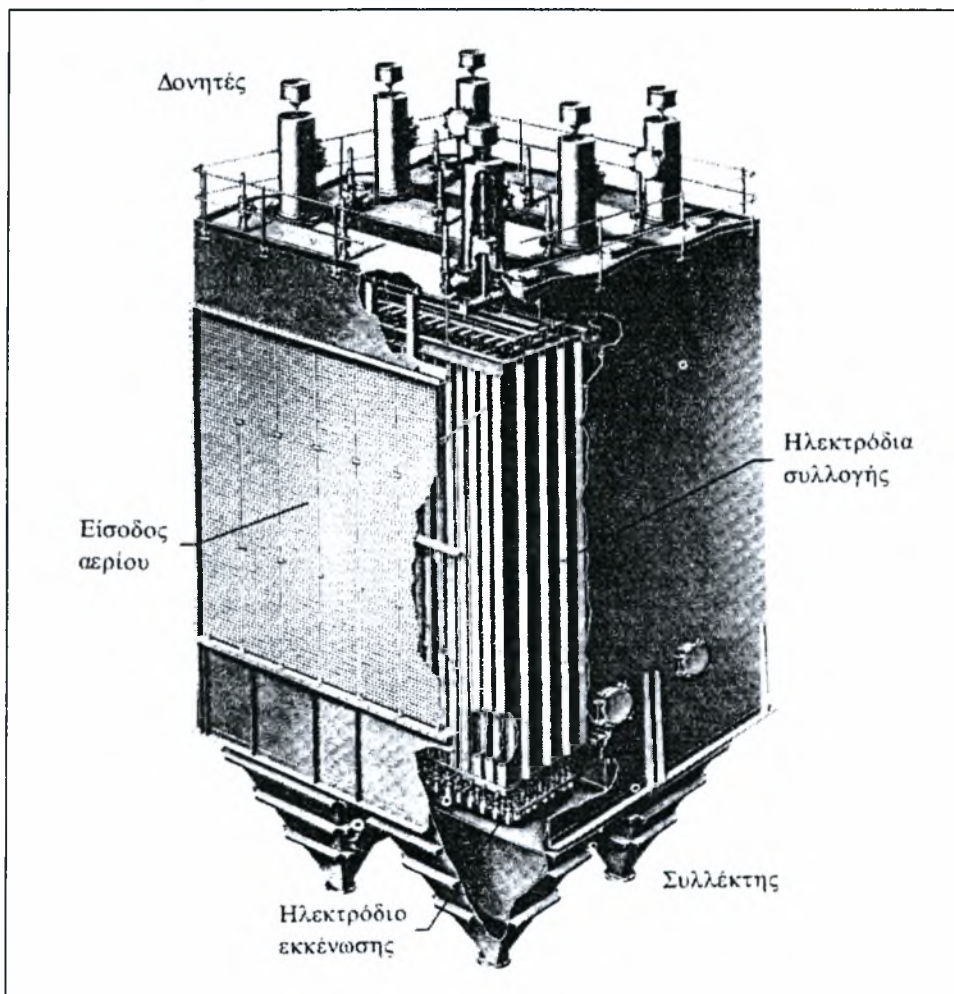


Σχήμα 2.12 – Σακκόφιλτρο με μηχανική δόνηση

### 2.2.7.5 Ηλεκτροστατικά φίλτρα

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα σε αντίθεση με τις άλλες τεχνικές κατακρατούν τα σωματίδια ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Θεωρούνται τα πιο αποτελεσματικά μέσα καθαρισμού καυσαερίων έχουν όμως μεγάλο κόστος κατασκευής και ιδιαίτερα λειτουργίας. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια. Το ένα ηλεκτρόδιο (το αρνητικό) είναι λεπτό, μικρής επιφάνειας και ονομάζεται ηλεκτρόδιο εκκένωσης. Το δεύτερο ηλεκτρόδιο (το θετικό) έχει μεγάλη επιφάνεια και ονομάζεται ηλεκτρόδιο συλλογής. Το σχήμα του έχει συνήθως τη μορφή πλάκας ή κυλίνδρου. Ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια αναπτύσσεται υψηλή τάση 20 – 40 KV. Όταν τα

καυσαέρια βρεθούν στο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο τα μόρια των αερίων ιονίζονται αρνητικά και με την επίδραση του πεδίου κινούνται προς το θετικό ηλεκτρόδιο συλλογής. Στη διαδρομή τους πολλά από αυτά προσκολλώνται στα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία και φορτίζονται αρνητικά. Τα φορτισμένα σωματίδια με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου οδηγούνται στο θετικό ηλεκτρόδιο συλλογής, όπου και προσκολλώνται. Στη συνέχεια αποφορτίζονται και απομακρύνονται από το ηλεκτρόδιο συλλογής με κατάλληλο τρόπο. Έτσι απομακρύνονται σχεδόν όλα τα σωματίδια ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Στο Σχήμα 2.13 απεικονίζεται ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο.



Σχήμα 2.13 – Ηλεκτροστατικό φίλτρο

## 2.3 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστούν διεξοδικά οι οριακές τιμές ρύπων στο περιβάλλον όπως αυτές ορίζονται με βάση την κοινοτική νομοθεσία αλλά και αυτήν στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής καθώς και η κείμενη νομοθεσία για την υγιεινή και ασφάλεια στους χώρους εργασίας.

### 2.3.1 Εισαγωγή

Στην Ελλάδα, η υγιεινή και ασφάλεια στους χώρους εργασίας είναι τομέας που από κρατικής πλευράς υπάγεται στις αρμοδιότητες του Υπουργείου Εργασίας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων. Η κείμενη νομοθεσία περιλαμβάνει μια σειρά νόμων και προεδρικών διαταγμάτων με τελευταία αναθεώρηση το Προεδρικό Διάταγμα 90/1999. Στην νομοθεσία αυτή ορίζονται διάφορες έννοιες ενώ επιπλέον καθορίζονται οι οριακές τιμές έκθεσης σε διάφορους χημικούς παράγοντες. Το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης με την κοινοτική οδηγία 1999/30/ΕΚ έχει θεσπίσει οριακές τιμές για την συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης στον αέρα του περιβάλλοντος. Αντίστοιχα, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Environmental Protection Agency (EPA) έχει θεσπίσει οριακές τιμές για τη συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης με αεροδυναμική διάμετρο 2,5 μm (PM<sub>2,5</sub>) και 10 μm (PM<sub>10</sub>) στον αέρα του περιβάλλοντος μέσω των National Ambient Air Quality Standards (NAAQS).

Είναι λογικό οι οριακές τιμές για την συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης στον αέρα του περιβάλλοντος να είναι πολύ πιο αυστηρές σε σχέση με τα όρια έκθεσης στους χώρους εργασίας αφού σε αυτούς περιλαμβάνονται και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Σχεδόν το σύνολο των επιδημιολογικών ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης σωματιδιακής ύλης στον ανθρώπινο οργανισμό λαμβάνουν υπ' όψιν την έκθεση του ανθρώπου σε περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή σε συγκεντρώσεις σωματιδίων μικρότερες από αυτές που είναι νομοθετικά αποδεκτές στους χώρους εργασίας.

### 2.3.2 Υγιεινή και ασφάλεια στους χώρους εργασίας

Η επαγγελματική ασφάλεια και υγεία, δηλαδή η πρόληψη των κινδύνων κατά την εργασία και η προστασία των εργαζομένων από εργατικά ατυχήματα και επαγγελματικές ασθένειες είναι τομέας που από κρατικής πλευράς υπάγεται στις

αρμοδιότητες του Υπουργείου Εργασίας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι αρμοδιότητες αυτές αφορούν στην νομοθεσία, στον έλεγχο εφαρμογής της νομοθεσίας, στην ενημέρωση και διάδοση της πληροφόρησης, στην έρευνα, στην οργάνωση και υποστήριξη των υπηρεσιών ελέγχου εφαρμογής. Οι παραπάνω αρμοδιότητες ασκούνται από:

- Τη Γενική Διεύθυνση Συνθηκών και Υγιεινής της Εργασίας που είναι η αρμόδια Γενική Διεύθυνση του Υπουργείου Εργασίας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων για την Επαγγελματική Ασφάλεια και Υγεία (ΕΥΑ) και αποτελείται από:
  - ✦ Τη Διεύθυνση Συνθηκών Εργασίας που προετοιμάζει τις νομοθετικές πράξεις, εισηγείται μέτρα προς την πολιτική ηγεσία, είναι υπεύθυνη για την ενημέρωση και τη διάδοση της πληροφόρησης και υποστηρίζει τις περιφερειακές υπηρεσίες.
  - ✦ Το Κέντρο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας (ΚΥΑΕ) που είναι κέντρο εφαρμοσμένης έρευνας με δυνατότητα μετρήσεων χημικών και φυσικών παραγόντων στους χώρους εργασίας καθώς και βιολογικών μετρήσεων των εργαζομένων. Παρέχει τεχνική υποστήριξη στους τεχνικούς επιθεωρητές των περιφερειακών υπηρεσιών. Έχει οριστεί εθνικός εστιακός πόλος του Ευρωπαϊκού Οργανισμού για την Υγεία & την Ασφάλεια της Εργασίας και του Ευρωπαϊκού δικτύου για την Προαγωγή της Υγείας στους χώρους Εργασίας.
  - ✦ Το Σώμα Επιθεωρητών Εργασίας (Σ.ΕΠ.Ε.).  
Συστάθηκε το καλοκαίρι του 1998. Μέχρι τότε και για την τελευταία πενταετία οι επιθεωρητές εργασίας υπάγονταν στις Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις της χώρας. Οι βασικές αρμοδιότητες των Τεχνικών και Υγειονομικών Επιθεωρητών Εργασίας είναι:
    - ❖ Οι επιθεωρήσεις και έλεγχοι των χώρων εργασίας καθώς και οι υποδείξεις για τη λήψη συγκεκριμένων μέτρων.
    - ❖ Η παροχή συμβουλών και πληροφοριών προς εργαζόμενους και εργοδότες.
    - ❖ Οι μετρήσεις της έντασης των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραγόντων.
    - ❖ Οι επιθεωρήσεις, έλεγχοι και υποδείξεις προς τους κατασκευαστές, παρασκευαστές, εισαγωγείς, και προμηθευτές μηχανημάτων, εργαλείων, εργασιακών μέσων.
    - ❖ Η διερεύνηση των αιτίων των εργατικών ατυχημάτων και των επαγγελματικών ασθενειών. Στις περιπτώσεις μη συμμόρφωσης των εργοδοτών, κατασκευαστών, παρασκευαστών, εισαγωγέων και

προμηθευτών μηχανημάτων, εργαλείων, εργασιακών μέσων προς τις υποδείξεις των επιθεωρητών, αυτοί κινούν άμεσα τη διαδικασία επιβολής των διοικητικών και ποινικών κυρώσεων που προβλέπονται στα άρθρα 24 και 25 του Ν. 2224/94.

### 2.3.2.1 Ελληνική νομοθεσία

Ο νόμος που καθορίζει το πλαίσιο για την “Υγιεινή και ασφάλεια των εργαζομένων” είναι ο 1568/1985. Αποτελείται από έξι κεφάλαια και συνολικά σαράντα άρθρα στα οποία ορίζονται τα θεσμικά όργανα που είναι υπεύθυνα για τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας, καθορίζονται οι κτιριολογικές απαιτήσεις, ρυθμίζονται κανόνες για την πρόληψη κινδύνου από μηχανές και από έκθεση σε φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς παράγοντες. Μία σειρά από προεδρικά διατάγματα που εκδόθηκαν μετά το 1985 αναθεωρούν ή αντικαθιστούν ορισμένες διατάξεις του ενώ με το ΠΔ 289/1986 επεκτείνεται η εφαρμογή του Ν. 1568/1985 στο πολιτικό προσωπικό των χώρων εργασίας που εποπτεύονται από το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας.

### 2.3.2.2 Προεδρικό Διάταγμα 307/1986

Το πρώτο προεδρικό διάταγμα στο οποίο γίνονται εννοιολογικοί προσδιορισμοί και θεσπίζονται οριακές τιμές χημικών παραγόντων είναι το Π.Δ 307/1986. Μεταγενέστερα προεδρικά διατάγματα έχουν αλλάξει τους αρχικούς ορισμούς και αναθεωρήσει τους πίνακες οριακών τιμών.

### 2.3.2.3 Προεδρικό Διάταγμα 77/1993

Στο Π.Δ 77/1993 περιέχονται οι παρακάτω εννοιολογικοί προσδιορισμοί:

- Έκθεση σε χημικό παράγοντα νοείται το ατομικό επίπεδο έκθεσης του εργαζομένου σε χημικό παράγοντα που υπάρχει στον αέρα του χώρου εργασίας.
- Σκόνη (κονιορτός) νοούνται στερεά σωματίδια αιωρούμενα στον αέρα, παραγόμενα με μηχανικές μεθόδους ή με στροβιλισμό.
- Καπνός νοούνται στερεά σωματίδια σε λεπτό διαμερισμό αιωρούμενα στον αέρα, παραγόμενα με θερμικές και / ή χημικές μεθόδους.
- Ομίχλη νοούνται σταγονίδια υγρού σε λεπτό διαμερισμό αιωρούμενα στον αέρα, παραγόμενα με τη συμπύκνωση αερίων ή με τη διασκόρπιση υγρών.
- Εισπνεύσιμο κλάσμα αιωρούμενων σωματιδίων νοείται το σύνολο των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων το οποίο μπορεί να προσληφθεί από τον εργαζόμενο με εισπνοή από τη μύτη και / ή το στόμα.

- Αναπνεύσιμο κλάσμα αιωρούμενων σωματιδίων νοείται το σύνολο των σωματιδίων από το εισπνεύσιμο κλάσμα που φθάνει στις κυψελίδες των πνευμόνων.
- Αεροδυναμική διάμετρος αιωρούμενου στερεού σωματιδίου νοείται η διάμετρος νοητής σφαίρας, μοναδιαίας πυκνότητας ( $1\text{gr/cm}^3$ ), η οποία έχει ίση με το υπόψη σωματίδιο οριακή ταχύτητα πτώσεως στον αέρα.

Επιπλέον, για τους χημικούς παράγοντες που βρίσκονται στον αέρα του χώρου εργασίας ως σκόνη και εφόσον δεν περιλαμβάνονται στους χημικούς παράγοντες του πίνακα των οριακών τιμών έκθεσης, καθορίζονται τα εξής:

- Για σκόνη που περιέχει ελεύθερο κρυσταλλικό διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) η "Οριακή Τιμή Έκθεσης" υπολογίζεται ως εξής:

$$+ \text{ Για το αναπνεύσιμο κλάσμα της σκόνης } T = \frac{10}{X_1 + 2} \text{ mg/m}^3$$

$$+ \text{ Για το εισπνεύσιμο κλάσμα της σκόνης } T = \frac{30}{X_2 + 3} \text{ mg/m}^3$$

όπου, T είναι η κατά περίπτωση οριακή τιμή έκθεσης,  $X_1$  είναι η περιεκτικότητα (%) του ελεύθερου κρυσταλλικού διοξειδίου του πυριτίου στην ποσότητα του αναπνεύσιμου κλάσματος της σκόνης,  $X_2$  είναι η περιεκτικότητα (%) του ελεύθερου κρυσταλλικού διοξειδίου του πυριτίου στην ποσότητα του εισπνεύσιμου κλάσματος της σκόνης.

- Για σκόνη αδρανή ή απλώς ενοχλητική η "Οριακή Τιμή Έκθεσης" είναι:
  - + Για το αναπνεύσιμο κλάσμα αιωρούμενων σωματιδίων  $5 \text{ mg/m}^3$ .
  - + Για το εισπνεύσιμο κλάσμα αιωρούμενων σωματιδίων  $10 \text{ mg/m}^3$ .

#### 2.3.2.4 Προεδρικό Διάταγμα 90/1999

Σκοπός του Π.Δ 90/1999 είναι η προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας περί υγιεινής και ασφάλειας των εργαζομένων προς τις διατάξεις των οδηγιών 91/322/ΕΟΚ και 96/94/ΕΚ. Ουσιαστικά αναθεωρεί τον πίνακα με τις "Οριακές Τιμές Έκθεσης" και θεσπίζει νέο ο οποίος περιλαμβάνει περίπου 650 χημικά στοιχεία και ενώσεις. Ο νέος πίνακας, όπως και οι προηγούμενοι, δεν κατατάσσει τη σωματιδιακή ύλη σε αυτόνομη κατηγορία ρύπων (σε αντίθεση με τους πίνακες οριακών τιμών συγκέντρωσης στο περιβάλλον) αλλά θεωρεί ότι περιλαμβάνεται σε συγκεκριμένους χημικούς παράγοντες, θεώρηση λανθασμένη με βάση τον ορισμό της σωματιδιακής ύλης. Οι κανονισμοί του Π.Δ 77/1993 για τους χημικούς παράγοντες που βρίσκονται στον αέρα του χώρου εργασίας ως σκόνη συνεχίζουν να ισχύουν ενώ ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η οριακή τιμή έκθεσης σε άνθρακα (σκόνη με < 5% χαλαζία) είναι  $2 \text{ mg/m}^3$  (αναπνεύσιμη).



### 2.3.2.5 Προεδρικό Διάταγμα 339/2001

Στο Π.Δ 339/2001 αναθεωρούνται παλαιότεροι εννοιολογικοί ορισμοί και αντικαθίστανται από τους εξής:

- Οριακή τιμή έκθεσης σε χημικό παράγοντα:

Η τιμή την οποία δεν επιτρέπεται να ξεπερνά η μέση 8ωρη χρονικά σταθμισμένη έκθεση του εργαζόμενου στον χημικό παράγοντα, μετρημένη στον αέρα της ζώνης αναπνοής του, κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε 8ωρης ημερήσιας και 40ωρης εβδομαδιαίας εργασίας του.

- Ανώτατη οριακή τιμή έκθεσης σε χημικό παράγοντα:

Η τιμή την οποία δεν επιτρέπεται να ξεπερνά η μέση χρονικά σταθμισμένη έκθεση του εργαζόμενου στον χημικό παράγοντα, μετρημένη στον αέρα της ζώνης αναπνοής του, κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε δεκαπεντάλεπτης περιόδου μέσα στο χρόνο εργασίας του, έστω και αν τηρείται η οριακή τιμή έκθεσης.

### 2.3.3 Σωματιδιακή ύλη και περιβαλλοντικός αέρας

Το ελληνικό κράτος έχει υπογράψει και αποδεχθεί την κοινοτική οδηγία 99/30/ΕΚ που καθορίζει τις ελάχιστες οριακές τιμές για τη συγκέντρωση αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Στο Άρθρο 2 της κοινοτικής οδηγίας ορίζονται τα  $AS_{10}$  και  $AS_{2,5}$  ( $PM_{10}$  και  $PM_{2,5}$  αντίστοιχα στη διεθνή ορολογία) ως ξεχωριστές κατηγορίες ρύπων, ενώ στο Άρθρο 5 καθορίζεται ως ετήσια οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας τα  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ή  $0,040 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Σε δεύτερο στάδιο καθορίζεται η τιμή των  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ή  $0,020 \text{ mg}/\text{m}^3$ , στόχος που πρέπει να επιτευχθεί μέχρι τον Ιανουάριο του 2010.

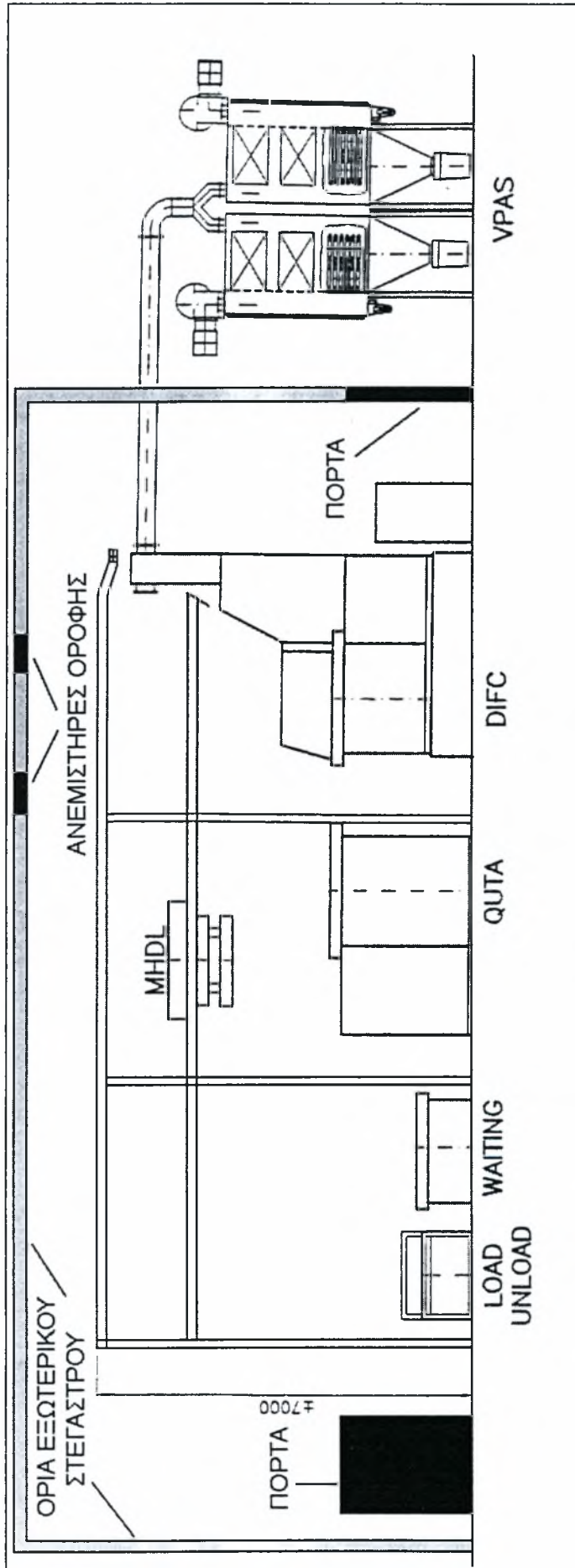
Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Environmental Protection Agency (EPA) έχει θεσπίσει οριακές τιμές για τη συγκέντρωση έξι συνολικά αέριων ρύπων, μεταξύ των οποίων η σωματιδιακή ύλη με αεροδυναμική διάμετρο  $10 \mu\text{m}$  ( $PM_{10}$ ) και  $2,5 \mu\text{m}$  ( $PM_{2,5}$ ), στον αέρα του περιβάλλοντος μέσω των National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Συγκεκριμένα, έχει καθοριστεί ως ετήσια οριακή τιμή τα  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ή  $0,050 \text{ mg}/\text{m}^3$  για τα σωματίδια  $PM_{10}$  και τα  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ή  $0,015 \text{ mg}/\text{m}^3$  για τα σωματίδια  $PM_{2,5}$ .

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

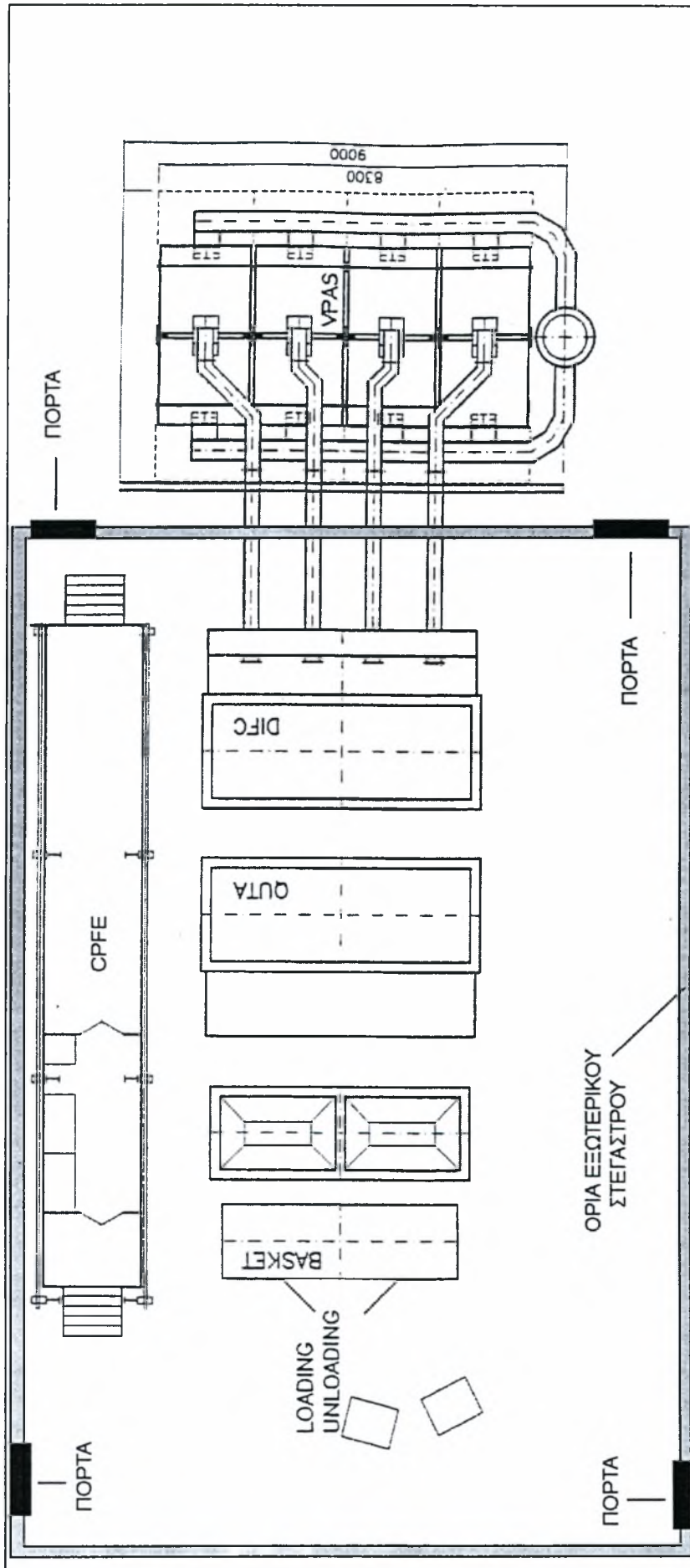
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι μετρήσεις συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης πραγματοποιήθηκαν στο στρατόπεδο “304 Προκεχωρημένο Εργοστάσιο Βάσεως” που βρίσκεται στην περιοχή του Βελεστίνου, στο νομό Μαγνησίας, είκοσι περίπου χιλιόμετρα από την πόλη του Βόλου, κατόπιν άδειας από το Γενικό Επιτελείο Στρατού. Στο συγκεκριμένο στρατόπεδο είναι εγκατεστημένη η μονάδα ρευστομηχανικής κλίνης για τον καθαρισμό από υπολείμματα ελαστικού των μεταλλικών εξαρτημάτων που συνθέτουν την ερπύστρια των αρμάτων μάχης. Η μονάδα έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Seghers και το κύριο μέρος της βρίσκεται σε μεταλλικό κλειστό στέγαστρο. Περιμετρικά του εξωτερικού στεγάστρου υπάρχουν συνολικά τέσσερις μεγάλες πόρτες ενώ στην οροφή του βρίσκονται τέσσερις ανεμιστήρες για την ανανέωση του εσωτερικού αέρα. Η καμινάδα της εγκατάστασης βρίσκεται σε ύψος 20 m περίπου από το έδαφος ενώ στον περιβάλλοντα χώρο δεν υπάρχουν άλλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Στα Σχήμα 3.1 και Σχήμα 3.2 απεικονίζεται ένα σκαρίφημα της πρόσοψης και της κάτοψης αντίστοιχα της εγκατάστασης.



Σχήμα 3.1 – Πρόσωση του χώρου πραγματοποίησης των μετρήσεων



Σχήμα 3.2 – Κάτοψη του χώρου πραγματοποίησης των μετρήσεων

## 3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η εγκατάσταση έχει σχεδιαστεί για τη θερμική αφαίρεση οργανικών ουσιών από μεταλλικά εξαρτήματα κατά τρόπο περιβαλλοντικά αποδεκτό. Η ικανότητα του συστήματος εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας και ποικίλει από 1.5 MW με φόρτωση σε παρτίδες έως 3.0 MW με συνεχή φόρτωση. Οι σημαντικότερες επιμέρους διατάξεις είναι:

➤ Seghers Fluidised Bed Degrader System (SFDS).

Το “Seghers Fluidised Bed Degrader System” (SFDS) είναι μια εγκατάσταση καύσης δύο σταδίων για την αφαίρεση των υπολειμμάτων λάστιχου από μεταλλικά εξαρτήματα πολύ γρήγορα και με τρόπο περιβαλλοντικά αποδεκτό. Οι σημαντικότερες επιμέρους διατάξεις του συστήματος είναι μια ρευστομηχανική κλίνη που λειτουργεί σε μέση θερμοκρασία και επιτυγχάνει γρήγορη και έντονη αντίδραση των ουσιών οργανικής βάσης που περιέχονται στα υπό επεξεργασία εξαρτήματα και ο θάλαμος θερμικής μετάκαυσης όπου τα καυσαέρια που παράγονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας καίγονται σε δεύτερο στάδιο σε πολύ υψηλή θερμοκρασία.

➤ Ventilation and Pollution Abatement System (VPAS).

Τα καυσαέρια ακόμα και μετά το θάλαμο μετάκαυσης περιέχουν ουσίες που πρέπει να αφαιρεθούν, π.χ. ουσίες που προέρχονται αφ' ενός από το υλικό πλήρωσης της ρευστομηχανικής κλίνης, όπως άμμος και αφ' ετέρου από το υλικό που καίγεται όπως ανόργανες ουσίες, ορυκτά στοιχεία και πρόσθετα. Για να επιτευχθούν καθαρές εκπομπές οι παραπάνω ουσίες πρέπει να φιλτραριστούν από τα καυσαέρια. Αυτό γίνεται στο Ventilation and Pollution Abatement System (VPAS). Τα καυσαέρια που προέρχονται από το θάλαμο μετάκαυσης (>850 °C) ψύχονται με έγχυση νερού και ανάμιξη με περιβαλλοντικό αέρα. Στη συνέχεια εγχέεται ουσία ξηρής προσρόφησης για την εξουδετέρωση των οξέων των καυσαερίων. Τα προϊόντα αντίδρασης αυτού του συστήματος προσρόφησης χωρίζονται από το ρεύμα των καυσαερίων σε φίλτρο κεραμικό ινών (σακκόφιλτρα). Με τη χρήση ανεμιστήρα τα καυσαέρια οδηγούνται στην ατμόσφαιρα μέσω καμινάδας η οποία είναι εξοπλισμένη με σύστημα συνεχούς ελέγχου εκπομπής ρύπων.

➤ Feeding System (FEED).

Το εγκατεστημένο σύστημα τροφοδοσίας περιλαμβάνει δύο τρόπους φόρτωσης, φόρτωση σε παρτίδες και συνεχή φόρτωση. Η διαφορά είναι η εξής:

Με το σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες τα προς επεξεργασία μεταλλικά εξαρτήματα τοποθετούνται σε καλάθι και εισέρχονται στη ρευστομηχανική κλίνη για περίπου μία ώρα. Ο αριθμός των εξαρτημάτων της παρτίδας ποικίλει ανάλογα με το είδος τους. Με το συνεχές σύστημα τροφοδοσίας τα εξαρτήματα εισέρχονται ένα-ένα μέχρι να συμπληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός εξαρτημάτων στην κλίνη. Η διεργασία διαρκεί περίπου τρεις ώρες και πλεονεκτεί αφού χρησιμοποιείται πλήρως η ικανότητα αφαίρεσης του λάστιχου από τα μεταλλικά εξαρτήματα. Η ωριαία ποσότητα λάστιχου που μπορεί να αφαιρεθεί είναι 270 kg/h και είναι διπλάσια σε σύγκριση με το σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες.

➤ Quenching tank (QUTA).

Το καλάθι με τα μεταλλικά εξαρτήματα μετά το τέλος της επεξεργασίας στη ρευστομηχανική κλίνη ψύχεται σε δεξαμενή νερού που βρίσκεται μπροστά από την εγκατάσταση.

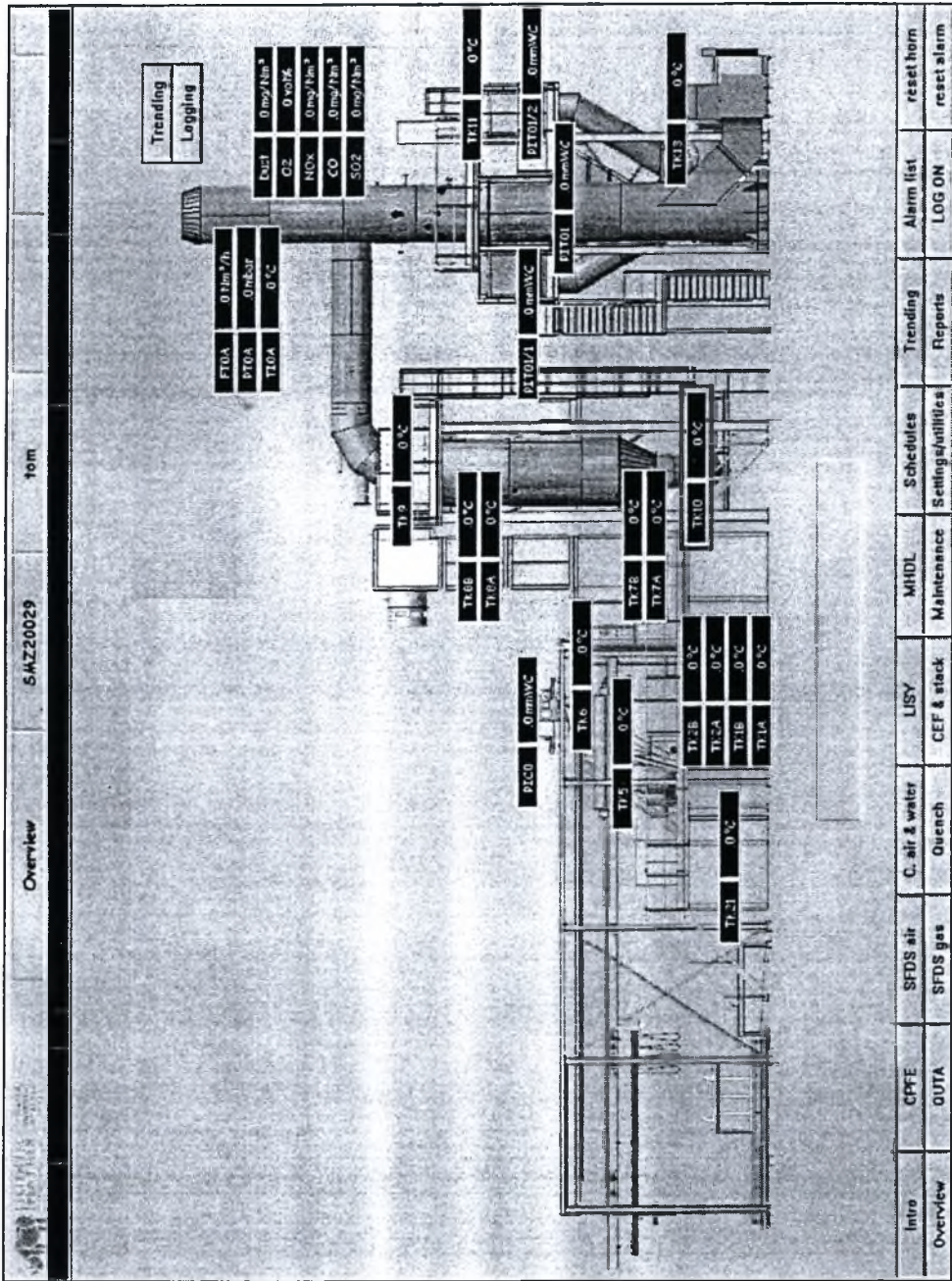
➤ Controls system (CTRL).

Το σύστημα ελέγχων αποτελείται από δύο PC και ένα PLC τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε δίκτυο. Η λειτουργία του συστήματος πραγματοποιείται με το SCADA (Supervision, Control, and Data Acquisition system) που είναι εγκατεστημένο στα δύο PC.

Η μορφή της εγκατάστασης όπως σχηματικά απεικονίζεται μέσω του Scada παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.

### 3.2.1 Seghers Fluidised Bed Degrader System (SFDS)

Το Seghers Fluidised Bed Degrader System (SFDS) αποτελείται από τις εξής διατάξεις: το χώρο ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων, τη ρευστομηχανική κλίνη, το θάλαμο καύσης (πρωτοβάθμια) και το θάλαμο μετάκαυσης (δευτεροβάθμια). Το SFDS είναι μια βιομηχανική εγκατάσταση για την αφαίρεση οργανικών ουσιών από μεταλλικά εξαρτήματα πολύ γρήγορα και με περιβαλλοντικά αποδεκτό τρόπο, που δεν αφήνει κανένα υπόλειμμα αλλά μόνο αδρανή τέφρα και σκόνη. Οποιαδήποτε αέρια παράγονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας καίγονται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και φιλτράρονται κατόπιν, προκειμένου να επιτευχθούν καθαρές εκπομπές καυσαερίων.



Σχήμα 3.3 – Απεικόνιση της εγκατάστασης

### 3.2.1.1 Χώρος ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων

Ο χώρος των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων ουσιαστικά αποτελεί το σύνολο των ολοκληρωμένων διατάξεων παροχής αερίου καύσης, αέρα, νερού και συμπιεσμένου αέρα. Αποτελείται από αγωγούς και διατάξεις κύριας και δευτερεύουσας παροχής και από μηχανισμούς που είναι απαραίτητοι για το γενικό έλεγχο και τη λειτουργία της εγκατάστασης όπως διακόπτες πίεσης, ρυθμιστές ροής, φίλτρα, βαλβίδες, φυσητήρες. Οι διατάξεις επιμέρους παροχής τροφοδοτούν μεμονωμένα συστήματα όπως οι βοηθητικοί καυστήρες και τα ακροφύσια τροφοδοσίας νερού.

Δύο φυσητήρες αέρα αποτελούν την κύρια παροχή αέρα για την επίτευξη της ρευστοποίησης της κλίνης. Ένας εφεδρικός φυσητήρας κύριας παροχής αέρα χρησιμοποιείται σε περίπτωση βλάβης. Επιπλέον, ένας άλλος φυσητήρας αέρα χρησιμοποιείται για δευτεροβάθμια παροχή αέρα. Συγκεκριμένα, δευτεροβάθμιος αέρας εγχέεται ακριβώς επάνω από τη μάζα της άμμου για να πραγματοποιηθεί καλύτερη καύση ενώ χρησιμοποιείται και σε άλλα επιμέρους συστήματα όπως στους βοηθητικούς καυστήρες και στην ψύξη των ακροφυσίων έγχυσης νερού. Οι φυσητήρες είναι τοποθετημένοι σε χωριστό, ηχητικά μονωμένο χώρο ενώ για την αποτελεσματική ψύξη τους χρησιμοποιούνται δύο ανεμιστήρες. Το αέριο καύσης χρησιμοποιείται στους βοηθητικούς καυστήρες, στην ανάμιξη με τον αέρα για τη θέρμανση της κλίνης και στο κύριο σύστημα καυστήρων το οποίο είναι ενσωματωμένο στο θάλαμο μετάκαυσης. Οι σωληνώσεις και οι επιμέρους διατάξεις έχουν σχεδιαστεί για χρήση προπανίου, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυσικό αέριο με την πραγματοποίηση ορισμένων τροποποιήσεων. Το νερό χρησιμοποιείται για την ψύξη της κλίνης με εξωτερικό σύστημα σωληνώσεων. Ο συμπιεσμένος αέρας χρησιμοποιείται για την λειτουργία των ηλεκτροπνευματικών βαλβίδων.

### 3.2.1.2 Fluidised bed reactor

Η ρευστομηχανική κλίνη έχει σχεδιαστεί για θερμική ισχύ 3 MW με συνεχή φόρτωση και 1,5 MW με φόρτωση σε παρτίδες. Ο αντιδραστήρας της ρευστομηχανικής κλίνης αποτελείται κυρίως από μια δεξαμενή με άμμο συγκεκριμένου τύπου και διαστάσεων. Ο πρωτοβάθμιος αέρας για την ρευστοποίηση εισέρχεται στην κλίνη από το κατώτατο σημείο, στη βάση της δεξαμενής, μέσω ενός συστήματος διανομής. Έτσι η μάζα της άμμου μετατρέπεται σε ένα στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων που ονομάζεται ρευστοποίηση. Η ρευστομηχανική κλίνη λειτουργεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 400 και 540 °C, ανάλογα με το είδος των εξαρτημάτων που υποβάλλονται σε επεξεργασία. Ένα σύστημα πρόμιξης χρησιμοποιείται για την θέρμανση της κλίνης. Το αέριο καύσης προμιγνύεται με τον



αέρα και εγχέεται μέσω της μάζας της άμμου. Μόλις το μίγμα αερίου καύσης-αέρα αναδυθεί στην επιφάνεια της ρευστομηχανικής κλίνης αναφλέγεται αμέσως από έναν μόνιμο βοηθητικό καυστήρα. Η παρουσία του βοηθητικού καυστήρα εξασφαλίζει την ασφάλεια της διαδικασίας. Μέσα σε μερικές ώρες, η ρευστομηχανική κλίνη φθάνει σε ομοιόμορφη θερμοκρασία λειτουργίας μεταξύ 400 και 540 °C και είναι έτοιμη για την τροφοδοσία των υπό επεξεργασία μεταλλικών εξαρτημάτων. Η γρήγορη και ισχυρή διεργασία αφαίρεσης των οργανικών ουσιών πραγματοποιείται άμεσα επάνω στα μεταλλικά εξαρτήματα. Όλο το λαστιχένιο υλικό θα πυρολυθεί εντελώς αφήνοντας μόνο ανόργανες ενώσεις που εκπίπτουν σε πολύ λεπτά αδρανή στερεά σωματίδια ενώ οι οργανικές ουσίες που παράγονται στη ρευστομηχανική κλίνη συλλέγονται περαιτέρω στο φίλτρο. Τα καυσαέρια που προκύπτουν από τη ρευστομηχανική κλίνη αναφλέγονται αμέσως καθώς μια δευτεροβάθμια παροχή αέρα εγχέεται στην ζώνη επάνω από τη ρευστομηχανική κλίνη. Η θερμική ενέργεια που περιέχεται στο λάστιχο χρησιμοποιείται και κρατά τον αντιδραστήρα στη δεδομένη θερμοκρασία. Έτσι, το ποσό του αερίου καυσίμου μειώνεται στο ελάχιστο.

### 3.2.1.3 Θάλαμος καύσης

Ο θάλαμος καύσης αποτελεί τον πρωτοβάθμιο χώρο μετάκαυσης. Τα καυσαέρια που προκύπτουν από τη ρευστομηχανική κλίνη αναφλέγονται και δημιουργούν μια ζώνη θερμοκρασιών έως 700 °C. Ο θάλαμος καύσης είναι μονωμένος με κεραμικές ίνες που επιτρέπουν την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτές οι ίνες προστατεύονται από τη διάβρωση από ένα επίστρωμα Zr. Μια αυτοματοποιημένη και ηλεκτρονικά ελεγχόμενη πόρτα που ενεργοποιείται με πνευματικά έμβολα είναι τοποθετημένη στο μέτωπο του θαλάμου καύσης για την είσοδο του καλαθιού με τα υπό επεξεργασία εξαρτήματα στο πρόγραμμα φόρτωσης σε παρτίδες, καθώς επίσης και για τη συντήρηση, την επιθεώρηση και την πλήρωση με άμμο της κλίνης. Στο επάνω μέρος του θαλάμου καύσης είναι τοποθετημένες δύο ηλεκτρονικά ελεγχόμενες πόρτες για την εισαγωγή των μεταλλικών εξαρτημάτων στο πρόγραμμα συνεχούς φόρτωσης. Ένας αισθητήρας πίεσης είναι τοποθετημένος στην κορυφή του θαλάμου καύσης και χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της υποπίεσης ενώ η θερμοκρασία του θαλάμου καύσης ελέγχεται από δύο θερμοστοιχεία. Τέσσερα παράθυρα επιθεώρησης, που ψύχονται με τον αέρα του περιβάλλοντος είναι ενσωματωμένα στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης για να επιτρέπουν την οπτική επιθεώρηση της ρευστοποίησης και του χώρου.

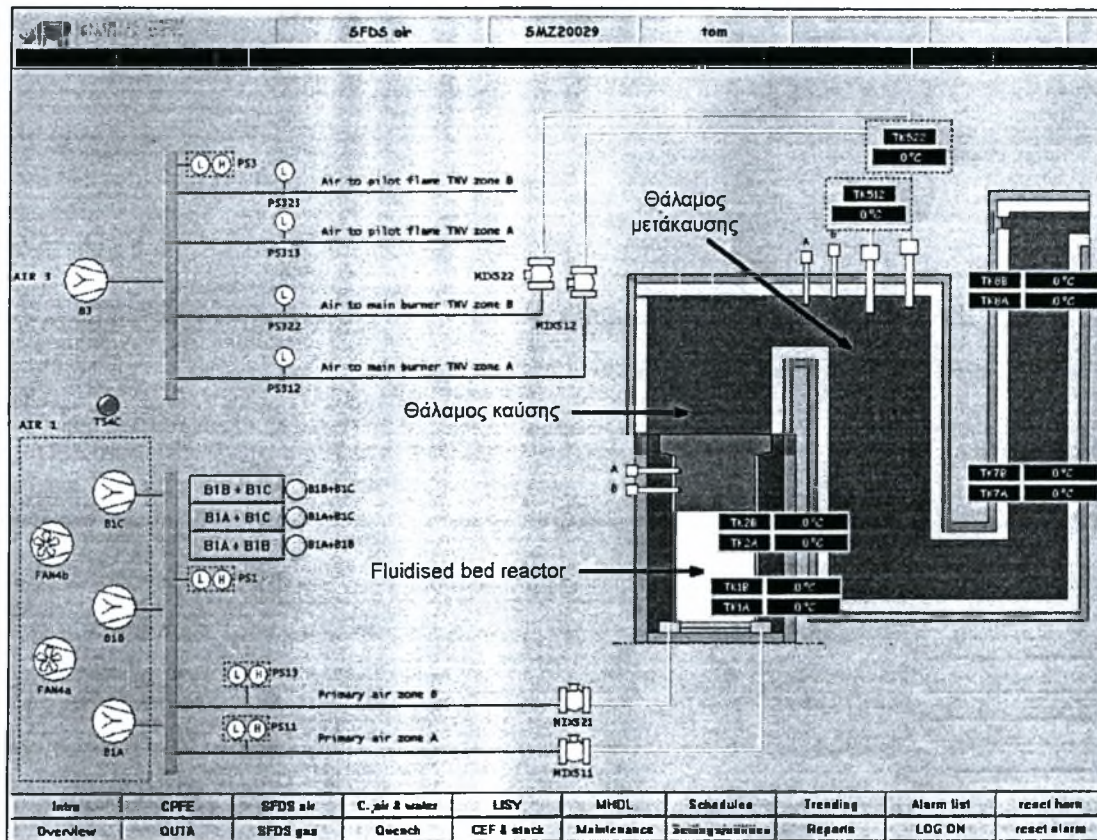
#### 3.2.1.4 Θάλαμος μετάκαυσης

Ο θάλαμος μετάκαυσης αποτελεί το δευτεροβάθμιο χώρο μετάκαυσης και έχει σχεδιαστεί για θερμική ισχύ 3,65 MW. Όλα τα εναπομείναντα ίχνη οργανικών ουσιών που απομακρύνονται από τη ρευστομηχανική κλίνη οξειδώνονται για 2 sec στους 850 °C. Ο θάλαμος δευτεροβάθμιας μετάκαυσης είναι μονωμένος με κεραμικές ίνες που επιτρέπουν την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Στα κρίσιμα σημεία του οι ίνες προστατεύονται από τη διάβρωση από ένα επίστρωμα Zr. Ο θάλαμος μετάκαυσης είναι στενόμακρος και ψηλός με πολλούς μικρούς καυστήρες. Η σχεδίαση αυτή αποδεικνύεται πολύ αποδοτική για τον έλεγχο και την μείωση των μεταβολών της θερμοκρασίας με το χρόνο. Ο θάλαμος έχει δύο θερμοστοιχεία ένα για έλεγχο και ένα για προστασία. Στην είσοδο του θαλάμου μετάκαυσης υπάρχει μια ζώνη τυρβώδους ανάμιξης με έναν κύριο καυστήρα για τον έλεγχο της ροής και της θερμοκρασίας σε όλη τη ροή των αερίων. Ένας βοηθητικός καυστήρας εξασφαλίζει την ανάφλεξη του κύριου καυστήρα, ο οποίος αποτελείται από δέκα ακροφύσια στην σειρά. Λόγω της εγκατάστασης του βοηθητικού καυστήρα, μια μόνιμη και ελεγχόμενη φλόγα είναι πάντα παρούσα. Δύο παράθυρα επιθεώρησης, που ψύχονται με τον αέρα του περιβάλλοντος είναι ενσωματωμένα στα τοιχώματα του θαλάμου μετάκαυσης για να επιτρέπουν την οπτική επιθεώρηση της φλόγας και των κύριων και βοηθητικών καυστήρων.

Η ρευστομηχανική κλίνη, οι θάλαμοι καύσης και μετάκαυσης όπως σχηματικά απεικονίζονται μέσω του Scada παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.

### 3.2.2 Ventilation and Pollution Abatement System

Τα καυσαέρια ακόμα και μετά το θάλαμο μετάκαυσης περιέχουν ουσίες που πρέπει να αφαιρεθούν, π.χ. ουσίες που προέρχονται αφ' ενός από το υλικό πλήρωσης της ρευστομηχανικής κλίνης, όπως άμμος και αφ' ετέρου από το υλικό που καίγεται όπως ανόργανες ουσίες, ορυκτά στοιχεία και πρόσθετα. Για να επιτευχθούν καθαρές εκπομπές οι παραπάνω ουσίες πρέπει να φιλτραριστούν από τα καυσαέρια. Αυτό γίνεται στο Ventilation and Pollution Abatement System (VPAS). Τα καυσαέρια που προέρχονται από το θάλαμο μετάκαυσης (>850 °C) ψύχονται με έγχυση νερού και ανάμιξη με περιβαλλοντικό αέρα. Στη συνέχεια εγχέεται ουσία ξηρής προσρόφησης για την εξουδετέρωση των οξέων των καυσαερίων. Τα προϊόντα αντίδρασης αυτού του συστήματος προσρόφησης χωρίζονται από το ρεύμα των καυσαερίων σε φίλτρο κεραμικό ινών. Με τη χρήση ανεμιστήρα τα καυσαέρια οδηγούνται στην ατμόσφαιρα μέσω καμινάδας η οποία είναι εξοπλισμένη με σύστημα συνεχούς ελέγχου των εκπεμπόμενων ρύπων.



Σχήμα 3.4 – Απεικόνιση των διατάξεων του Seghers Fluidised Bed Degradation System (SFDS)

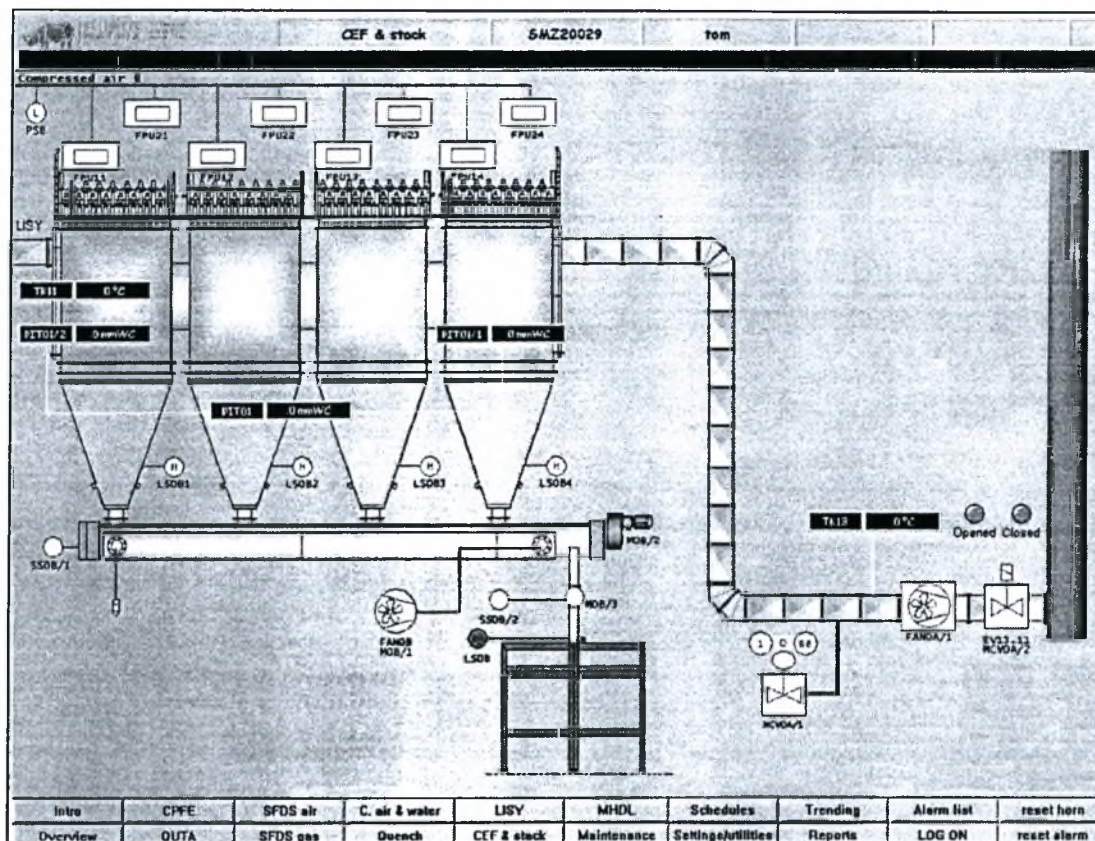
Το πλήρες σύστημα Ventilation and Pollution Abatement System (VPAS) περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Τμήμα ψύξης καυσαερίων: υδρόψυξη και βαλβίδες ανάμιξης αέρα.
- Έγχυση μέσωσν προσρόφησης: Ασβέστης (LISY).
- Φίλτρο κεραμικών ινών (CEF).
- Σωληνώσεις αερίων, ανεμιστήρας έλξης καυσαερίων (ID-fan), καμινάδα.
- Σύστημα συνεχούς ελέγχου εκπομπής ρύπων (CEMS).

Το Ventilation and Pollution Abatement System (VPAS) όπως σχηματικά απεικονίζονται μέσω του Scada παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.

### 3.2.2.1 Τμήμα ψύξης καυσαερίων

Τα καυσαέρια που προέρχονται από το θάλαμο μετάκαυσης σε θερμοκρασία 850 °C ψύχονται με έγχυση νερού και με ανάμιξη με περιβαλλοντικό αέρα. Ο συγκεκριμένος τρόπος ψύξης επιτρέπει τον έλεγχο της υγρασίας των καυσαερίων και της θερμοκρασίας στην οποία εγχέονται τα προϊόντα προσρόφησης. Ο έλεγχος είναι απαραίτητος για την καλή λειτουργία των συστημάτων ελέγχου εκπομπής ρύπων.



Σχήμα 3.5 – Απεικόνιση του Ventilation and Pollution Abatement System (VPAS)

### 3.2.2.2 Υδρόψυξη

Σε πρώτη φάση τα καυσαέρια ψύχονται σε θερμοκρασία περίπου 400 °C με έγχυση νερού άμεσα στο ρεύμα των καυσαερίων. Το σύστημα υδρόψυξης αποτελείται από μια δεξαμενή με διάμετρο 1,7 m και μήκος 5 m και από δύο ζευγάρια ακροφυσίων ψεκασμού τοποθετημένα στην επάνω επιφάνεια. Συμπιεσμένος αέρας και φιλτραρισμένο νερό αναμιγνύονται στα ακροφύσια ψεκασμού δημιουργώντας ένα νέφος με εξαιρετικά λεπτά σταγονίδια. Έτσι η θερμική ενέργεια των καυσαερίων συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του νερού με συνέπεια την πολύ γρήγορη εξάτμισή του και τη μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Η βαλβίδα ρύθμισης της ροής του νερού ελέγχεται από ένα μετρητή θερμοκρασίας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται αυτόματα μια σταθερή θερμοκρασία καυσαερίων +/- 400 °C.

Μόνο το ένα ζευγάρι των ακροφυσίων είναι σε λειτουργία κάθε στιγμή. Το δεύτερο ζευγάρι των ακροφυσίων εγγυάται τη σωστή λειτουργία της εγκατάστασης ακόμα κι αν ένα ακροφύσιο υποστεί βλάβη. Η έλλειψη ροής στην κύρια σειρά των ακροφυσίων ενώ η ρυθμιστική βαλβίδα είναι πλήρως ανοιχτή θα μεταστρέψει αυτόματα την έγχυση νερού στο εφεδρικό ζευγάρι των ακροφυσίων. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, τα ακροφύσια ψύχονται από τη ροή του αέρα και του

νερού. Επιπλέον, αέρας ρέει και στα εφεδρικά ακροφύσια ώστε να ψύχονται ακόμα κι αν δεν είναι σε λειτουργία. Όταν το ζεύγος των ακροφυσίων δεν βρίσκεται σε λειτουργία, συμπιεσμένος αέρας διοχετεύεται για ορισμένο χρόνο στις σωληνώσεις παροχής νερού για να αποφευχθεί παρακράτηση νερού προκαλώντας ενδεχομένως εναπόθεση αλάτων στα ακροφύσια.

### 3.2.2.3 Βαλβίδες ανάμιξης αέρα

Το επόμενο στάδιο ψύξης των καυσαερίων πραγματοποιείται με την ανάμιξη περιβαλλοντικού αέρα με το ρεύμα των καυσαερίων. Η ελεγχόμενη ανάμιξη με τον περιβαλλοντικό αέρα επιλέγεται για λόγους ακρίβειας. Η τελική θερμοκρασία για την έγχυση του ασβέστη μπορεί να οριστεί για τη βέλτιστη αποδοτικότητα της προσρόφησης αλλά για την αξιόπιστη λειτουργία του ανεμιστήρα έλξης των καυσαερίων. Οι βαλβίδες ανάμιξης αέρα είναι τοποθετημένες στα εξής υποσυστήματα:

➤ Πριν την υδρόψυξη:

Η βαλβίδα ανάμιξης αέρα πριν την υδρόψυξη είναι μια πνευματική βαλβίδα δύο καταστάσεων (ανοικτή / κλειστή). Σε κανονική λειτουργία αυτή η βαλβίδα είναι πάντα κλειστή. Ουσιαστικά, είναι μόνο μια βαλβίδα ασφάλειας σε περίπτωση που η υδρόψυξη δεν λειτουργήσει. Η βαλβίδα είναι σχεδιασμένη για να διοχετεύει αρκετή ποσότητα αέρα ώστε να εξασφαλιστεί το ίδιο ποσοστό ψύξης των καυσαερίων για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση της εγκατάστασης σε περίπτωση δυσλειτουργίας της υδρόψυξης. Εντούτοις, η εγκατάσταση δεν έχει σχεδιασθεί για να λειτουργεί συνεχώς σε αυτήν την αυξανόμενη ροή αέρα.

➤ Πριν από την έγχυση μέσω προσρόφησης:

Η βαλβίδα ανάμιξης αέρα πριν από την έγχυση μέσω προσρόφησης (LISY) είναι μια ηλεκτρικά ρυθμιζόμενη βαλβίδα. Η λειτουργία της είναι να εξασφαλίζει μια σταθερή και δεδομένη θερμοκρασία έγχυσης του ασβέστη στο ρεύμα των καυσαερίων. Ο ασβέστης εγχέεται σε θερμοκρασία μεταξύ 380 °C και 350 °C.

### 3.2.2.4 Έγχυση μέσω προσρόφησης

Ανάλογα με τον τύπο των ουσιών που καίγονται στην ρευστομηχανική κλίνη τα καυσαέρια μπορούν να περιέχουν επιβλαβείς ενώσεις όπως SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HCl. Το LISY (Lime Injection System) αποτελεί το σύστημα έγχυσης μέσω προσρόφησης για την αδρανοποίηση αυτών των ουσιών.

Το μέσο ξηράς προσρόφησης είναι ενυδατωμένος ασβέστης με μεγάλη επιφάνεια ενεργοποίησης και ικανότητα αντίδρασης. Αυτό το μέσο εγχέεται στο ρεύμα των καυσαερίων για να μεγιστοποιηθεί η διασπορά του. Ο βαθμός της διασποράς και η

θερμοκρασία των καυσαερίων επηρεάζουν την αποδοτικότητα της αντίδρασης μεταξύ των μέσων προσρόφησης και των διάφορων επιβλαβών ενώσεων. Η αδρανοποίηση των θειούχων και αλογονούχων ενώσεων πραγματοποιείται με την έγχυση ενυδατωμένου ασβέστη στο ρεύμα των καυσαερίων με τη μορφή ασβεστούχων αλάτων στερεάς κατάστασης. Οι ιδιότητες του ενυδατωμένου ασβέστη σε συνδυασμό με το προσεκτικά σχεδιασμένο σύστημα έγχυσης προσφέρει εξαιρετική προσρόφηση. Το σύστημα μπορεί να πετύχει κατακράτηση πάνω από 95% των SO<sub>x</sub>. Όλες οι στερεές ουσίες που περιέχονται στο ρεύμα των καυσαερίων φιλτράρονται στο φίλτρο κεραμικών ινών.

Ένα σύστημα ελεγχόμενης συχνότητας καθορίζει την ποσότητα του μέσου ξηράς προσρόφησης που εγχέεται. Ο ρυθμός ροής κυμαίνεται μεταξύ 10 και 120 kg/h. Ο ασβέστης τροφοδοτείται σε ένα φυγοκεντρικό αναμίκτη, από όπου μεταφέρεται πνευματικά μέσω ενός συστήματος αγωγών και εγχέεται στο ρεύμα των καυσαερίων πριν από το κεραμικό φίλτρο. Ένας ανεμιστήρας παρέχει τον απαραίτητο αέρα για την πνευματική μεταφορά.

#### 3.2.2.5 Φίλτρο κεραμικών ινών (CEF)

Το φίλτρο κεραμικών ινών λειτουργεί ως φίλτρο παρεμπόδισης και διαχωρίζει όλες τις στερεές ουσίες και τη σωματιδιακή ύλη από το ρεύμα των καυσαερίων συμπεριλαμβανομένων των προϊόντων αντίδρασης του συστήματος έγχυσης μέσω ξηράς προσρόφησης. Το φίλτρο επιτυγχάνει απόδοση κατακράτησης 99.9% για σωματίδια μεγέθους κάτω από 0,1 μm. Ο σχεδιασμός του συστήματος επιτρέπει τη λειτουργία του φίλτρου κεραμικών ινών σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 380 °C έως 220 °C. Η θερμοκρασία λειτουργίας επιλέγεται ανάλογα με τη σύνθεση των καυσαερίων ώστε να επιτευχθούν τα καλύτερα αποτελέσματα κατακράτησης ρύπων. Συνήθως αυτή η θερμοκρασία είναι περίπου 325 °C. Το φίλτρο κεραμικών ινών ανήκει στην κατηγορία των σακκόφιλτρων που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2.2.7.4.

#### 3.2.2.6 Θάλαμοι φίλτρων

Το σύστημα των φίλτρων κεραμικών ινών αποτελείται από τέσσερις ξεχωριστούς θαλάμους σε μια κοινή δομή. Οι δύο θάλαμοι αντιστοιχούν στη ζώνη Α, πριν το φιλτράρισμα των καυσαερίων (βρώμικοι θάλαμοι), ενώ οι άλλοι δύο στη ζώνη Β, μετά το φιλτράρισμα των καυσαερίων (καθαροί θάλαμοι). Ο σχεδιασμός του συστήματος επιτρέπει μεγάλες θερμικές καταπονήσεις σε θερμοκρασίες περίπου 400 °C για συνεχείς συνθήκες λειτουργίας. Οι θάλαμοι της ζώνης Α διαθέτουν μια καταπακτή και εσωτερική σκάλα για να διευκολύνεται η επιθεώρηση και η συντήρηση του συστήματος όταν είναι απαραίτητο. Οι θάλαμοι της ζώνης Β διαθέτουν μία πόρτα σε

φυσικό μέγεθος που επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση στο χώρο για επιθεώρηση. Ένας διακόπτης ασφαλείας εμποδίζει τη λειτουργία του ανεμιστήρα έλξης των καυσαερίων όταν κάποια από τις πόρτες των θαλάμων είναι ανοιχτή. Κάθε θάλαμος φίλτρων περιλαμβάνει 544 στοιχεία φίλτρων που είναι τοποθετημένα οριζόντια. Τα στοιχεία κεραμικών ινών μπορούν να καταπονηθούν θερμικά μέχρι τους 900 °C χωρίς οποιαδήποτε ζημιά. Είναι επομένως ανθεκτικά στις συνθήκες που επικρατούν κατά την εισαγωγή των καυσαερίων στους θαλάμους της ζώνης A. Η σωματιδιακή ύλη των καυσαερίων δημιουργεί ένα επίστρωμα στην επιφάνεια των στοιχείων των θαλάμων της ζώνης A (βρώμικοι θάλαμοι) καθώς αυτά απορροφούνται και διαπερνούν φιλτραρισμένα τα στοιχεία των θαλάμων της ζώνης B (καθαροί θάλαμοι).

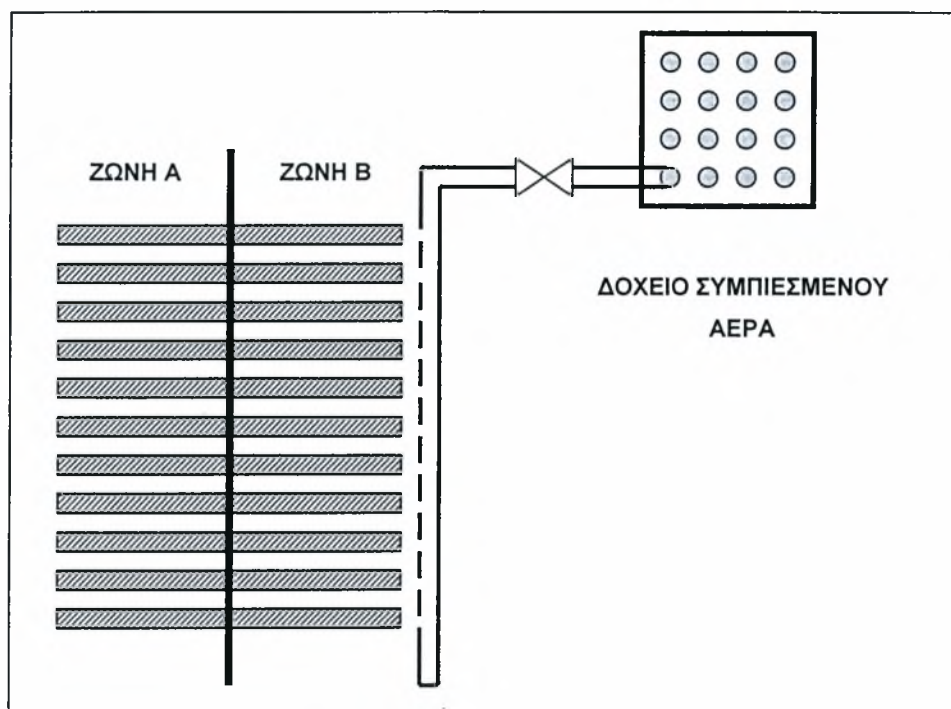
### 3.2.2.7 Σύστημα καθαρισμού φίλτρων

Πάνω από κάθε θάλαμο φίλτρων είναι εγκατεστημένο ένα δοχείο συμπιεσμένου αέρα. Κάθε δοχείο έχει 16 εξόδους με αντίστοιχο αριθμό βαλβίδων διακοπής. Κάθε έξοδος συνδέεται με ένα σωλήνα που είναι τοποθετημένος μπροστά από μια σειρά στοιχείων κεραμικών φίλτρων και έχει μια μικρή τρύπα στο κέντρο κάθε στοιχείου. Όταν η βαλβίδα ανοίγει μια μικρή ποσότητα συμπιεσμένου αέρα (παλμός) στέλνεται με αντίστροφη κατεύθυνση από αυτή των καυσαερίων (από τα στοιχεία του θαλάμου B προς τα στοιχεία του θαλάμου A) σε όλα τα στοιχεία της συγκεκριμένης σειράς, αναγκάζοντας κατά συνέπεια το επίστρωμα που έχει δημιουργηθεί στα παλλόμενα στοιχεία να πέσει στη χοάνη συλλογής σκόνης που είναι τοποθετημένη κάτω από τα στοιχεία. Οι παλμοί παράγονται με συγκεκριμένη σταθερά χρόνου από ένα ηλεκτρονικό σύστημα συχνοτήτων που εξασφαλίζει ότι όλα τα στοιχεία πάλλονται για το ίδιο χρονικό διάστημα. Τα φίλτρα εκτός από την περιοδική αντικατάστασή τους υπόκεινται σε συνεχή καθαρισμό και επομένως εξασφαλίζεται ότι το συνολικό σύστημα μπορεί να βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία φιλτράροντας το ρεύμα των καυσαερίων από σωματιδιακή ύλη. Η διάταξη του συστήματος καθαρισμού των φίλτρων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6.

### 3.2.2.8 Σωληνώσεις, ανεμιστήρας έλξης καυσαερίων (ID-fan), καμινάδα

Τα καυσαέρια οδηγούνται στην καμινάδα μέσω ενός συνόλου σωληνώσεων. Αυτοί οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα προκειμένου να είναι ανθεκτικοί στις δραστικές ενώσεις που περιέχονται σ' αυτά. Σε όλες τις κρίσιμες θέσεις, δηλαδή σε κάθε σημείο όπου οι παράμετροι της διεργασίας αλλάζουν, είναι τοποθετημένα κατάλληλα μετρητικά στοιχεία. Αυτό διευκολύνει τη ρύθμιση της εγκατάστασης με ακρίβεια και την ανίχνευση των πιθανών δυσλειτουργιών. Ο ανεμιστήρας έλξης καυσαερίων ελέγχει και αναρροφά τα καυσαέρια από το συνολικό

σύστημα. Η συχνότητά του ελέγχεται και ρυθμίζεται αυτόματα. Ένας κλειστός βρόγχος ελέγχου που λαμβάνει υπ' όψιν του την υποπίεση στο θάλαμο καύσης ελέγχει την ταχύτητά του. Τα φιλτραρισμένα καυσαέρια απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω μιας ψηλής καμινάδας ύψους 16 m. Επιπλέον, δύο πλατφόρμες επιθεώρησης παρέχουν εύκολη πρόσβαση στον εξοπλισμό ελέγχου εκπομπής ρύπων που είναι εγκατεστημένος στην καμινάδα.

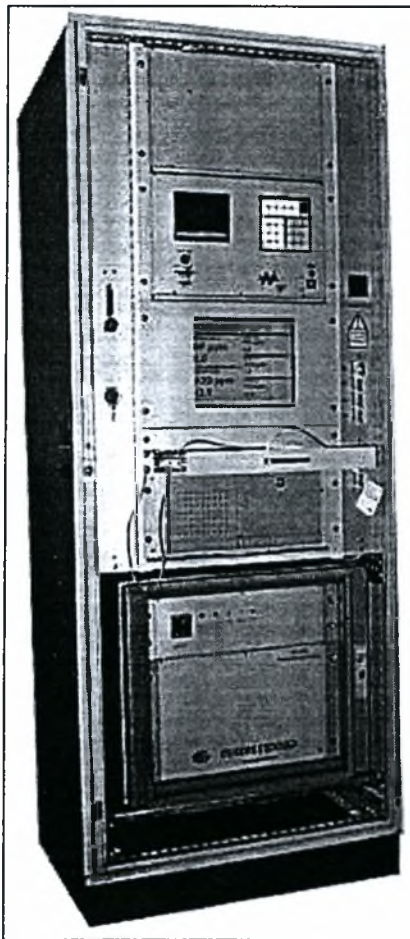


Σχήμα 3.6 – Σύστημα καθαρισμού φίλτρων

### 3.2.2.9 Σύστημα συνεχούς ελέγχου εκπομπής ρύπων (CEMS)

Ένα σύστημα συνεχούς ελέγχου εκπομπής ρύπων (Continuous Emission Monitoring System, CEMS) είναι εγκατεστημένο στην εγκατάσταση για να ελέγχει την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας των συστημάτων, την απόδοση της καύσης, την καλή λειτουργία του συστήματος έγχυσης μέσω ξηράς προσρόφησης καθώς επίσης και την κατάσταση του φίλτρου κεραμικών ινών. Οι παραπάνω παράμετροι είναι πολύ χρήσιμοι για το συντονισμό των υποσυστημάτων της εγκατάστασης. Όλα τα δεδομένα του συλλέγουν οι μετρητές του CEMS επεξεργάζονται από το Scada το οποίο υπολογίζει τα μετρούμενα μεγέθη σε κανονικές συνθήκες, αναπαριστά γραφικά και καταγράφει το σύνολο των μετρήσεων. Το σύστημα συνεχούς ελέγχου εκπομπής ρύπων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.





Σχήμα 3.7 – Σύστημα συνεχούς ελέγχου εκπομπής ρύπων (CEMS)

#### 3.2.2.10 Αέριοι ρύποι

Ο έλεγχος των αέριων ρύπων πραγματοποιείται με ένα αναλυτή μη διασκορπούμενης υπεριώδους ακτινοβολίας (Non-Dispersive Infrared Radiation, NDIR). Ένα ακροσωλήνιο είναι εγκατεστημένο στην καμινάδα. Μέσω ενός θερμαινόμενου φίλτρου και μιας θερμαινόμενης γραμμής, το δείγμα των καυσαερίων αναρροφάται από μια αντλία μεμβράνης στο θάλαμο του αναλυτή σε θερμοκρασία περίπου 180 °C. Στη συνέχεια το δείγμα των καυσαερίων ψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία των 3 °C. Προκειμένου να αποτραπεί η συμπύκνωση του SO<sub>2</sub> στην ψυκτική μονάδα, μια συγκεκριμένη ποσότητα H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> εγχέεται στο δείγμα. Το πρώτο κανάλι του αναλυτή μετρά το επίπεδο των CO, SO<sub>2</sub>, και O<sub>2</sub> ενώ το δεύτερο κανάλι το επίπεδο των NO<sub>x</sub>. Συγκεκριμένα μια ακτίνα υπεριώδους ακτινοβολίας διαπερνά το υπό ανάλυση δείγμα. Το φασματόμετρο αναλύει το γράφημα απορρόφησης της ακτινοβολίας από τις ουσίες του δείγματος και υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των διαφορετικών συστατικών. Τα καυσαέρια τελικά, μετά το τέλος της μέτρησης, αποβάλλονται από τον αναλυτή στο περιβάλλον. Η περιεκτικότητα σε O<sub>2</sub> μετριέται

από ένα ηλεκτροχημικό κελί. Τέλος, ο κλειστός χώρος που είναι τοποθετημένος ο αναλυτής αερίων είναι εξοπλισμένος με μια μονάδα κλιματισμού, προκειμένου να διατηρούνται σταθερές οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.

Ο NDIR-αναλυτής υπολογίζει τη συγκέντρωση των αερίων συστατικών (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>2</sub>) στα καυσαέρια κάθε δύο λεπτά. Αυτές οι τιμές (σε mg / Nm<sup>3</sup>) καταγράφονται από το σύστημα Scada και παριστάνονται γραφικά. Οι οριακές τιμές καθώς και το εύρος μέτρησης για τα αέρια συστατικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Συστατικό	Οριακή Τιμή	Εύρος Τιμών
SO <sub>2</sub>	50 mg/Nm <sup>3</sup>	0 – 300 mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	200 mg/Nm <sup>3</sup>	0 – 400 mg/Nm <sup>3</sup>
CO	100 mg/Nm <sup>3</sup>	0 – 300 mg/Nm <sup>3</sup>
O <sub>2</sub>	10 % κ.ο	0 – 25 % κ.ο

Πίνακας 3.1 – Οριακές τιμές και εύρος τιμών του NDIR αναλυτή

Κάθε φορά που κάποιο λάθος του συστήματος προκαλεί λανθασμένη μέτρηση, το Scada ενημερώνει τους χειριστές της εγκατάστασης με ηχητικό σήμα. Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας δεν απαιτείται ανθρώπινη επέμβαση αφού όλες οι σχετικές μετρήσεις, τα μηνύματα προειδοποίησης και τα ηχητικά σήματα μεταφέρονται αυτόματα στο Scada. Ένα δοχείο με συμπιεσμένο αέρα χρησιμοποιείται για την αυτόματη τακτική βαθμονόμηση του αναλυτή δύο φορές την ημέρα, διαδικασία που διαρκεί περίπου δέκα λεπτά. Επιπλέον, δύο φορές το μήνα πραγματοποιείται εκτεταμένη βαθμονόμηση του αναλυτή.

### 3.2.2.11 Σωματίδια

Η μέτρηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στα καυσαέρια είναι βασισμένη στην αρχή της ανάκλασης του φωτός και πραγματοποιείται στην καμινάδα. Μια ακτίνα φωτός προβάλλεται στο ρεύμα των καυσαερίων που διατρέχουν την καμινάδα. Ο μετρητής σωματιδίων παράγει ένα συνεχές αναλογικό σήμα ανάλογο προς το ποσό του φωτός που ανακλάται από τα σωματίδια που περιέχονται στα καυσαέρια. Το ποσό του φωτός που ανακλάται είναι ανάλογο προς τη συγκέντρωση των σωματιδίων, αλλά εξαρτάται επίσης από τον τύπο τους (χρώμα, μέγεθος). Επομένως το όργανο ελέγχου είναι βαθμονομημένο για τον συγκεκριμένο τύπο σωματιδίων που παράγονται στην διεργασία. Η συγκέντρωση (σε mg/Nm<sup>3</sup>) καταγράφεται από το σύστημα Scada και παριστάνεται γραφικά. Κάθε φορά που κάποιο λάθος του συστήματος προκαλεί λανθασμένη μέτρηση ή η συγκέντρωση των σωματιδίων ξεπεράσει την οριακή τιμή, το Scada ενημερώνει τους χειριστές της

εγκατάστασης με ηχητικό σήμα. Η οριακή τιμή του οργάνου ελέγχου είναι  $10 \text{ mg/Nm}^3$  ενώ το εύρος τιμών του  $0 - 100 \text{ mg/Nm}^3$ . Κάθε τέσσερις ώρες το μετρητικό όργανο πραγματοποιεί αυτόματα μια δοκιμή που περιλαμβάνει σύγκριση με μέτρηση αναφοράς, έλεγχο επικάθισης ακαθαρσιών και τακτική βαθμονόμηση που διαρκεί περίπου έξι λεπτά. Τα όργανα μέτρησης είναι τοποθετημένα με φλάντζα άμεσα στην καμινάδα. Ένα σύστημα ανεμιστήρων παρέχει καθαρό αέρα για να ψύξει τα οπτικά όργανα μέτρησης και να αποτρέψει την επικάθιση ακαθαρσιών. Μια παγίδα φωτός βρίσκεται στην απέναντι πλευρά της καμινάδας για να αποτρέψει λανθασμένες μετρήσεις λόγω της αντανάκλασης του φωτός.

### 3.2.2.12 Τιμές αναφοράς: πίεση, θερμοκρασία, παροχή

Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των ρύπων είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η παροχή των καυσαερίων στην καμινάδα. Επομένως έχει εγκατασταθεί ένα σύστημα μέτρησης της ροής των καυσαερίων. Ένα ακροσωλήνιο ANNUBAR με πολλαπλά διαφορετικά σημεία μέτρησης υπολογίζει κατά μέσο όρο την παροχή κατά μήκος της καμινάδας βασισμένο στην αρχή των σωλήνων Pitot μετρώντας τη διαφορά μεταξύ της δυναμικής και της στατικής πίεσης. Επιπλέον, ένα θερμοστοιχείο μετράει τη θερμοκρασία προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός των μετρούμενων συγκεντρώσεων στην καμινάδα σε σταθερές, προεπιλεγμένες συνθήκες. Το σύστημα Scada υπολογίζει την παροχή (σε  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ) λαμβάνοντας υπόψη τη διάμετρο της καμινάδας, τη θερμοκρασία την διαφορά στατικής και δυναμικής πίεσης.

## 3.2.3 Feeding Systems

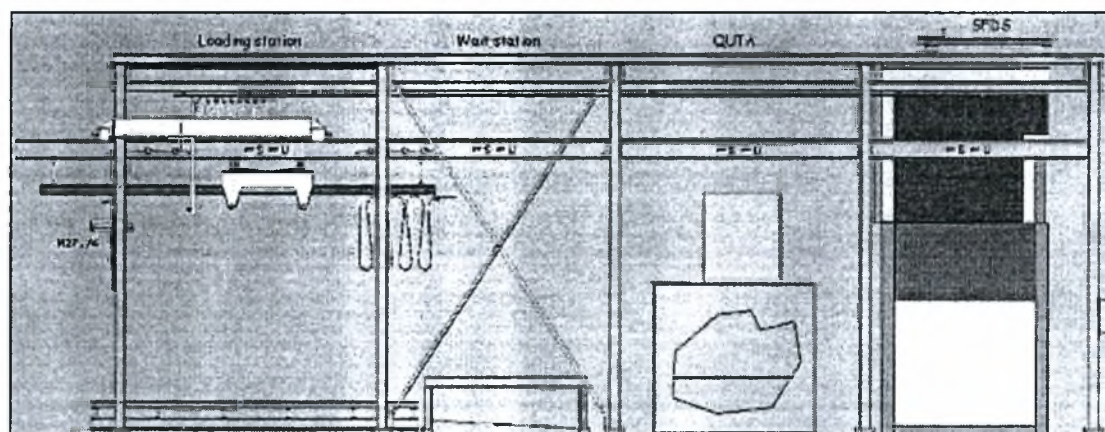
Η τροφοδοσία των υπό επεξεργασία μεταλλικών εξαρτημάτων στην εγκατάσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες
- Συνεχές σύστημα τροφοδοσίας

### 3.2.3.1 Material Handling System (MHDL)

Η επεξεργασία των εξαρτημάτων σε παρτίδες ονομάζεται Material Handling System (MHDL). Συγκεκριμένα, μεγάλα μεταλλικά καλάθια με όγκο λίγο μικρότερο από τη δεξαμενή της ρευστομηχανικής κλίνης και με συγκεκριμένο αριθμό μεταλλικών εξαρτημάτων, ανάλογο με τον τύπο τους, εισάγονται με αυτοματοποιημένο σύστημα σ' αυτή. Η επεξεργασία διαρκεί περίπου μία ώρα. Το σύστημα αποτελείται από έναν πλήρως αυτοματοποιημένο γερανό τύπου γέφυρας

εξοπλισμένο με μια ανυψωτική συσκευή σε διάταξη ψαλιδιού. Ο γερανός κινείται σε μεταλλικές ράγες με τη χρήση κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας. Η ανυψωτική διάταξη διαθέτει κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας για την ανύψωση, την σύζευξη και την απαγκίστρωση των καλάθων, τον προσδιορισμό της θέσης και την εξισορρόπηση των φορτωμένων καλάθων. Επομένως, το σύστημα εξασφαλίζει τον εύκολο και ασφαλή χειρισμό και τη μεταφορά των καλάθων μεταξύ των διαφορετικών θέσεων επεξεργασίας της εγκατάστασης δηλαδή το σταθμό φόρτωσης-εκφόρτωσης, το σταθμό αναμονής, τη δεξαμενή νερού και τη ρευστομηχανική κλίνη. Ο γερανός ελέγχεται πλήρως από το Scada μειώνοντας στο ελάχιστο την ανθρώπινη επέμβαση κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το μέγιστο βάρος των μεταλλικών εξαρτημάτων στα καλάθια είναι 3125 kg. Το Material Handling System (MHDL) όπως σχηματικά απεικονίζεται μέσω του Scada παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.

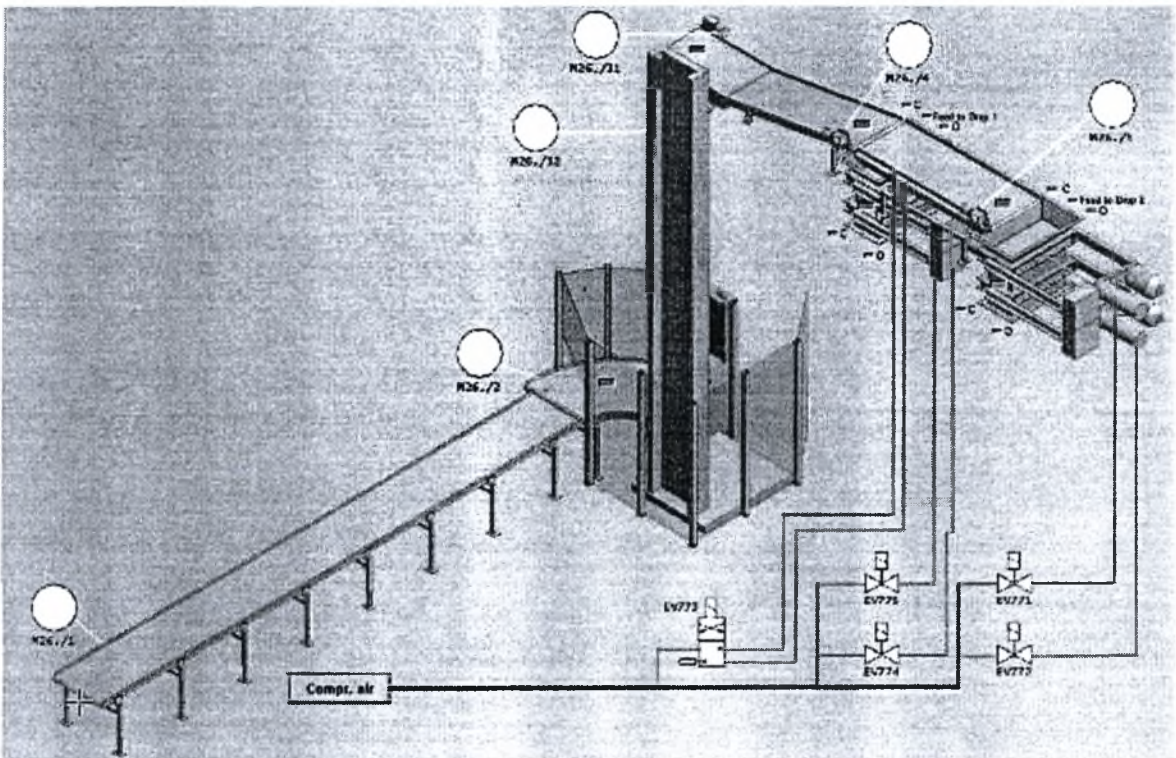


Σχήμα 3.8 – Απεικόνιση του Material Handling System (MHDL)

### 3.2.3.2 Continuous Part Feeding Equipment (CPFE)

Η επεξεργασία των εξαρτημάτων με συνεχές σύστημα τροφοδοσίας ονομάζεται Continuous Part Feeding Equipment (CPFE). Συγκεκριμένα, ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ιμάντων μεταφοράς τροφοδοτεί με μεταλλικά εξαρτήματα την ρευστομηχανική κλίνη. Το σύστημα τροφοδοσίας αποτελείται από ένα ιμάντα μεταφοράς, ένα ανελκυστήρα και δύο μικρούς ιμάντες μεταφοράς και τελικής διανομής. Τα εξαρτήματα τροφοδοτούνται στην ρευστομηχανική κλίνη μέσω δύο μικρών θυρών εισαγωγής στην κορυφή του θαλάμου καύσης και καταλήγουν σε μεταλλικό καλάθι που είναι τοποθετημένο στην ρευστομηχανική κλίνη. Η επεξεργασία διαρκεί περίπου τρεις ώρες και εκμεταλλεύεται πλήρως την ικανότητα της διάταξης για αφαίρεση-πυρόλυση του οργανικού υλικού αφού διαχειρίζεται στιγμιαία μικρότερη ποσότητα φορτίου. Το καλάθι εξέρχεται της κλίνης όταν επεξεργαστεί δεδομένος

αριθμός εξαρτημάτων, ανάλογος με τον τύπο τους, με τη χρήση του αυτοματοποιημένου συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω. Οι θύρες εισαγωγής είναι εξοπλισμένες με διπλές θυρίδες για να αποτρέπουν την φυγή των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης. Επιπλέον, διαθέτουν βαλβίδες οι οποίες στην περίπτωση που εμφανιστεί πρόβλημα στην τροφοδοσία των διπλών θυρίδων κατακράτησης καυσαερίων με ηλεκτρική ενέργεια ή συμπιεσμένο αέρα κλείνουν αυτόματα τις θύρες εισαγωγής. Το Continuous Part Feeding Equipment (CPFE) όπως σχηματικά απεικονίζεται μέσω του Scada παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 – Απεικόνιση του Continuous Part Feeding Equipment (CPFE)

### 3.2.4 Quenching tank (QUTA) and Reactor Medium Recovery System (RMRS)

Η δεξαμενή ψύξης είναι ουσιαστικός εξοπλισμός στην επεξεργασία των μεταλλικών εξαρτημάτων για δύο κύριους λόγους:

- Τα μεταλλικά εξαρτήματα μετά την επεξεργασία αφαίρεσης του λάστιχου στη ρευστομηχανική κλίση έχουν θερμοκρασία 500 °C και ψύχονται περίπου στους 50 °C προκειμένου να είναι εύκολος ο χειρισμός τους χωρίς να λαμβάνονται σημαντικές προφυλάξεις ασφάλειας.

- Με την εμβάπτιση των μεταλλικών εξαρτημάτων στο νερό και την ψύξη τους από 500 °C σε 50 °C σε μικρό χρονικό διάστημα οι μηχανικές ιδιότητες επανακτούνται.

Κατά τη διάρκεια μετακίνησης του καλαθιού με τα μεταλλικά εξαρτήματα από τη ρευστομηχανική κλίνη στη δεξαμενή ψύξης μεταφέρεται επιπλέον άμμος. Αυτή η άμμος συσσωρεύεται στη δεξαμενή και πρέπει να συγκεντρωθεί και μεταφερθεί πίσω στη ρευστομηχανική κλίνη. Αυτό γίνεται με ένα σύστημα επαναφοράς, το Reactor Medium Recovery System (RMRS).

#### 3.2.4.1 Quenching Tank (QUTA)

Όταν η διεργασία αφαίρεσης του οργανικού υλικού από τα μεταλλικά εξαρτήματα στη ρευστομηχανική κλίνη ολοκληρωθεί το καλάθι που περιέχει τα επεξεργασμένα εξαρτήματα (διόπτρες, πέλματα, πύροι) μεταφέρεται και βυθίζεται στη δεξαμενή ψύξης όπου και παραμένει λίγα λεπτά. Στην περίπτωση που τα εξαρτήματα είναι μόνο από χάλυβα δεν απαιτείται προθέρμανση της δεξαμενής. Για εξαρτήματα από αλουμίνιο το νερό της δεξαμενής ψύξης θερμαίνεται στους 70 °C με άμεσο ψεκάσμο ατμού ο οποίος παράγεται από μια γεννήτρια ατμού. Επιπλέον, η δεξαμενή ψύξης διαθέτει ένα πολύπλοκο σύστημα ανάδευσης του νερού. Έτσι το νερό κινείται αρκετά γρήγορα ώστε να σπάσει όλες τις φυσαλίδες ατμού που δημιουργούνται στην επιφάνεια των εξαρτημάτων κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης. Αυτό είναι απαραίτητο για την άμεση ψύξη και ανάκτηση των ιδιοτήτων των μεταλλικών εξαρτημάτων. Τέλος, η απότομη μείωση της θερμοκρασίας, η δυναμική της τοπικής εξάτμισης του νερού και το ενσωματωμένο σύστημα ανάδευσης συντελούν στον καθαρισμό των επεξεργασμένων εξαρτημάτων.

Η δεξαμενή ψύξης αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

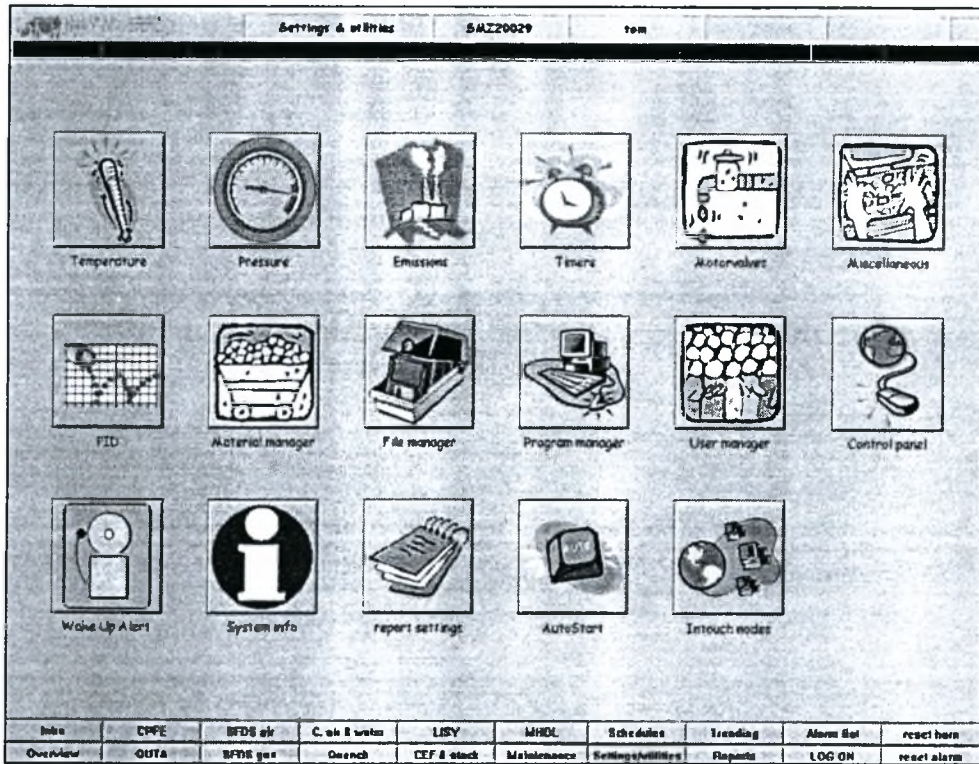
- Εσωτερική δεξαμενή από ανοξείδωτο χάλυβα που περιέχει το νερό, σύστημα άμεσου ψεκάσμου ατμού με την απαραίτητη βαλβίδα πίεσης, σωληνώσεις μεταφοράς με ρυθμιστή θερμοκρασίας για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού.
- Σύστημα παροχής κρύου νερού για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού και τον περιορισμό της παραγωγής ατμού κατά την ψύξη των μεταλλικών εξαρτημάτων.
- Σύστημα ανάδευσης με εμφύσηση αέρα.
- Τη βάση για τη στήριξη του συστήματος επαναφοράς (RMRS).
- Σύστημα αγωγών για τον έλεγχο της στάθμης του νερού, την αποφυγή υπερχείλισης και την πλήρη εκκένωση της δεξαμενής για συντήρηση.
- Μόνωση ενάντια στις υψηλές θερμοκρασίες.

### 3.2.4.2 Reactor Medium Recovery System (RMRS)

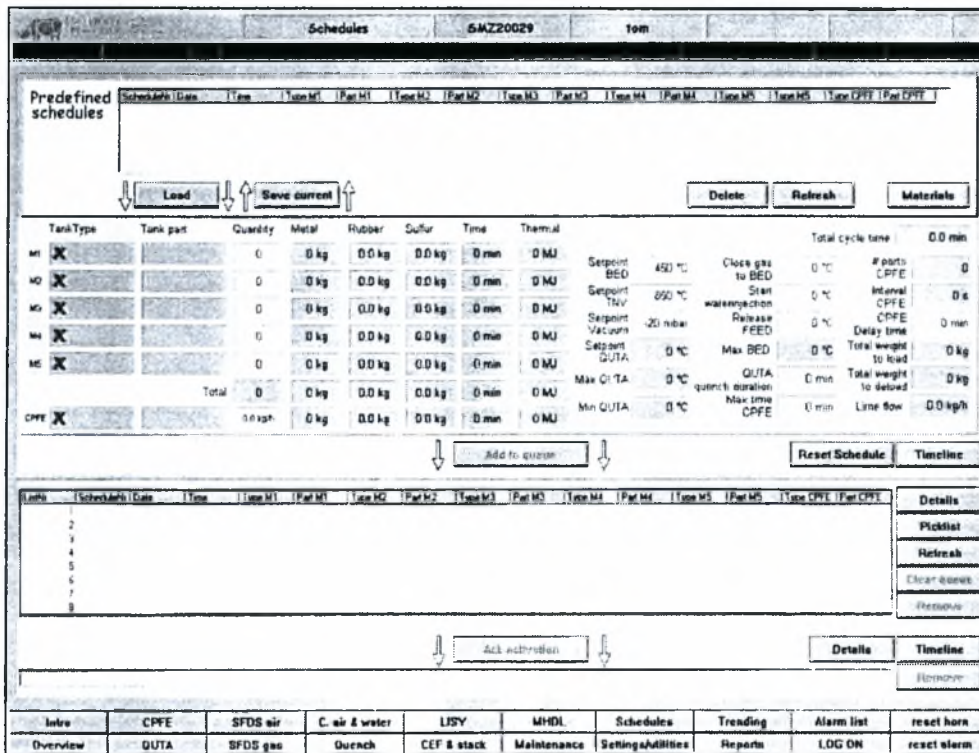
Προκειμένου να αποφευχθεί η συσσώρευση της άμμου και άλλων μικρών μεταλλικών εξαρτημάτων στον πυθμένα της δεξαμενής ένα σύστημα μεταφοράς με αλυσίδες είναι εγκατεστημένο. Το σύστημα «ξύνει» τη συγκεντρωμένη άμμο σε μια κεκλιμένη επιφάνεια απομακρύνοντάς τη από το νερό. Η λειτουργία του ξεκινά περίπου δέκα λεπτά αφότου ένα καλάθι τοποθετηθεί στη δεξαμενή ψύξης, χρόνος απαραίτητος για την κατακάθιση της άμμου. Η άμμος που συγκεντρώνεται από το σύστημα επαναφοράς μεταφέρεται κατόπιν στη ρευστομηχανική κλίνη. Κατά τη μεταφοράς της ελέγχεται από ένα μόνιμο ηλεκτρομαγνήτη για την κατακράτηση των μεταλλικών εξαρτημάτων που είναι πιθανό να περιέχονται στην άμμο και μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργία στην ρευστομηχανική κλίνη. Με τον τρόπο αυτό η κατανάλωση άμμου μειώνεται στο ελάχιστο.

### 3.2.5 Controls system (CTRL)

Το σύστημα ελέγχων αποτελείται από δύο PC και ένα PLC (Programmable Logical Controllers) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε δίκτυο. Η λειτουργία του συστήματος πραγματοποιείται με το SCADA (Supervision, Control, and Data Acquisition system) που είναι εγκατεστημένο στα δύο PC. Το λογισμικό Scada είναι Wonderware Factorysuite 2000 υπολογιστικό πρόγραμμα αναπτυγμένο σε Windows 2000. Ο πίνακας ελέγχου είναι δομημένος γύρω από τα δύο PC. Το σύστημα Scada είναι μια εφαρμογή που λειτουργεί και συλλέγει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο τα οποία προέρχονται από τις μετρήσεις των διατάξεων ελέγχου της εγκατάστασης. Η έναρξη και η παύση λειτουργίας της εγκατάστασης ή η μεμονωμένη διαχείριση των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων πραγματοποιείται μέσω του συστήματος Scada. Η βασική μορφή του προγράμματος όπως εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή καθώς και η μορφή λειτουργίας του απεικονίζεται στα Σχήμα 3.10 και Σχήμα 3.11 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.10 – Βασική μορφή του Scada



Σχήμα 3.11 – Μορφή λειτουργίας του Scada

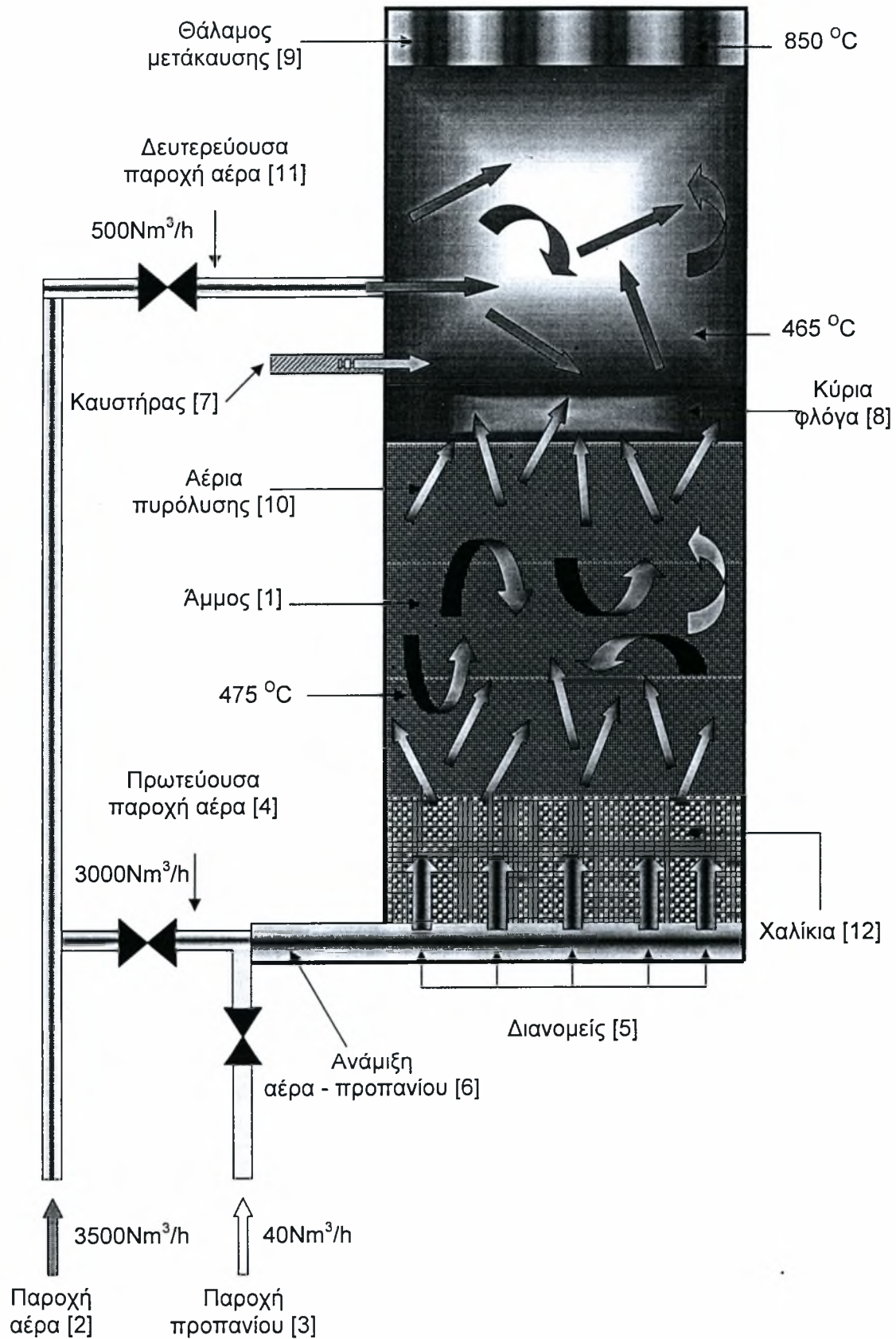


### 3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το “Seghers Fluidised Bed Degrader System” (SFDS) είναι μια εγκατάσταση καύσης δύο σταδίων για την αφαίρεση των υπολείμμάτων ελαστικού από μεταλλικά εξαρτήματα πολύ γρήγορα και με τρόπο περιβαλλοντικά αποδεκτό. Η αρχή λειτουργίας της στηρίζεται στη θεωρία της ρευστομηχανικής κλίνης. Εντούτοις, τα επιμέρους στοιχεία της διεργασίας κατατάσσουν τη συγκεκριμένη εγκατάσταση σε μια υπερβολικά περιορισμένη ομάδα μόλις τριών παρόμοιων εγκαταστάσεων παγκοσμίως. Ο συνδυασμός της φύσης του υλικού που συμμετέχει στη διεργασία (λάστιχο) και της ανάγκης για ανάκτηση των μεταλλικών εξαρτημάτων καθιστούν την διεργασία σύνθετη και αρκετά διαφοροποιημένη από τις συνήθεις διεργασίες ρευστομηχανικής κλίνης.

#### 3.3.1 Αρχή λειτουργίας

Οι κύριες διατάξεις του “Seghers Fluidised Bed Degrader System” (SFDS), δηλαδή η δεξαμενή της ρευστομηχανικής κλίνης και ο θάλαμος καύσης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.12. Το σύστημα αφαίρεσης του λάστιχου από τα μεταλλικά εξαρτήματα αποτελείται από μια δεξαμενή που είναι γεμάτη με ειδική άμμο σταθερής κοκκομετρικής συστάσεως [1] και από δύο κύριους αγωγούς παροχής αέρα [2] και αερίου καύσης – προπανίου [3]. Η πρωτεύουσα παροχή αέρα [4] εμφυσάται στη ρευστομηχανική κλίνη στο πυθμένα μέσω ενός διανομέα [5] ούτως ώστε να ρευστοποιήσει τη μάζα της άμμου. Για να θερμανθεί η ρευστομηχανική κλίνη αναμιγνύεται προπάνιο με την πρωτεύουσα παροχή αέρα [6]. Το μίγμα αέρα – προπανίου αναφλέγεται επάνω από την επιφάνεια της κλίνης με τη βοήθεια ενός καυστήρα [7]. Σαν αποτέλεσμα της χαμηλής ταχύτητας του αέρα δια μέσου της κλίνης η κύρια φλόγα [8] εξαπλώνεται σε όλη την επιφάνεια της κλίνης. Κατ’ αυτό τον τρόπο και χάρις στον μεγάλο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της άμμου, η ρευστομηχανική κλίνη θερμαίνεται ομοιόμορφα στη θερμοκρασία των  $\pm 450$  °C με επαφή της άμμου με τη φλόγα.

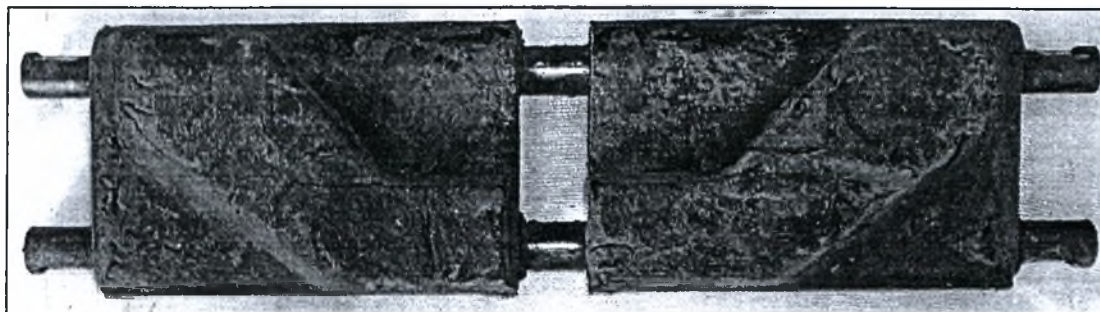


Σχήμα 3.12 – Απεικόνιση της δεξαμενής ρευστομηχανικής κλίνης και του θαλάμου καύσης

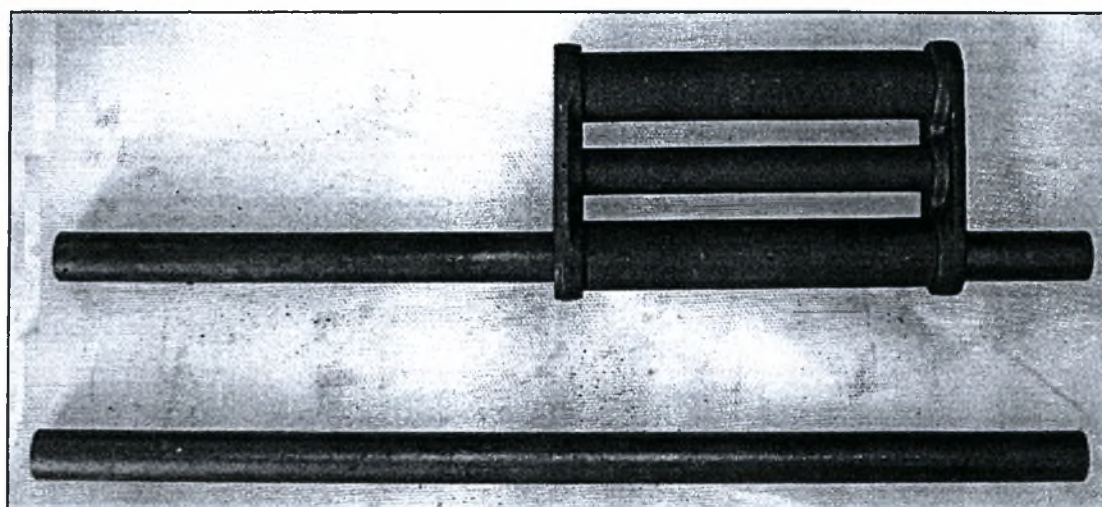
Η δεξαμενή περιλαμβάνει ένα θάλαμο μετάκαυσης [9] πάνω από την επιφάνεια της κλίνης. Η απαέρωση των οργανικών ουσιών από το λάστιχο των μεταλλικών εξαρτημάτων γίνεται μέσα στη μάζα της άμμου. Τα αέρια της πυρόλυσης [10] που απελευθερώνονται καίγονται στο θάλαμο μετάκαυσης μαζί με το μίγμα αέρα – προπανίου. Περαιτέρω, μια άλλη ποσότητα αέρα, η δευτερεύουσα παροχή αέρα [11] διοχετεύεται εφαιπτομενικά για να εξασφαλιστεί η πλήρης καύση μέσω της ανάμιξης με τα προαναφερθέντα αέρια. Η ανάφλεξη αυτού του μίγματος εξασφαλίζεται από τη μόνιμη φλόγα των αερίων στην επιφάνεια της κλίνης. Τέλος, ένα στρώμα από χαλίκια [12] συγκεκριμένου τύπου χρησιμοποιείται για την προστασία των διανομέων από την άμμο και την θερμοκρασία.

### 3.3.2 Σκοπός της διεργασίας

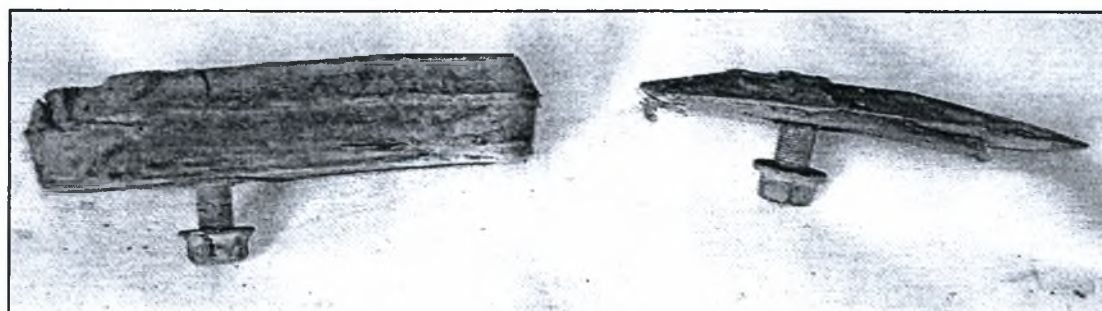
Η εγκατάσταση της ρευστομηχανικής κλίνης τροφοδοτείται με μεταλλικά εξαρτήματα τα οποία αποτελούν στοιχεία της ερπύστριας των αρμάτων μάχης και στα οποία είναι βουλκανισμένη κάποια ποσότητα ελαστικού για την καλύτερη πρόσφυση της ερπύστριας στο έδαφος. Σκοπός της διεργασίας είναι η απομάκρυνση μέσω πυρόλυσης του ελαστικού σε συγκεκριμένη περιοχή θερμοκρασιών, περίπου 450 °C και η ανάκτηση των μεταλλικών εξαρτημάτων. Η θερμοκρασία δεν μπορεί να υπερβεί την προαναφερθείσα περιοχή γιατί επέρχεται φθορά στα μεταλλικά εξαρτήματα τα οποία προορίζονται, μετά από βουλκανισμό, για νέα χρήση. Η διαδικασία έχει το πλεονέκτημα ότι τα μεταλλικά εξαρτήματα δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τη φλόγα, αλλά το λάστιχο πυρολύεται στο θερμικό περιβάλλον της ρευστομηχανικής κλίνης. Με τον τρόπο αυτό τα μεταλλικά εξαρτήματα δεν παραμορφώνονται ούτε χάνουν τις ιδιότητές τους. Τα μεταλλικά εξαρτήματα ονομάζονται πίροι, διόπτρες και πέλματα και παρουσιάζονται πριν και μετά την επεξεργασία στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 3.13 έως Σχήμα 3.17).



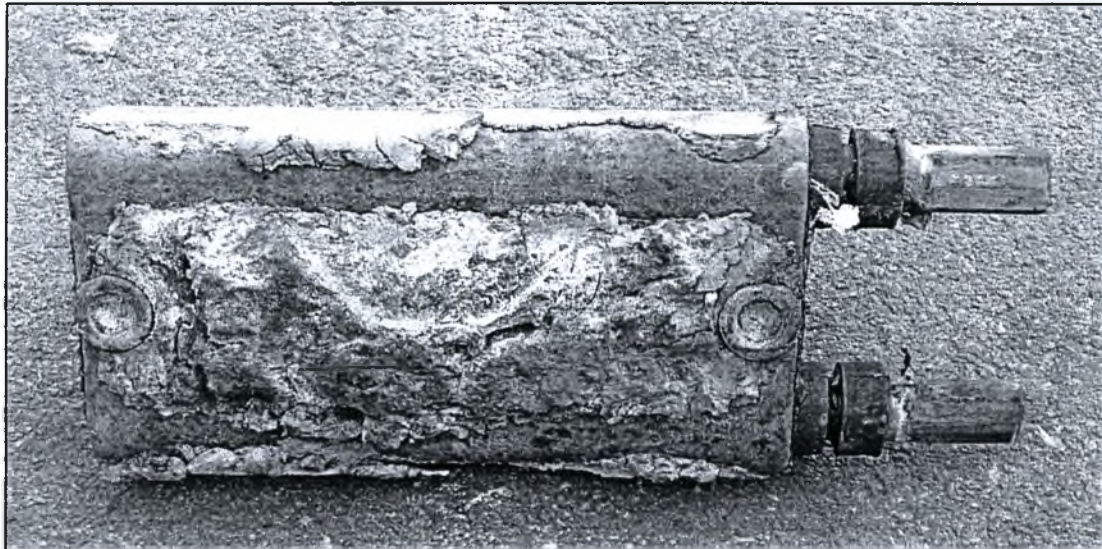
Σχήμα 3.13 – Πίροι και διόπτρες πριν την επεξεργασία



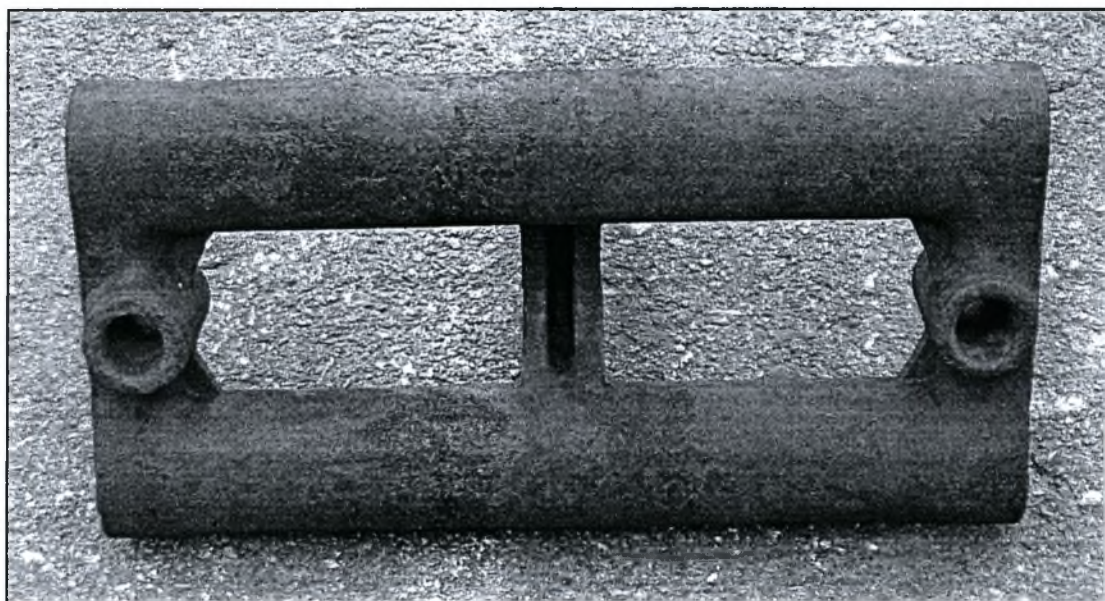
Σχήμα 3.14 – Πίροι και διόπτρα μετά την επεξεργασία



Σχήμα 3.15 – Πέλματα πριν και μετά την επεξεργασία



Σχήμα 3.16 – Πίροι και διόπτρα πριν την επεξεργασία



Σχήμα 3.17 – Διόπτρα μετά την επεξεργασία

### 3.3.3 Τροφοδοσία των εξαρτημάτων

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.2 υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι τροφοδοσίας των εξαρτημάτων στη ρευστομηχανική κλίση. Η διεργασία και στους δύο τρόπους τροφοδοσίας παραμένει η ίδια. Αυτό που αλλάζει είναι ο χρόνος που διαρκεί ο κύκλος της διεργασίας αλλά και ο τρόπος εισαγωγής των μεταλλικών εξαρτημάτων στη ρευστομηχανική κλίση.

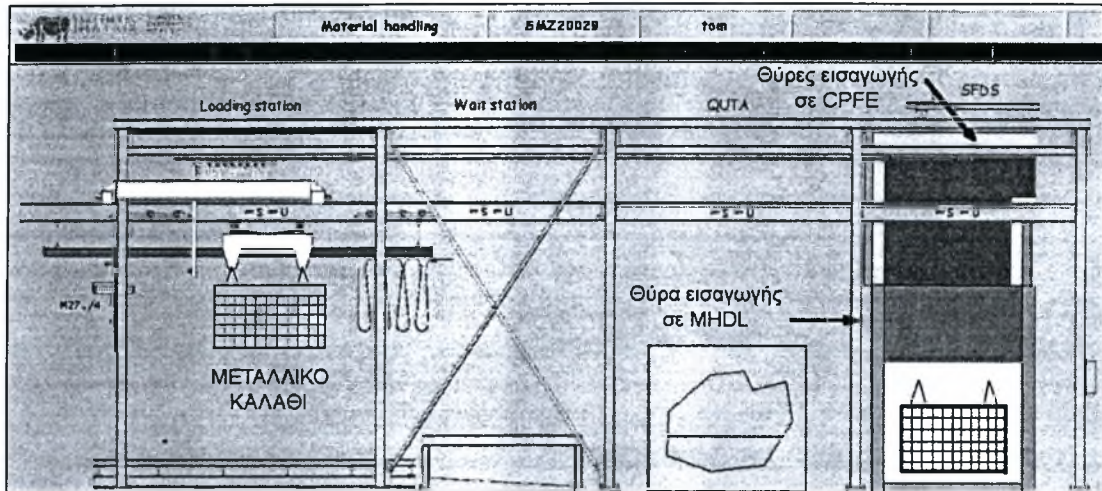
### 3.3.3.1 Σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες

Η επεξεργασία των εξαρτημάτων σε παρτίδες ονομάζεται Material Handling System (MHDL). Συγκεκριμένα, μεγάλα μεταλλικά καλάθια με όγκο λίγο μικρότερο από τη δεξαμενή της ρευστομηχανικής κλίνης και με συγκεκριμένο αριθμό μεταλλικών εξαρτημάτων, ανάλογο με τον τύπο τους, εισάγονται με αυτοματοποιημένο σύστημα σ' αυτή. Το σύστημα αποτελείται από έναν πλήρως αυτοματοποιημένο γερανό τύπου γέφυρας εξοπλισμένο με μια ανυψωτική συσκευή σε διάταξη ψαλιδιού. Ο γερανός κινείται σε μεταλλικές ράγες με τη χρήση κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας. Όταν η θερμοκρασία στη ρευστομηχανική κλίνη φθάσει τους 450 °C, τότε το πρόγραμμα Scada δίνει αυτόματα εντολή για εισαγωγή του μεταλλικού καλάθιου στην ρευστομηχανική κλίνη από την πόρτα που βρίσκεται στο μέτωπο του θαλάμου καύσης. Το καλάθι αφού εισέλθει στο θάλαμο καύσης, τοποθετείται από το γερανό μέσα στη μάζα της άμμου η οποία βρίσκεται σε κατάσταση ρευστοποίησης (σε διαφορετική περίπτωση δεν θα ήταν δυνατή η εισχώρηση του καλάθιου). Ο γερανός εξέρχεται του θαλάμου καύσης, η πόρτα κλείνει και το λάστιχο των μεταλλικών εξαρτημάτων πυρολύεται αφού καίγεται στη μάζα της άμμου απουσία οξυγόνου. Τα αέρια της πυρόλυσης καίγονται πρωτοβάθμια στο θάλαμο καύσης και δευτεροβάθμια στο θάλαμο μετάκαυσης σε θερμοκρασία περίπου 800 °C. Η επεξεργασία διαρκεί περίπου μία ώρα. Μετά το τέλος της επεξεργασίας, η πόρτα του θαλάμου καύσης ανοίγει, ο γερανός εισέρχεται και αφού αγκιστρώσει το μεταλλικό καλάθι το τοποθετεί στη δεξαμενή ψύξης. Τα μεταλλικά εξαρτήματα μετά τη δεξαμενή ψύξης τοποθετούνται σε μεταλλικούς κάδους για να οδηγηθούν στην εγκατάσταση αμμοβολής. Όταν η θερμοκρασία της κλίνης επανέλθει στους 450 °C ο κύκλος της επεξεργασίας επαναλαμβάνεται με την εισαγωγή του μεταλλικού καλάθιου με νέα εξαρτήματα. Η διάταξη του συστήματος τροφοδοσίας σε παρτίδες απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18.

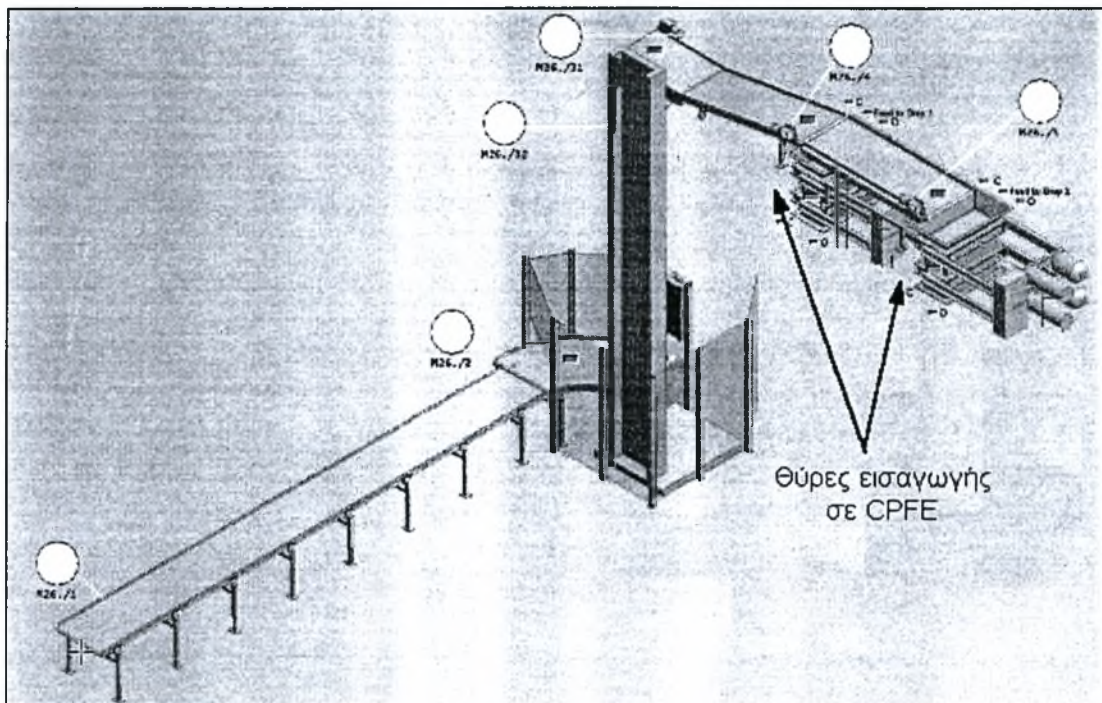
### 3.3.3.2 Συνεχές σύστημα τροφοδοσίας

Η επεξεργασία των εξαρτημάτων με συνεχές σύστημα τροφοδοσίας ονομάζεται Continuous Part Feeding Equipment (CPFE). Συγκεκριμένα, ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ιμάντων μεταφοράς τροφοδοτεί με μεταλλικά εξαρτήματα την ρευστομηχανική κλίνη. Το σύστημα τροφοδοσίας αποτελείται από ένα ιμάντα μεταφοράς, ένα ανελκυστήρα και δύο μικρούς ιμάντες μεταφοράς και τελικής διανομής. Τα εξαρτήματα εισέρχονται στην ρευστομηχανική κλίνη κάθε 30 sec περίπου (ένα κάθε φορά) μέσω δύο μικρών θυρών εισαγωγής στην κορυφή του θαλάμου καύσης και καταλήγουν σε μεταλλικό καλάθι που είναι τοποθετημένο στην ρευστομηχανική κλίνη. Η επεξεργασία διαρκεί περίπου τρεις ώρες. Το καλάθι

εξέρχεται της κλίνης όταν επεξεργαστεί δεδομένος αριθμός εξαρτημάτων, ανάλογος με τον τύπο τους, με τη χρήση του αυτοματοποιημένου συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω. Οι θύρες εισαγωγής είναι εξοπλισμένες με διπλές θυρίδες για να αποτρέπουν την φυγή των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης. Η διάταξη συνεχούς συστήματος τροφοδοσίας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.18 – Απεικόνιση της διεργασίας σε σύστημα τροφοδοσίας με παρτίδες



Σχήμα 3.19 – Απεικόνιση της διεργασίας σε συνεχές σύστημα τροφοδοσίας

### 3.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ PM<sub>10</sub>

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης πραγματοποιήθηκαν με το DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 της εταιρείας TSI. Το DustTrak είναι ένα laser φωτόμετρο το οποίο μετράει και καταγράφει τις συγκεντρώσεις της σωματιδιακής ύλης σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών χώρων και διεργασιών, από εσωτερικούς χώρους κατοικιών και γραφείων έως βιομηχανικούς χώρους και εξωτερικό περιβάλλον. Οι πραγματοποιήσιμες μετρήσεις της συγκέντρωσης εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο στην ψηφιακή οθόνη του οργάνου ενώ παράλληλα αποθηκεύονται στη μνήμη του. Τα αποθηκευμένα δεδομένα μπορούν στη συνέχεια να επεξεργαστούν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη χρήση του TrakPro Data Analysis Software. Το DustTrak παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20 – DustTrak Aerosol Monitor, Model 8520

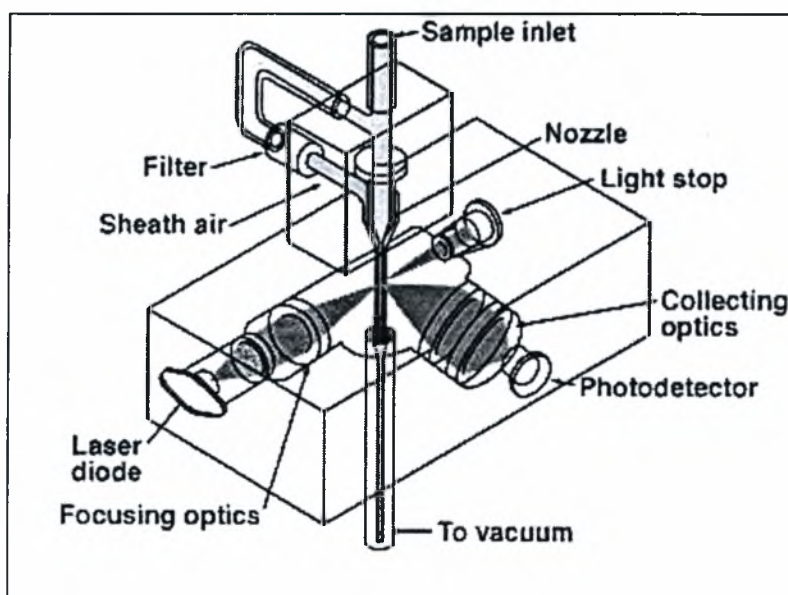
#### 3.4.1 Αρχή λειτουργίας

Το DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 χρησιμοποιεί την τεχνολογία της σκέδασης του φωτός για να υπολογίσει μαζικές συγκεντρώσεις της σωματιδιακής ύλης σε πραγματικό χρόνο. Μέσω ενός ακροφυσίου εισέρχεται στο θάλαμο ανίχνευσης με συνεχή αναρρόφηση δείγμα του αέρα του περιβάλλοντος. Μια συσκευή εκπομπής δέσμης ακτινών laser σαρώνει το δείγμα του αέρα με αποτέλεσμα τα σωματίδια που περιέχονται σ' αυτό να σκεδάζουν το φως προς κάθε κατεύθυνση. Ένας φακός σε γωνία 90° συλλέγει και κατευθύνει το φως που έχει



σκεδαστεί σ' ένα ανιχνευτή φωτός. Το κύκλωμα ανίχνευσης μετατρέπει το φως σε ηλεκτρική τάση. Αυτή η τάση είναι ανάλογη της ποσότητας του φωτός που έχει σκεδαστεί και η οποία είναι κατ' επέκταση ανάλογη της μαζικής συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στο αέριο δείγμα. Η ηλεκτρική τάση αναλύεται από τον επεξεργαστή του οργάνου και αφού πολλαπλασιαστεί με μια σταθερά βαθμονόμησης εμφανίζεται στην ψηφιακή οθόνη η τιμή της μαζικής συγκέντρωσης σε μονάδες μάζας ανά όγκο ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

Τα οπτικά όργανα μέτρησης του DustTrak διατηρούνται καθαρά καθώς περιβάλλονται από ένα περίβλημα καθαρού, φιλτραρισμένου αέρα. Συγκεκριμένα, μια μικρή ποσότητα αέρα αναρροφάται από το κύριο ρεύμα του αέριου δείγματος, φιλτράρετε και στη συνέχεια επανεισάγεται στο θάλαμο ανίχνευσης δημιουργώντας ένα περίβλημα που προστατεύει τα οπτικά όργανα από επικαθίσεις σωματιδιακής ύλης. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η εξασφάλιση της ακρίβειας και της άμεσης απόκρισης του μετρητικού οργάνου στις μεταβολές της συγκέντρωσης στο αέριο δείγμα. Η αρχή λειτουργίας του οργάνου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.21.

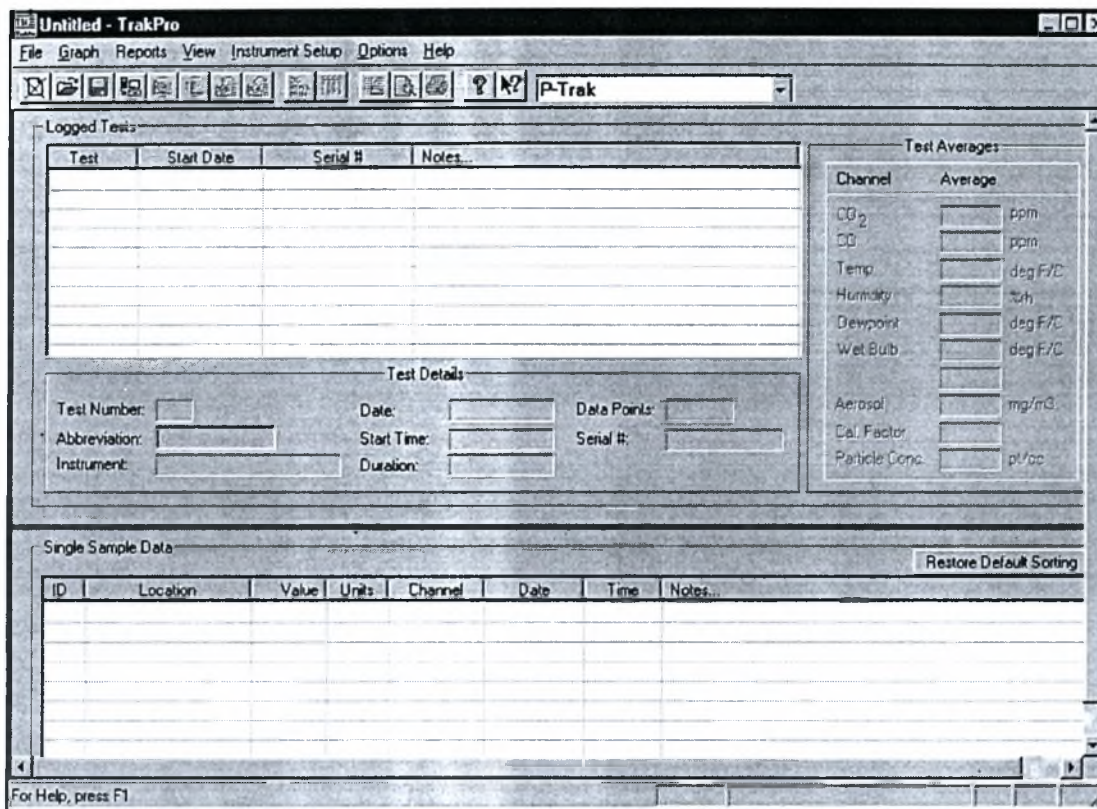


Σχήμα 3.21 – Αρχή λειτουργίας του DustTrak Aerosol Monitor

### 3.4.2 TrakPro Data Analysis Software

Το TrakPro Data Analysis Software είναι ένα λογισμικό πρόγραμμα ανεπτυγμένο σε περιβάλλον Windows το οποίο συνεργάζεται με το μετρητικό όργανο DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520. Συγκεκριμένα, είναι δυνατός ο προγραμματισμός των παραμέτρων λειτουργίας του οργάνου, η μεταφορά των μετρήσεων που είναι

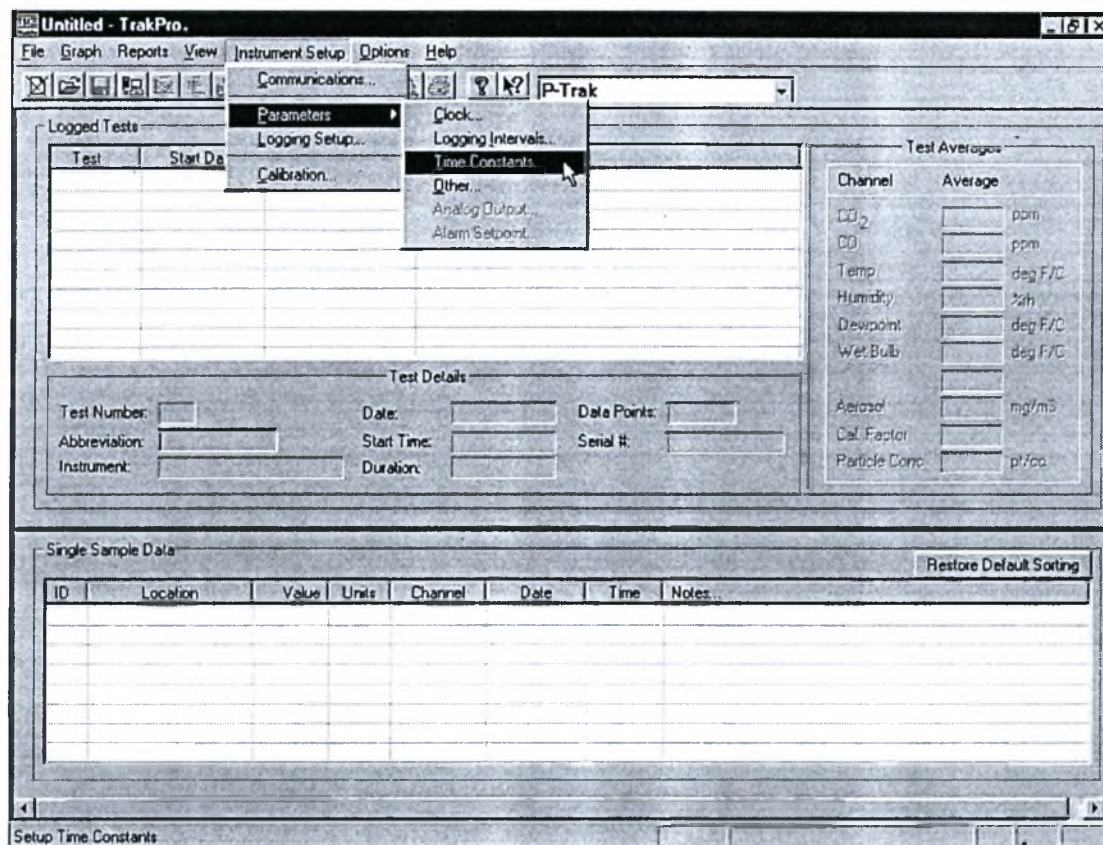
αποθηκευμένες από το όργανο στον υπολογιστή, η επεξεργασία και η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Η επικοινωνία του οργάνου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή πραγματοποιείται μέσω καλωδίου με τη σειριακή θύρα. Το βασικό “παράθυρο” λειτουργίας του λογισμικού παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22 – TrakPro Data Analysis Software

### 3.4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η πηγή εκπομπής δέσμης ακτινών laser του οργάνου DustTrak έχει μήκος κύματος 780 nm που ορίζει το μικρότερο ανιχνεύσιμο μέγεθος σωματιδιακής ύλης στα 0,1 μm. Το μέγεθος αυτό καθορίζεται με βάση του θεωρία του Mie για την σκέδαση του φωτός. Το εύρος του μεγέθους των σωματιδίων που μετρούνται είναι από 0,1 μm έως 10μm, ενώ το εύρος της μαζικής τους συγκέντρωσης είναι από 0,001 mg/m<sup>3</sup> έως 100 mg/m<sup>3</sup>. Η παροχή του συστήματος αναρρόφησης του ατμοσφαιρικού αέρα κυμαίνεται από 1,4 L/min έως 2,4 L/min με κύρια τιμή λειτουργίας τα 1,7 L/min. Η σταθερά χρόνου του οργάνου κυμαίνεται από 1 sec έως 60 sec. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε σταθερά χρόνου τα 10 sec και ορίστηκε μέσω του TrakPro Data Analysis Software όπως παρουσιάζεται στα Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23 – Επιλογή του υπομενού Time Constants

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι:

- Ο προσδιορισμός των πηγών ρύπανσης στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης.
- Η μέτρηση της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στο χώρο εργασίας.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν κυρίως μετρήσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης σε επιλεγμένα σημεία του χώρου της εγκατάστασης με τη χρήση του DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 της εταιρείας TSI. Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας του αέρα στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης με τη χρήση θερμοστοιχείου. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις δείγματος της σωματιδιακής ύλης που συγκεντρώθηκε από εναπόθεση στο χώρο εργασίας με σκοπό τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης και της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων που συνθέτουν το υπό ανάλυση δείγμα.

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΥΛΗΣ

Δείγμα της σωματιδιακής ύλης συλλέχθηκε από διαφορετικά σημεία του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης. Οι συγκεκριμένες ποσότητες έχουν εναποτεθεί σε όλη την επιφάνεια του χώρου, τόσο στο δάπεδο όσο και πάνω στην εγκατάσταση της ρευστομηχανικής κλίνης. Οι αναλύσεις της χημικής σύστασης και της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων πραγματοποιήθηκαν για τους εξής λόγους:

- Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.2 για τις επιπτώσεις της σωματιδιακής ύλης στην ανθρώπινη υγεία, εκτός από τις τιμές της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στον εισπνεόμενο αέρα πρέπει επιπλέον να ληφθεί υπ' όψιν η χημική της σύσταση αφού είναι δυνατόν να προσροφηθούν στην επιφάνειά της χημικές ενώσεις που αυξάνουν την τοξικότητα ή ενεργητικότητα της σωματιδιακής ύλης.
- Στο χώρο που πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις υπήρχαν εμφανή στοιχεία της ύπαρξης σημαντικών ποσοτήτων σωματιδιακής ύλης με φυσικές ιδιότητες παραπλήσιες του κάρβουνου σε λεπτό διαμερισμό (μαύρο χρώμα, έντονη βαφή σε κάθε επιφάνεια που εναποτίθεται). Σκοπός της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων του δείγματος ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι μετρήσεις της συγκέντρωσης  $PM_{10}$  με τη χρήση του DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 αποτυπώνουν την πραγματική εικόνα της σωματιδιακής ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης.



Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την πολύτιμη βοήθεια του Επίκουρου Καθηγητή κ. Ανδρίτσου με τις μεθόδους της Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X – ray Spectroscopy (EDS), Elementary Analysis of Carbon and Hydrogen.

## 4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΥΛΗΣ

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Μετρήσεις για τον εντοπισμό των πιθανών πηγών ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης.
- Μετρήσεις για τον έλεγχο της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στο αέριο περιβάλλον του χώρου εργασίας και τον προσδιορισμό του πιθανού κινδύνου της υγείας των εργαζομένων.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινίσουμε την διαφορά του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης με τον χώρο εργασίας. Με τον πρώτο όρο θεωρούμε το συνολικό χώρο που περικλείεται από το μεταλλικό στέγαστρο και στον οποίο περιλαμβάνεται η εγκατάσταση της ρευστομηχανικής κλίνης και όλα τα υπόλοιπα συστήματα που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3.2. Με το δεύτερο όρο ονομάζουμε μια περιορισμένη περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 και Σχήμα 3.2 του Κεφαλαίου 3.1 με τον συμβολισμό “Load – Unload” και στην οποία περιοχή εργάζονται κυρίως οι εργαζόμενοι της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια διαχείρισης των μεταλλικών εξαρτημάτων.

#### 4.3.1 Μετρήσεις για τον εντοπισμό των πιθανών πηγών ρύπανσης

Η επιλογή των θέσεων που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για τον εντοπισμό των πιθανών πηγών ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης έγινε με βάση τις παρατηρήσεις και τα σχόλια των εργαζομένων της εγκατάστασης, τις προσωπικές οπτικές παρατηρήσεις του χώρου και την μελέτη των επιμέρους διεργασιών που συνθέτουν τη συνολική επεξεργασία των μεταλλικών εξαρτημάτων δηλαδή:

- Τη μεταφορά των υπό επεξεργασία μεταλλικών εξαρτημάτων με τη χρήση οχήματος μεταφοράς (κλαρκ) στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης.
- Την τοποθέτησή τους από τους εργαζόμενους στον μεταφορικό ιμάντα συνεχούς τροφοδοσίας ή στο μεταλλικό καλάθι.
- Την επεξεργασία τους στη ρευστομηχανική κλίνη (εισαγωγή, διεργασία πυρόλυσης, εξαγωγή, ψύξη, μεταφορά στο χώρο εργασίας).
- Τη διαλογή των μεταλλικών εξαρτημάτων και το διαχωρισμό των πύρων από τις δίοπτρες.
- Την τελική διεργασία αμβολής.

Με βάση τα παραπάνω, θεωρήθηκε αρχικά ως κύρια πηγή ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης η διαδικασία εισαγωγής και εξαγωγής των μεταλλικών εξαρτημάτων στη ρευστομηχανική κλίνη. Συγκεκριμένα, κατά την διεργασία αυτή παραμένουν ανοιχτές είτε οι θυρίδες του συστήματος συνεχούς τροφοδοσίας είτε η κεντρική θύρα της ρευστομηχανικής κλίνης με αποτέλεσμα ο θάλαμος καύσης να παραμένει, στο δεδομένο χρονικό διάστημα, εκτεθειμένος στο περιβάλλον του χώρου της εγκατάστασης. Επιπλέον, γνωρίζοντας ότι η εγκατάσταση λειτουργεί με δύο διαφορετικά συστήματα τροφοδοσίας θεωρήθηκε απαραίτητο να ελεγχθεί η συνεισφορά κάθε συστήματος στη συνολική μόλυνση σε σχέση με την εισαγωγή και εξαγωγή των μεταλλικών εξαρτημάτων. Τέλος, εξαιτίας της

επεξεργασίας μεταλλικών εξαρτημάτων διαφορετικού τύπου, σχήματος και προέλευσης του βουλκανισμένου σε αυτά ελαστικού έπρεπε να ερευνηθεί πιθανή συσχέτιση συγκεκριμένου τύπου μεταλλικού εξαρτήματος με υψηλή παραγωγή σωματιδιακής ύλης.

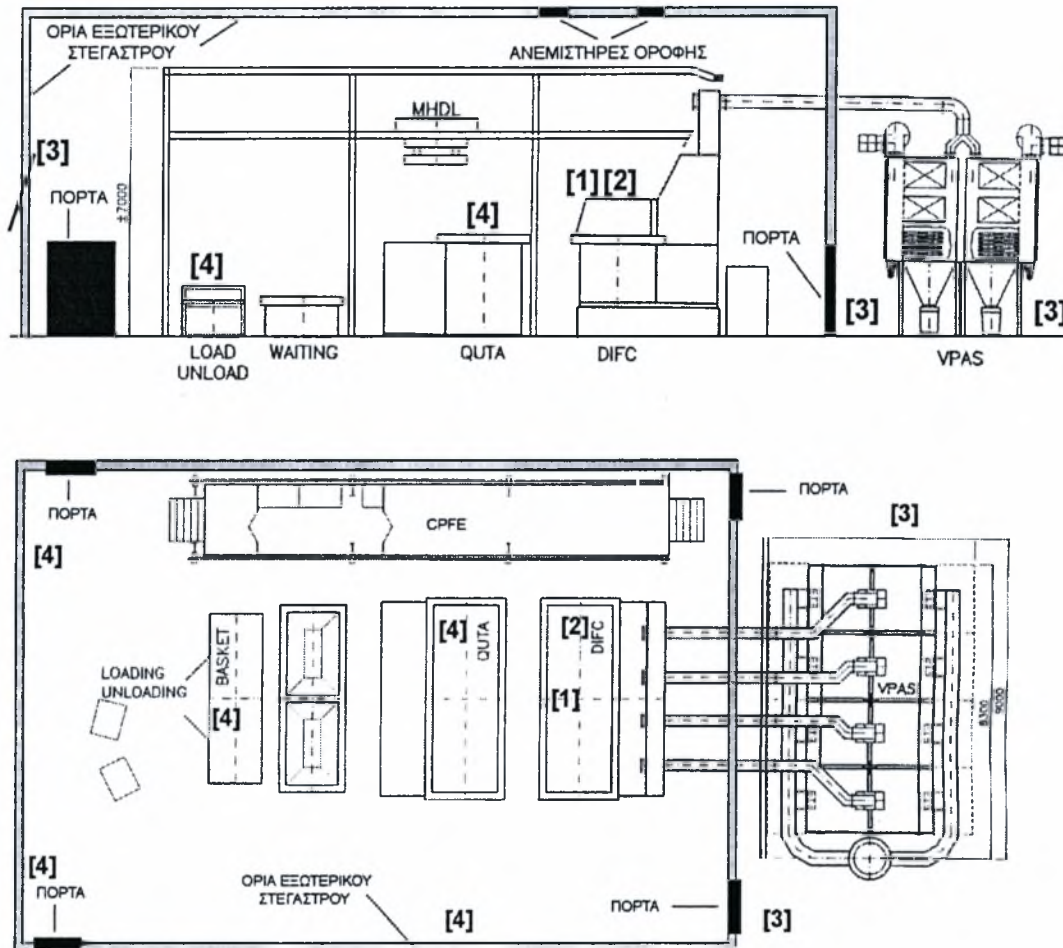
Παρ' όλα αυτά, κρίθηκε απαραίτητο να αποκλειστεί η πιθανότητα σωματιδιακή ύλη από το εξωτερικό περιβάλλον να εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο μέσω των ανοιχτών πόρτων που βρίσκονται περιμετρικά του μεταλλικού κλειστού στεγάστρου. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στον περιβάλλοντα χώρο, ενώ επιπλέον ελέγχθηκαν οι εκπομπές της καμινάδας όπως αυτές καταγράφονται μέσω του Scada με τη χρήση του μετρητή σωματιδίων που είναι εγκατεστημένος σ' αυτή και περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.2.2.11. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικές μετρήσεις σε διάφορα σημεία της εγκατάστασης, όπως στα συστήματα αμμοβολής κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους, στο χώρο εργασίας κατά την διαδικασία αφαίρεσης των πύρων από το σώμα της διόπτρας μετά την επεξεργασία των μεταλλικών εξαρτημάτων, στο χώρο εναπόθεσης των μεταλλικών εξαρτημάτων πριν και μετά την επεξεργασία, στη δεξαμενή ψύξης.

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται οι θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης με σκοπό τον προσδιορισμό των πηγών ρύπανσης στο χώρο της εγκατάστασης. Το σημείο [1] αντιστοιχεί στη θέση που βρίσκεται κεντρικά πάνω από το θάλαμο καύσης σε απόσταση δύο περίπου μέτρων από το ανώτατο σημείο της κύριας θύρας της ρευστομηχανικής κλίνης. Το σημείο [2] αντιστοιχεί στην περιοχή που βρίσκεται πάνω από το θάλαμο καύσης, στη μία από τις δύο θυρίδες του συστήματος συνεχούς τροφοδοσίας. Το σημείο [3] αντιστοιχεί σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον εξωτερικό χώρο της εγκατάστασης ενώ το σημείο [4] αντιστοιχεί σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες περιοχές στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης. Ο κύριος όγκος των μετρήσεων, για τους λόγους που παρουσιάστηκαν παραπάνω, αναφέρεται στα σημεία [1] και [2] ενώ η χρονική τους διάρκεια καλύπτει τουλάχιστον δύο κύκλους εργασίας.

#### 4.3.2 Μετρήσεις στο χώρο εργασίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ως χώρο εργασίας θεωρούμε μια περιορισμένη περιοχή του συνολικού χώρου της εγκατάστασης στην οποία οι εργαζόμενοι διαχειρίζονται τα μεταλλικά εξαρτήματα πριν και μετά την επεξεργασία τους. Η πλήρης αυτοματοποίηση της συνολικής διεργασίας περιορίζει τις κύριες εργασίες στην διαλογή και μεταφορά των εξαρτημάτων στην περιοχή "Load – Unload" που

απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1 και η οποία απέχει περίπου 10 m από τις θέσεις [1] και [2]. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στην περιοχή αυτή με χρονική διάρκεια τουλάχιστον δύο ώρες ώστε να διερευνηθεί το επίπεδο έκθεσης των εργαζομένων σε σωματιδιακή ρύπανση.



Σχήμα 4.1 – Απεικόνιση των σημείων μέτρησης της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης για τον προσδιορισμό των πηγών ρύπανσης του εσωτερικού χώρου

#### 4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Κατά την εισαγωγή και εξαγωγή των μεταλλικών εξαρτημάτων στη ρευστομηχανική κλίνη η κεντρική θύρα παραμένει ανοιχτή. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ο θάλαμος καύσης μπορεί να θεωρηθεί σαν πηγή θερμότητας στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης, αφού είναι εκτεθειμένος στον περιβάλλοντα χώρο. Η θερμοκρασία του θαλάμου καύσης είναι περίπου 450 °C ενώ του περιβάλλοντος κυμαίνεται μεταξύ 15 – 25 °C. Η θερμοκρασιακή διαφορά δημιουργεί σημαντικά ανωστικά ρεύματα μπροστά από το θάλαμο καύσης προκαλώντας την



κίνηση αερίων μαζών συνολικά στον κλειστό χώρο της εγκατάστασης. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκαν με θερμοστοιχείο με στόχο να αποτυπωθεί ένα σχετικό μέτρο των ανωστικών ρευμάτων που δημιουργεί η θερμοκρασιακή διαφορά και αποτέλεσαν την εναλλακτική προσέγγιση του ζητήματος. Τα ανωστικά ρεύματα εμφανίζονται σε έντονο βαθμό μόνο μπροστά από το μέτωπο του θαλάμου καύσης όπου η υψηλή θερμοκρασία και η διαμόρφωση του χώρου καθιστούν αδύνατη τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα με σωλήνα Pitot ή ανεμόμετρο.

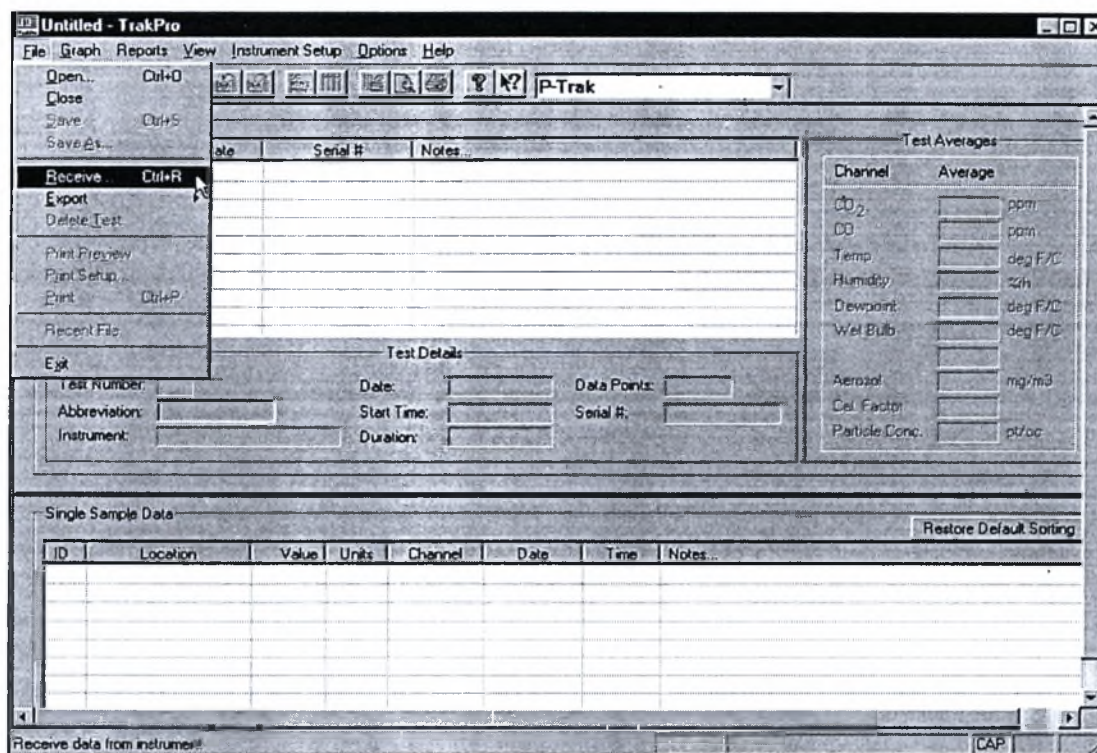
## 4.5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 της εταιρείας TSI και αποθηκεύθηκαν στη μνήμη του οργάνου. Για την επεξεργασία των μετρήσεων έγινε μεταφορά των δεδομένων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή συνδέοντας το όργανο δια μέσω καλωδίου με τη σειριακή θύρα του υπολογιστή και με τη χρήση του λογισμικού TrakPro Data Analysis Software. Η διαδικασία μεταφοράς των μετρήσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Με τη χρήση του υπομενού “Receive” δίνεται η εντολή για την μεταφορά των μετρήσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ενώ με τη χρήση του υπομενού “Export” τα δεδομένα μετατρέπονται σε αρχεία “.txt” ή “.xls”. Η επεξεργασία των μετρήσεων και οι γραφικές παραστάσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης σε συνάρτηση με το χρόνο έγινε με το λογισμικό Excel του Microsoft Office.

### 4.5.1 Περιγραφή των μεθόδων SEM και EDS

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) είναι μια αρκετά διαδεδομένη τεχνική για τη μορφολογική μελέτη υλικών με αρκετά υψηλή ανάλυση, περίπου 10 nm, αν και για τα περισσότερα δείγματα περιορίζεται στα 50 nm. Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής στηρίζεται στην εκπομπή δευτερογενών ή οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από μια επιφάνεια, όταν αυτή σαρώνεται από μια καλά εστιασμένη προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων αρκετά υψηλής ενέργειας (10 – 20 keV). Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας της επιφάνειας. Η διακύμανση στην ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζει τη φωτεινότητα ενός καθοδικού σωλήνα (CRT) ο οποίος σαρώνεται συγχρονισμένα με την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων. Με τον τρόπο αυτό αναπαράγεται η εικόνα της επιφάνειας στην οθόνη

του καθοδικού σωλήνα. Η τάση λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης κυμαίνεται από 2 – 50 kV.



Σχήμα 4.2 – Επιλογή του υπομενού Receive, Export

Αναλυτικότερα, όταν σε ένα υλικό προσπέσει δέσμη ηλεκτρονίων αρκετά υψηλής ενέργειας, ένα μέρος των ηλεκτρονίων, ως φορτισμένα σωματίδια, αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού και υφίστανται ανελαστική σκέδαση. Έτσι, χάνουν ένα μέρος της αρχικής τους ενέργειας ιονίζοντας ταυτόχρονα τα άτομα, οπότε απελευθερώνονται από αυτά κάποια ηλεκτρόνια. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται τα λεγόμενα δευτερογενή ηλεκτρόνια. Επιπλέον, ηλεκτρόνια που σκεδάστηκαν ανελαστικά, αλλά έχουν ακόμα αρκετά μεγάλη ενέργεια εκπέμπονται πάνω από το δείγμα και αποτελούν τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια. Έτσι, η ανάλυση SEM χρησιμοποιεί τα δευτερογενή και τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, τα οποία συλλέγονται από δύο ανιχνευτές που βρίσκονται κοντά στο δείγμα, για να συνθέσει την εικόνα της επιφάνειας του δείγματος.

Τα δείγματα που μπορούν να απεικονιστούν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι υλικά με αγώγιμες επιφάνειες. Στην περίπτωση που είναι μη αγώγιμα καλύπτονται με ένα στρώμα μετάλλου, συνήθως με χρυσό (επιχρύσωση) ή με γραφίτη. Η πληροφορία που μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο ενισχύεται με κατάλληλο σύστημα ενισχυτών και διαβιβάζεται στην

είσοδο ενός καθοδικού σωλήνα (CRT). Η δέσμη του καθοδικού σωλήνα σαρώνει την οθόνη του και σχηματίζει την εικόνα της επιφάνειας του δείγματος. Η φωτεινότητα της εικόνας διαμορφώνεται ανάλογα με την ένταση του ηλεκτρικού σήματος που φτάνει από τον ενισχυτή. Η διαδικασία αυτή είναι ταχύτατη ώστε η σάρωση της επιφάνειας του δείγματος από τη δέσμη των ηλεκτρονίων και η σάρωση της οθόνης του καθοδικού σωλήνα για τη σύνθεση της εικόνας να θεωρούνται ταυτόχρονες και πραγματοποιούνται κατά μήκος ενός συστήματος οριζοντίων γραμμών που σχηματίζουν ένα πλαίσιο, το οποίο ονομάζεται ράστερ. Για κάθε σημείο του ράστερ στην επιφάνεια του δείγματος υπάρχει το αντίστοιχο σημείο στο ράστερ του CRT. Αν  $L$  είναι το μήκος κύματος του ράστερ της οθόνης του CRT και  $l$  το μήκος του ράστερ στην επιφάνεια του δείγματος, τότε η γραμμική μεγέθυνση θα είναι  $M = L/l$ .

Η χημική μικροανάλυση (Energy Dispersive X – ray Spectroscopy, EDS) της επιφάνειας (σε βάθος περίπου 1  $\mu\text{m}$ ) μπορεί να επιτευχθεί σε ένα μικροσκόπιο σάρωσης ή διέλευσης ηλεκτρονίων μετρώντας τη διασπορά των κυματαριθμών ή των ενεργειών των ακτινών X που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη. Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της ενεργειακής διασποράς των ακτινών X σε ένα τέτοιο μικροσκόπιο είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ποιοτική, αλλά και η ποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού. Επίσης, μπορούν να δημιουργηθούν χάρτες με την κατανομή ενός στοιχείου σε μία επιφάνεια. Ένα σύστημα EDS αποτελείται από τον ανιχνευτή της διασποράς ενέργειας των ακτινών X, έναν επεξεργαστή παλμών για την ακριβή μέτρηση της ενέργειας σε κάθε ανιχνευτή ακτινών X και το λογισμικό για τον έλεγχο του συστήματος και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε εκατοντάδες εφαρμογές στις οποίες η γνώση της χημικής ανάλυσης στην κλίμακα των μικρομέτρων και νανομέτρων είναι σημαντική (έρευνα νέων υλικών, έλεγχος ποιότητας, ανάλυση αστοχίας υλικών).

Η εξέταση των σωματιδίων με SEM έγινε στο μικροσκόπιο JEOL-6300 και η μικροανάλυση στο σύστημα OXFORD – ISIS 300. Τα σωματίδια προς παρατήρηση καθλώνονται σε στήριγμα που εισάγεται στο μικροσκόπιο με δύο τρόπους:

- Κατάλληλη κολλητική ταινία διπλής όψεως τοποθετείται στο στήριγμα και σκόνη από το δείγμα ρίχνεται στην επάνω πλευρά.
- Υδατικό αιώρημα των σωματιδίων διηθείται σε ειδική μεμβράνη polycarbonate (Nuclepore) και τμήμα της μεμβράνης επικολλάται στο στήριγμα.

Και στις δύο περιπτώσεις, ακολουθείται επιχρύσωση του δείγματος πριν από την παρατήρηση. Με τη δεύτερη μέθοδο βελτιώνεται σημαντικά η διακριτική ικανότητα των μικροφωτογραφιών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

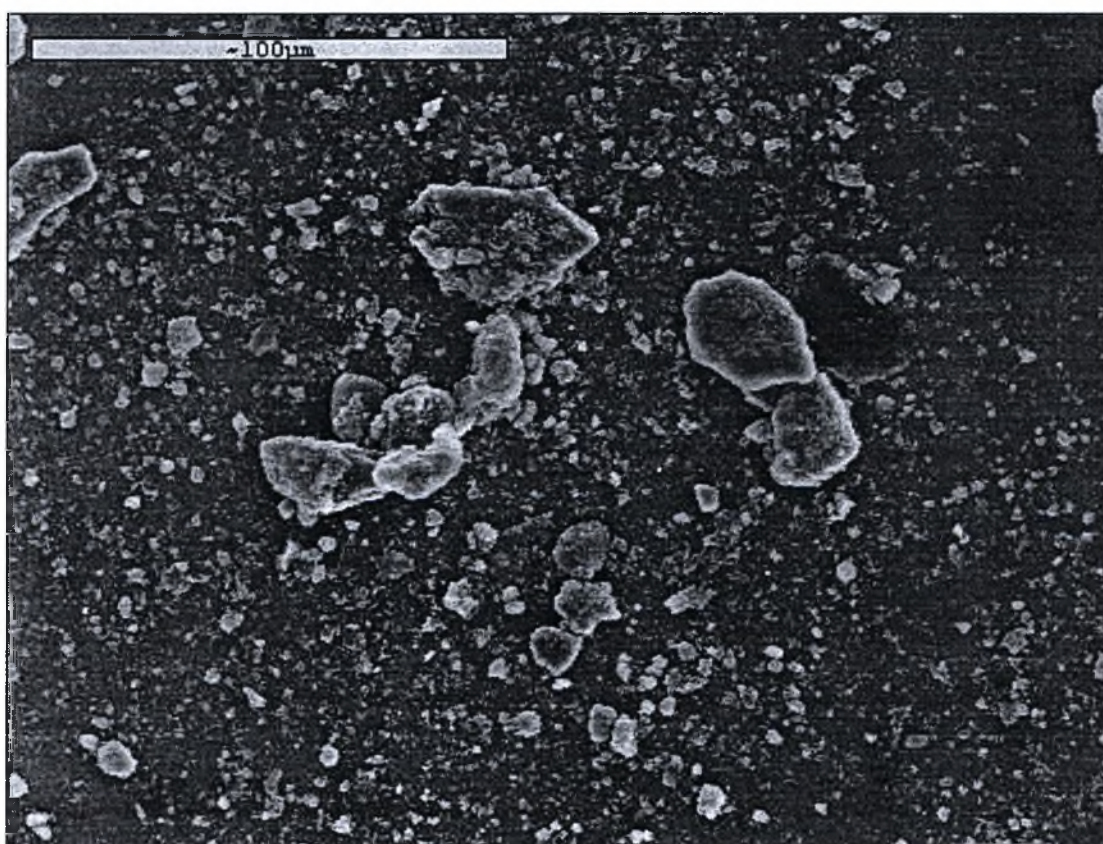
## ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

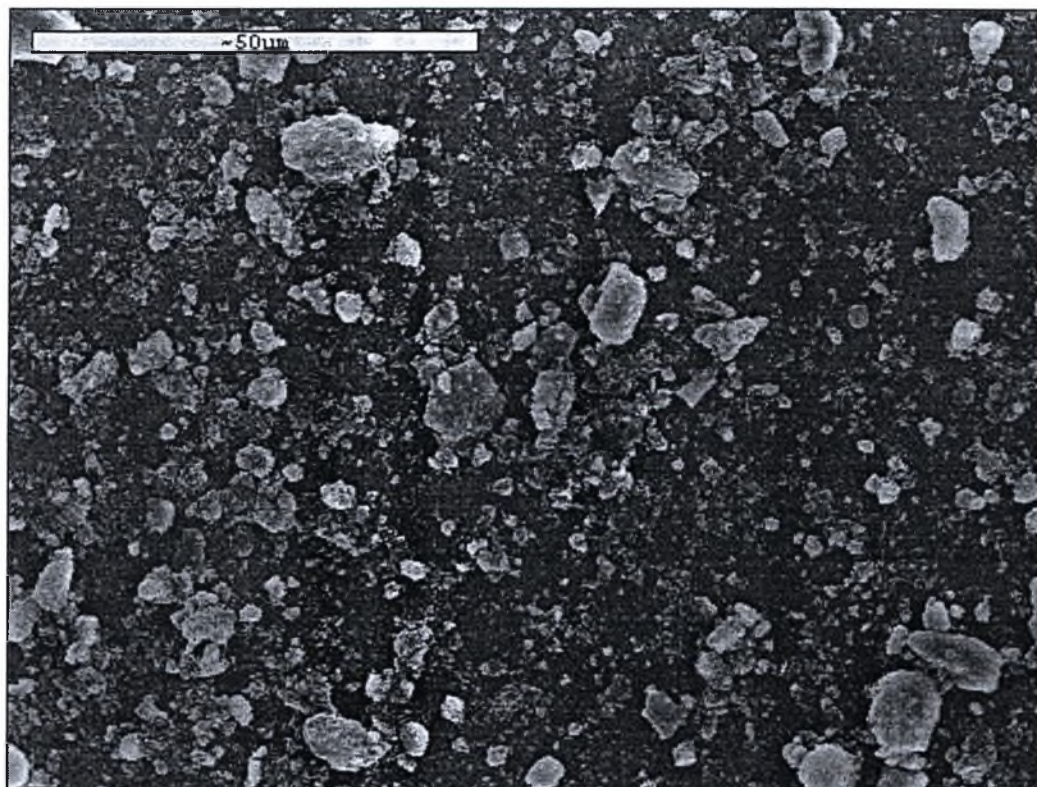
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της χημικής ανάλυσης της σωματιδιακής ύλης, όπως προκύπτουν με την εφαρμογή των μεθόδων Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive x-ray Spectroscopy (EDS) και Elementary Analysis of Carbon and Hydrogen. Επιπλέον, απεικονίζονται γραφικά οι μετρήσεις της σωματιδιακής συγκέντρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο σε διάφορους χώρους της εγκατάστασης, όπως υπολογίζονται με τη χρήση του DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 της εταιρείας TSI, καθώς και οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα στο χώρο της εγκατάστασης. Ο κύριος όγκος των αποτελεσμάτων αναφέρεται στις μετρήσεις της σωματιδιακής συγκέντρωσης και διακρίνονται, σ' αυτές που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό της κύριας πηγής ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης και σ' αυτές που μελετούν τη σωματιδιακή ρύπανση του εισπνεόμενου αέρα στο χώρο εργασίας.

## 5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

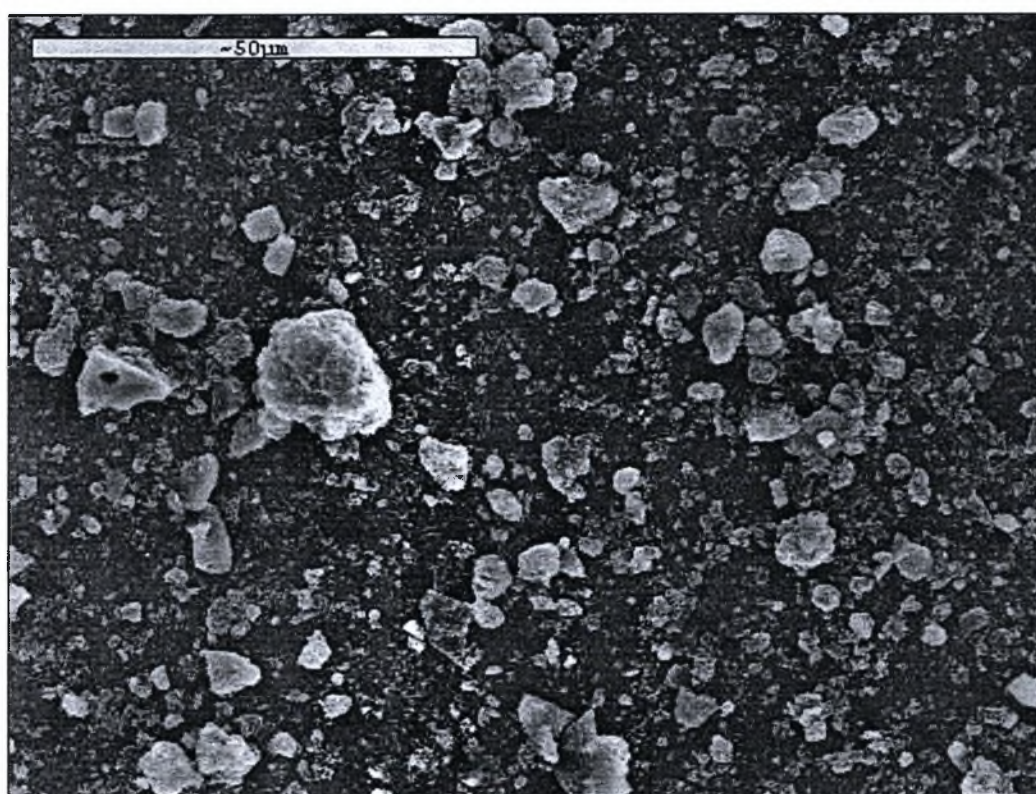
Η χημική ανάλυση της σωματιδιακής ύλης πραγματοποιήθηκε με τις μεθόδους Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive x-ray Spectroscopy (EDS) και Elementary Analysis of Carbon and Hydrogen. Με τη μέθοδο SEM προκύπτει προσεγγιστικά η κατανομή μεγέθους των επιμέρους στοιχείων που συνιστούν τη σωματιδιακή ύλη. Δείγμα της σωματιδιακής ύλης φωτογραφίζεται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Στις φωτογραφίες απεικονίζεται το μέγεθος των σωματιδίων και εξαγονται συμπεράσματα για την ύπαρξη σωματιδίων διαφόρων μεγεθών στο υπό ανάλυση δείγμα. Με τη μέθοδο EDS αναλύονται μέσω φασματοσκοπίας επιλεγμένα σωματίδια και προκύπτουν δεδομένα για την ποιοτική σύστασή τους, δηλαδή για το είδος των χημικών στοιχείων που περιέχονται στο υπό ανάλυση δείγμα. Τέλος, με τη μέθοδο Elementary Analysis of Carbon and Hydrogen προκύπτουν αποτελέσματα για το ποσοστό του άνθρακα στο υπό ανάλυση δείγμα. Το ποσοστό του υδρογόνου δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ασφάλεια εξαιτίας της πιθανής παρουσίας υγρασίας στο υπό ανάλυση δείγμα.



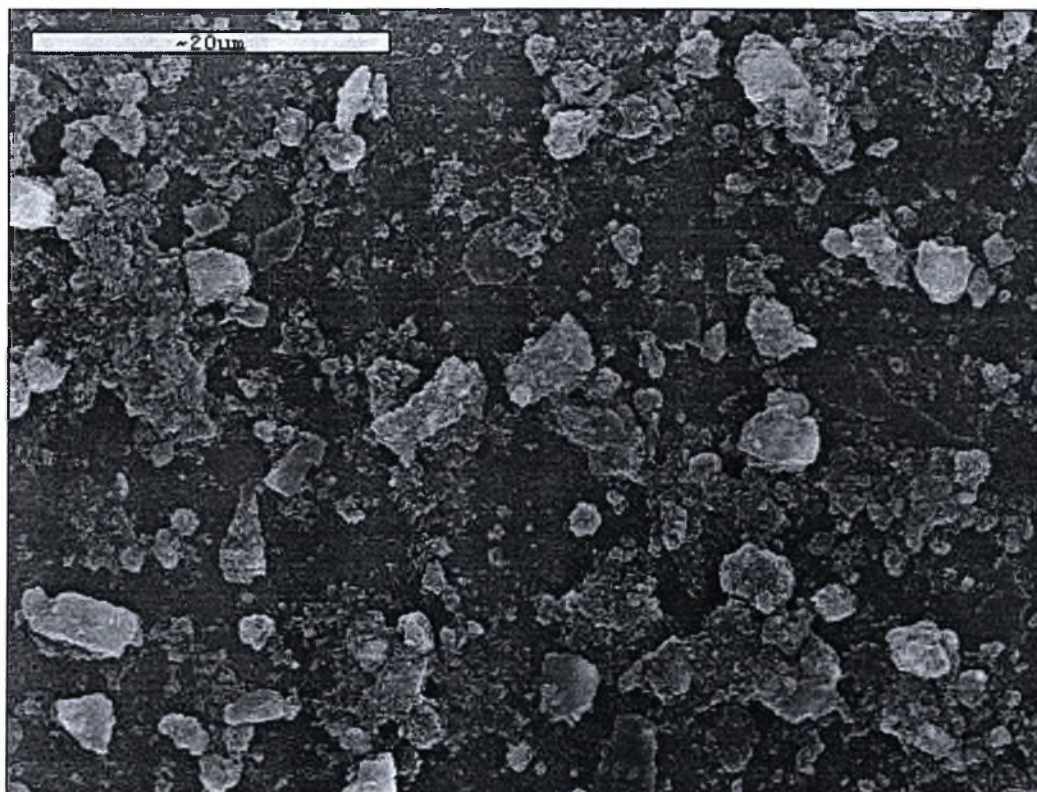
Σχήμα 5.1 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 100 μm



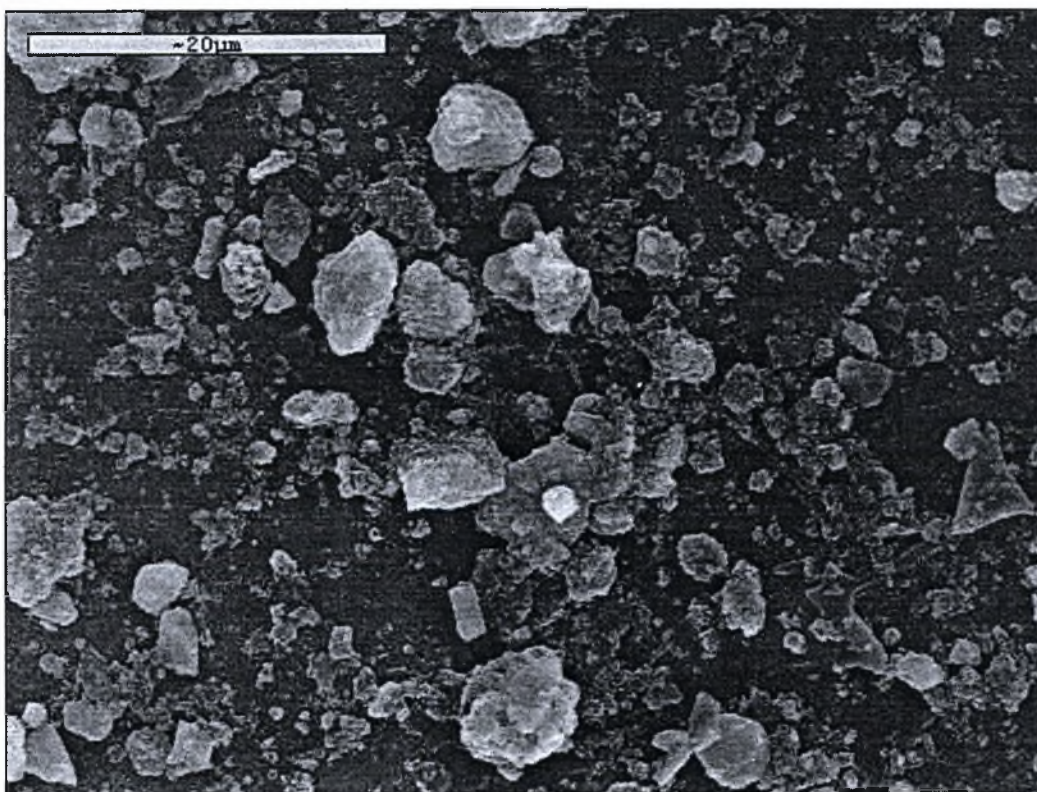
Σχήμα 5.2 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 50 μm



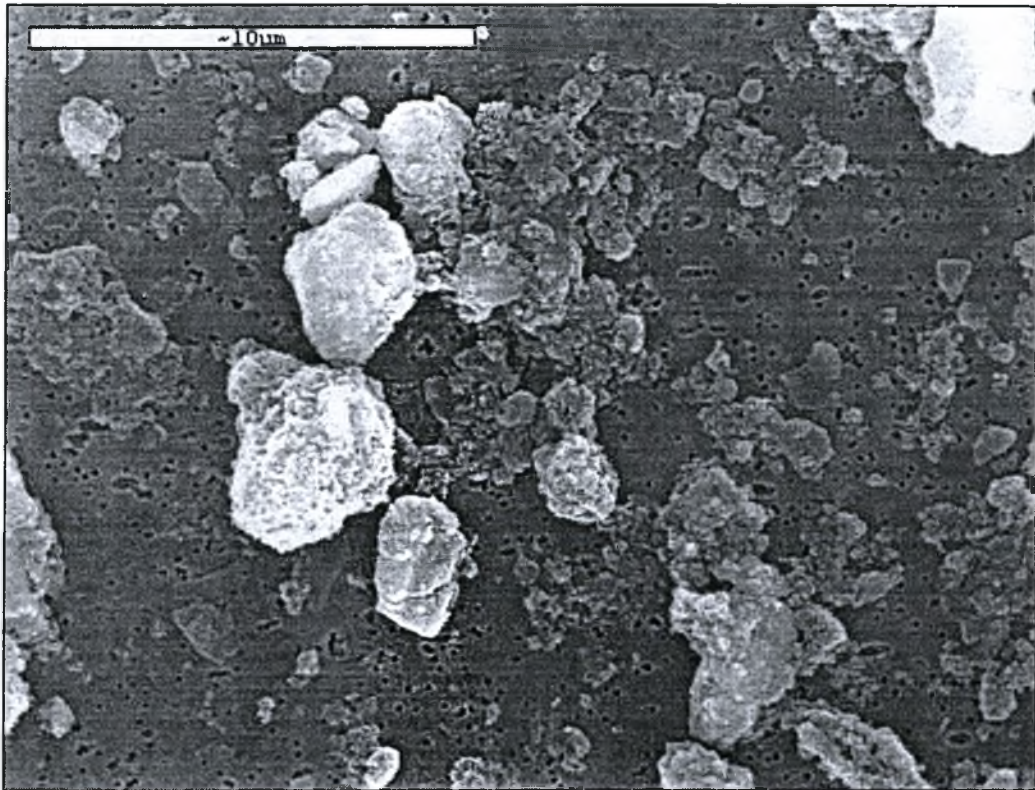
Σχήμα 5.3 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 50 μm



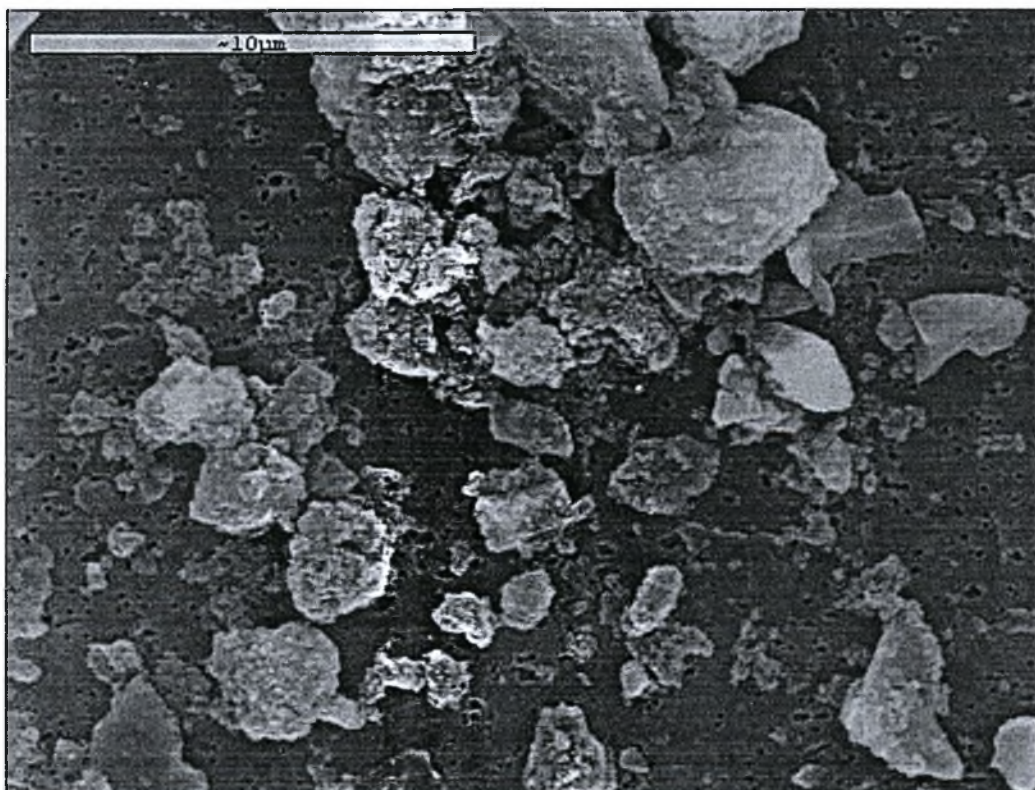
Σχήμα 5.4 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 20 μm



Σχήμα 5.5 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 20 μm

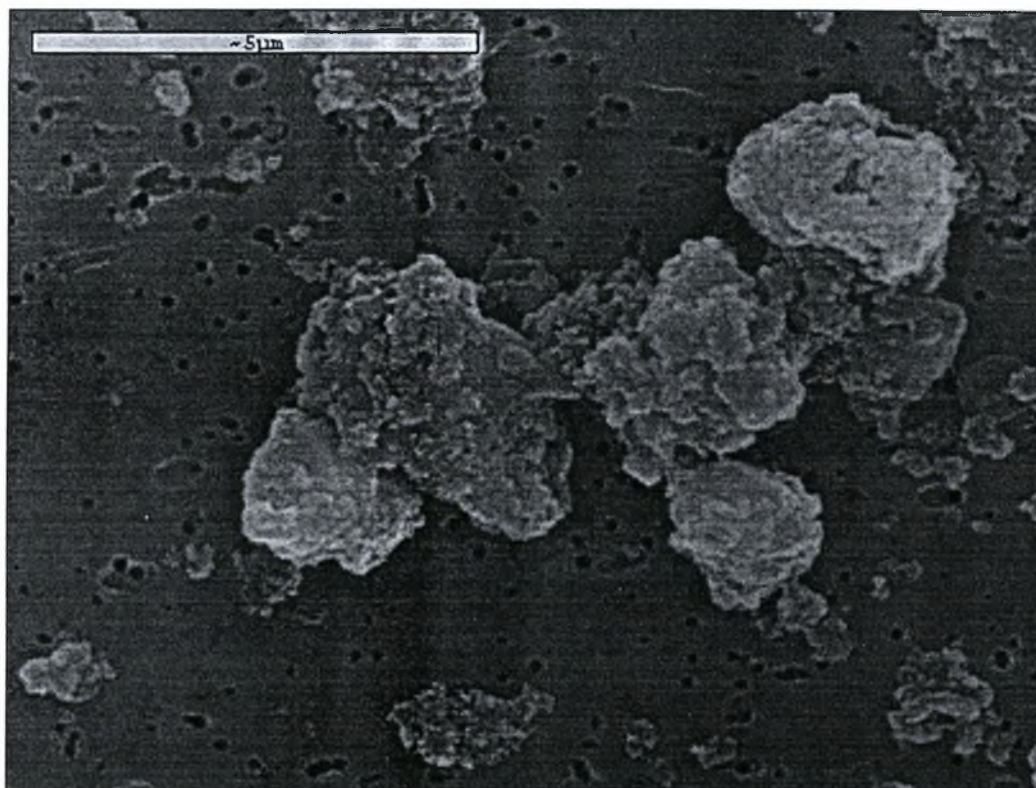


Σχήμα 5.6 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 10 μm

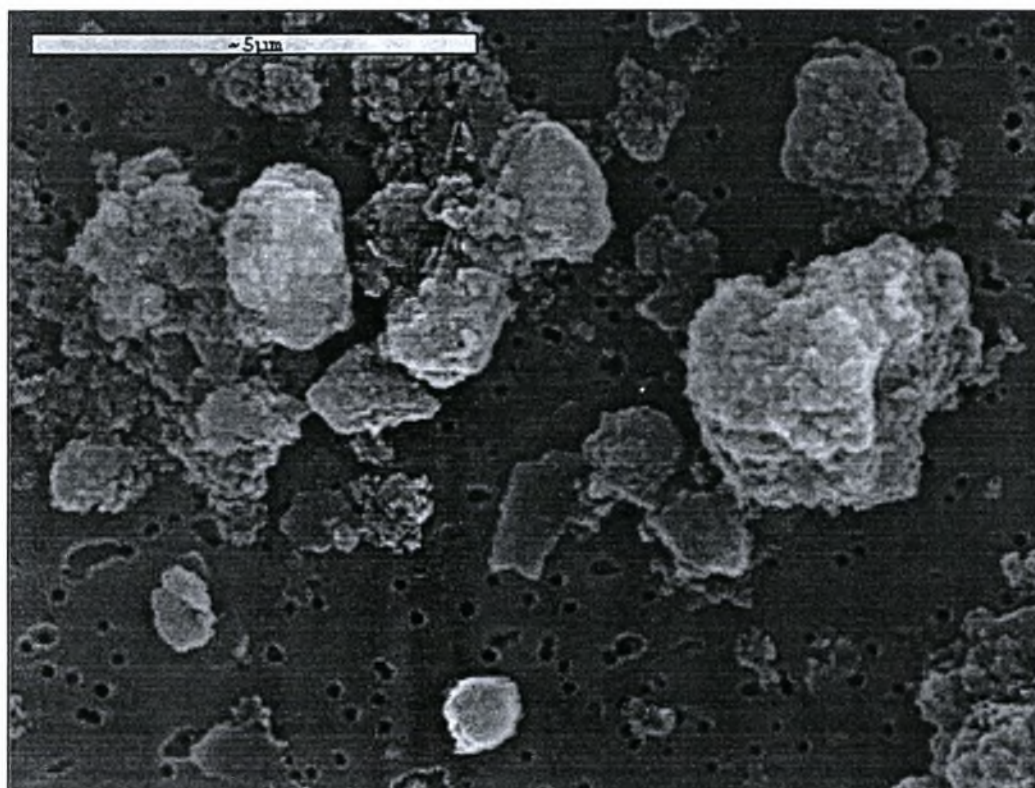


Σχήμα 5.7 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 10 μm

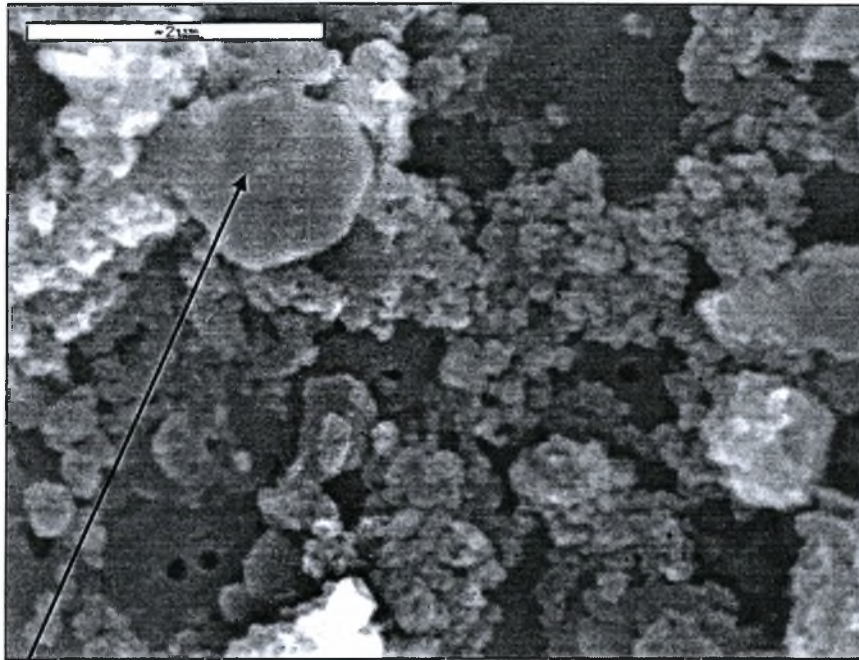




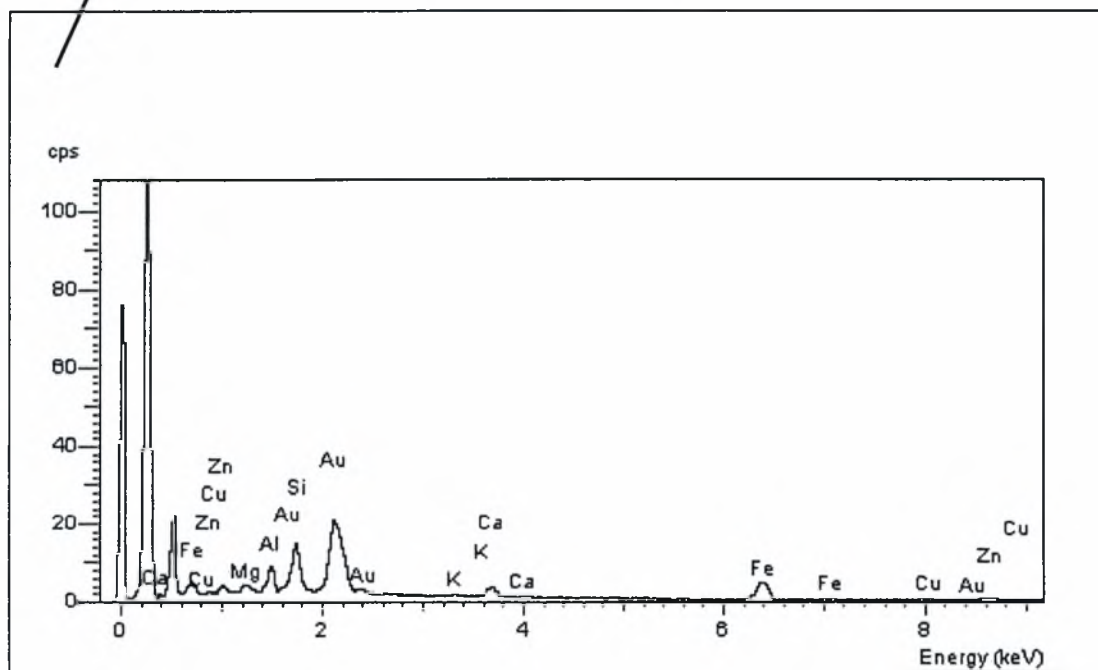
Σχήμα 5.8 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 5 μm



Σχήμα 5.9 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 5 μm

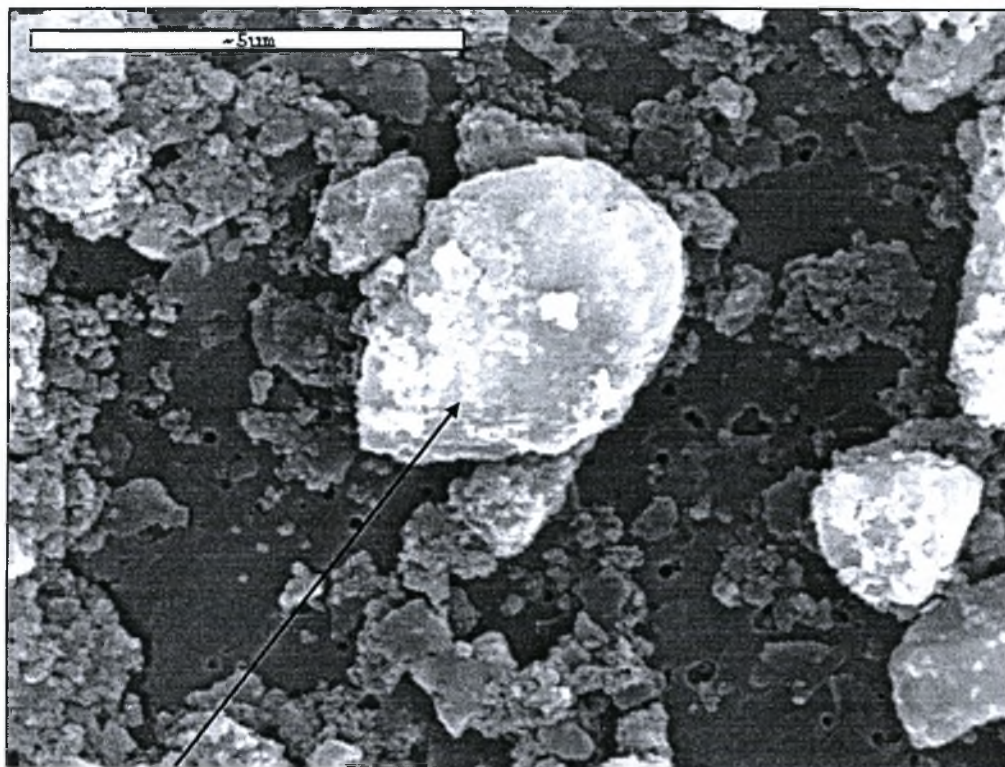


Σχήμα 5.10 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 2 μm

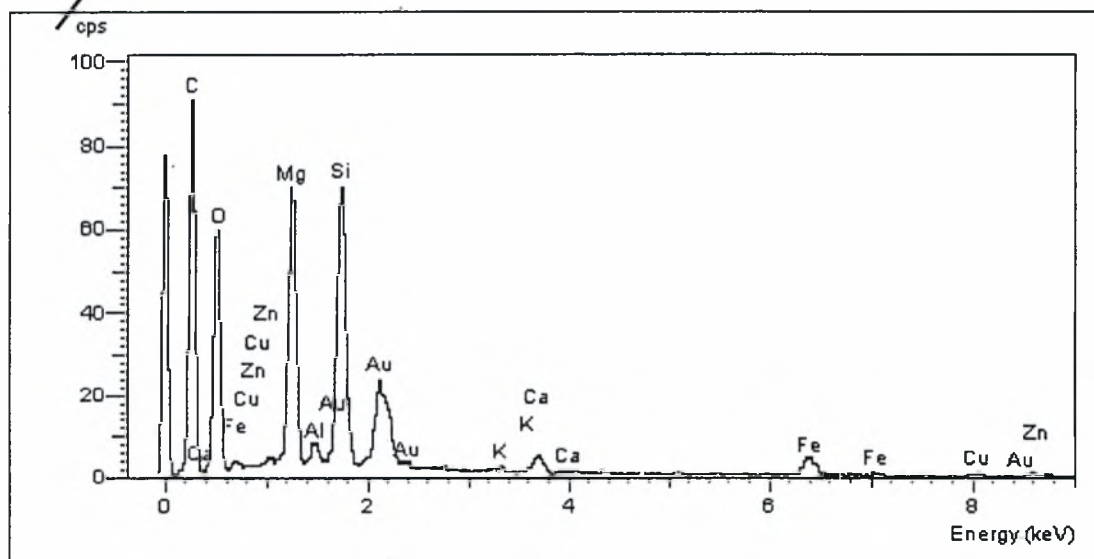


Σχήμα 5.11 – Ανάλυση με τη μέθοδο EDS του δείγματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10

Με τη μέθοδο EDS προκύπτει η ποιοτική ανάλυση του δείγματος. Τα κύρια συστατικά, εκτός του άνθρακα, είναι Si, Al, Fe, Cu.

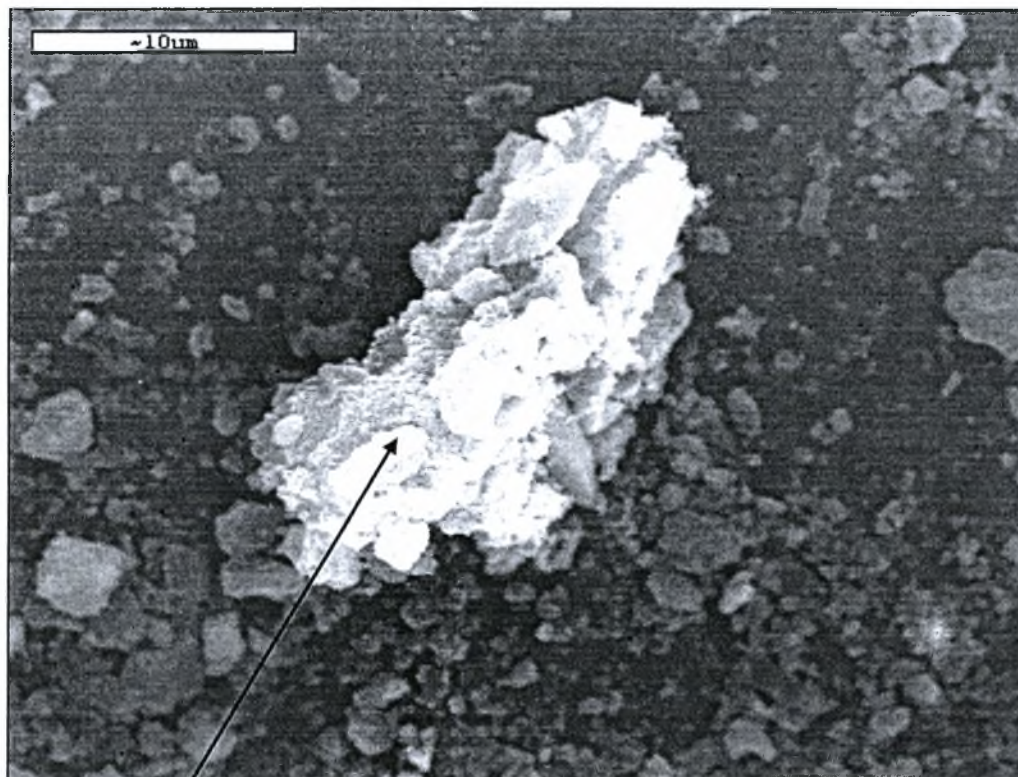


Σχήμα 5.12 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 5 μm

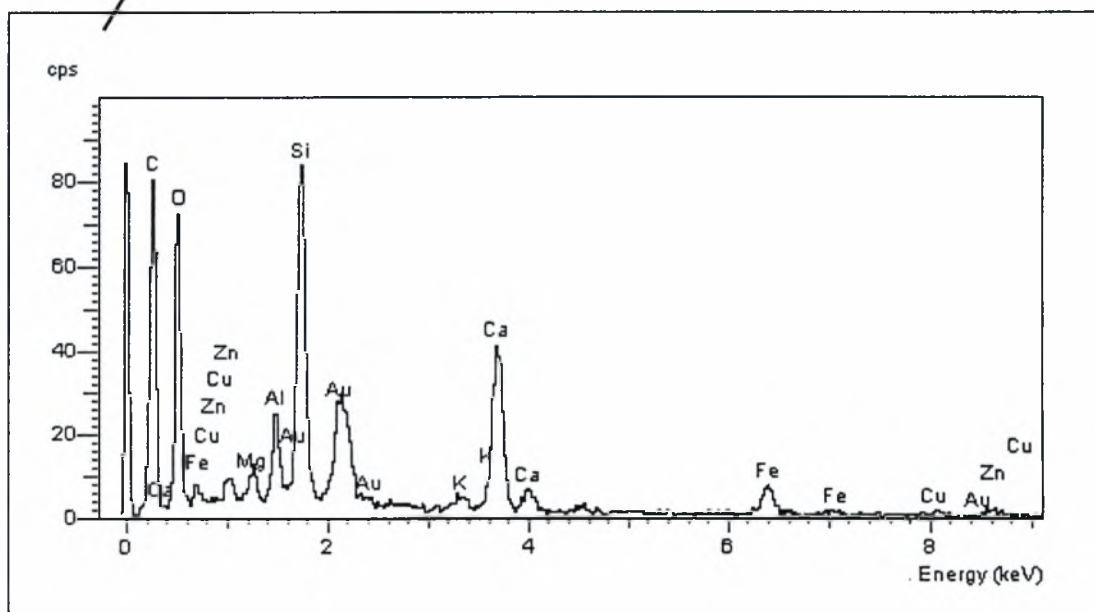


Σχήμα 5.13 – Ανάλυση με τη μέθοδο EDS του δείγματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.12

Με τη μέθοδο EDS προκύπτει η ποιοτική ανάλυση του δείγματος. Τα κύρια συστατικά, εκτός του άνθρακα, είναι Si, O, Mg, Al, Fe, Cu.



Σχήμα 5.14 – Ανάλυση με τη μέθοδο SEM στα 10 μm



Σχήμα 5.15 – Ανάλυση με τη μέθοδο EDS του δείγματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.14

Με τη μέθοδο EDS προκύπτει η ποιοτική ανάλυση του δείγματος. Τα κύρια συστατικά, εκτός του άνθρακα, είναι Si, O, Ca, Al, K, Fe, Cu.

Με τη μέθοδο Elementary Analysis of Carbon and Hydrogen προκύπτει ότι στο υπό ανάλυση δείγμα περιέχεται 10,756 % κατά βάρος άνθρακας και 0,646 % κατά βάρος υδρογόνο. Το ποσοστό του υδρογόνου περιέχει σημαντική αβεβαιότητα, αφού είναι πιθανό να οφείλεται στην ύπαρξη υγρασίας στο υπό ανάλυση δείγμα.

### 5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Τα αποτελέσματα της σωματιδιακής συγκέντρωσης όπως αυτή μετρήθηκε με το DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 της εταιρείας TSI απεικονίζονται γραφικά σε συνάρτηση με το χρόνο και αναφέρονται στις εξής περιπτώσεις:

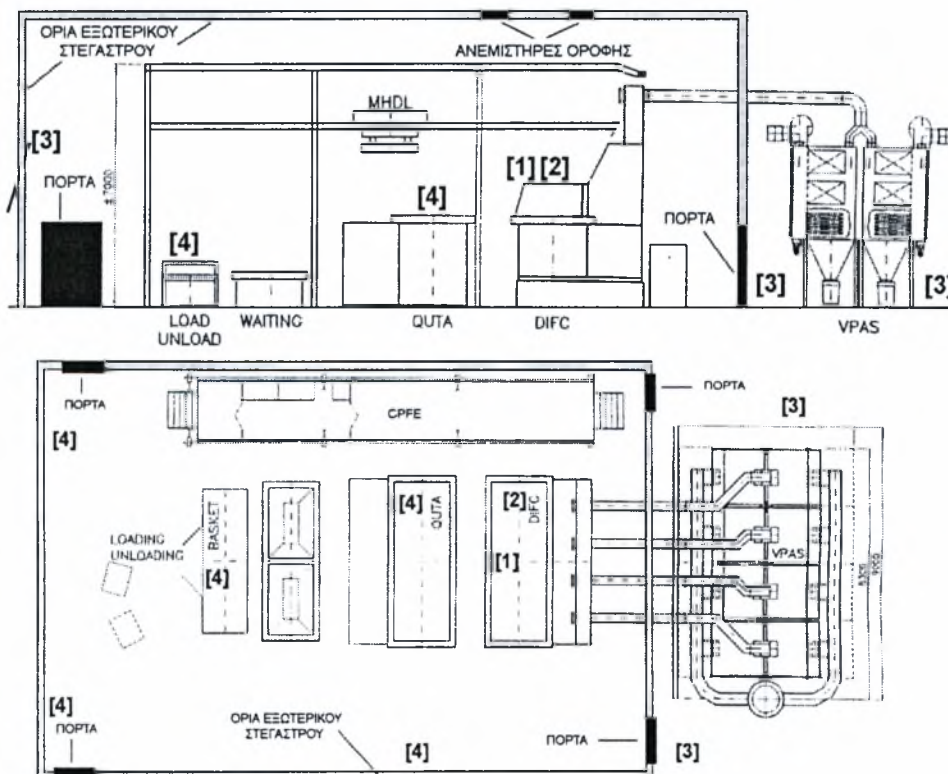
- Μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο της εγκατάστασης για τον προσδιορισμό της πηγής ρύπανσης.
- Μετρήσεις στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης για τον προσδιορισμό της πηγής ρύπανσης:
  - ✦ Όταν η εγκατάσταση δεν λειτουργεί:
    - ❖ Περίοδος συντήρησης.
    - ❖ Νυχτερινή παύση λειτουργίας.
  - ✦ Όταν η εγκατάσταση λειτουργεί:
    - ❖ Ενδεικτικά σε διάφορα σημεία της εγκατάστασης.
    - ❖ Τροφοδοσία σε παρτίδες: πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά την επεξεργασία διαφορετικού τύπου μεταλλικών εξαρτημάτων – διόπτρες και πύροι από άρματα μάχης Λεωνίδας, M48, M60 και πέλματα M113 Γ.Τ.
    - ❖ Συνεχή τροφοδοσία: η συνεχής τροφοδοσία περιελάμβανε μόνο διόπτρες και πύρους M48.
- Μετρήσεις στο χώρο εργασίας.

#### 5.3.1 Αποτελέσματα εντοπισμού πηγής ρύπανσης

Στις σελίδες που ακολουθούν απεικονίζονται γραφικά, σε συνάρτηση με το χρόνο, τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης που πραγματοποιήθηκαν με στόχο τον προσδιορισμό της πηγής ρύπανσης στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης. Στο Σχήμα 4.8 σημειώνονται οι θέσεις που τοποθετήθηκε το όργανο μέτρησης. Για την καλύτερη κατανόηση των γραφικών παραστάσεων πρέπει να αναφέρουμε τα εξής:

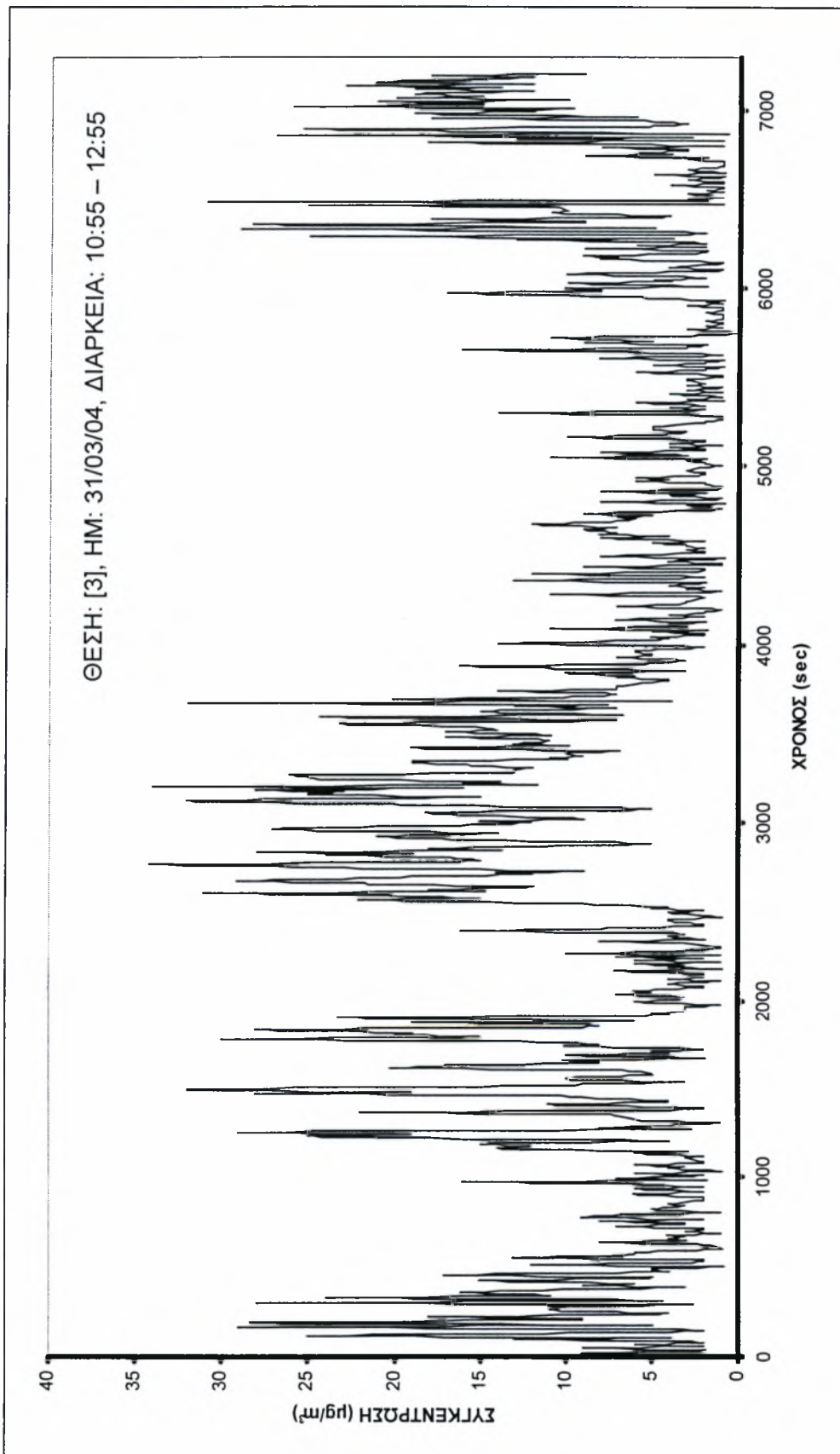
- Η δειγματοληψία γίνεται κάθε 1 sec, ενώ η σταθερά χρόνου είναι 10 sec.

- Οι μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο της εγκατάστασης πραγματοποιήθηκαν περιμετρικά του μεταλλικού στεγάστρου, σημειώνονται με [3] στο Σχήμα 4.8 και έχουν διάρκεια δύο ώρες (7200 sec).
- Οι ενδεικτικές μετρήσεις στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα σημεία εσωτερικά του μεταλλικού στεγάστρου, σημειώνονται με [4] στο Σχήμα 4.8 και έχουν διάρκεια δύο ώρες (7200 sec).
- Οι μετρήσεις στο συνεχές σύστημα τροφοδοσίας περιλαμβάνουν μόνο την επεξεργασία μεταλλικών εξαρτημάτων M48, σημειώνονται με [2] στο Σχήμα 4.8 και έχουν διάρκεια δύο ώρες (7200 sec).
- Οι μετρήσεις στο σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες περιλαμβάνουν την επεξεργασία μεταλλικών εξαρτημάτων M48, M113 Γ.Τ, M60, Λεωνίδας και σημειώνονται με [2] στο Σχήμα 4.8. Εξαιτίας προβλημάτων που εμφανίζονται κατά τη συνολική διεργασία, η χρονική διάρκεια ποικίλει. Στις γραφικές παραστάσεις σημειώνεται επιπλέον η χρονική διάρκεια στην οποία η κεντρική θύρα του θαλάμου καύσης παραμένει ανοιχτή κατά την εισαγωγή και εξαγωγή του μεταλλικού καλαθιού. Εκτός από την συνολική επεξεργασία παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι γραφικές παραστάσεις των επιμέρους κύκλων εργασιών.

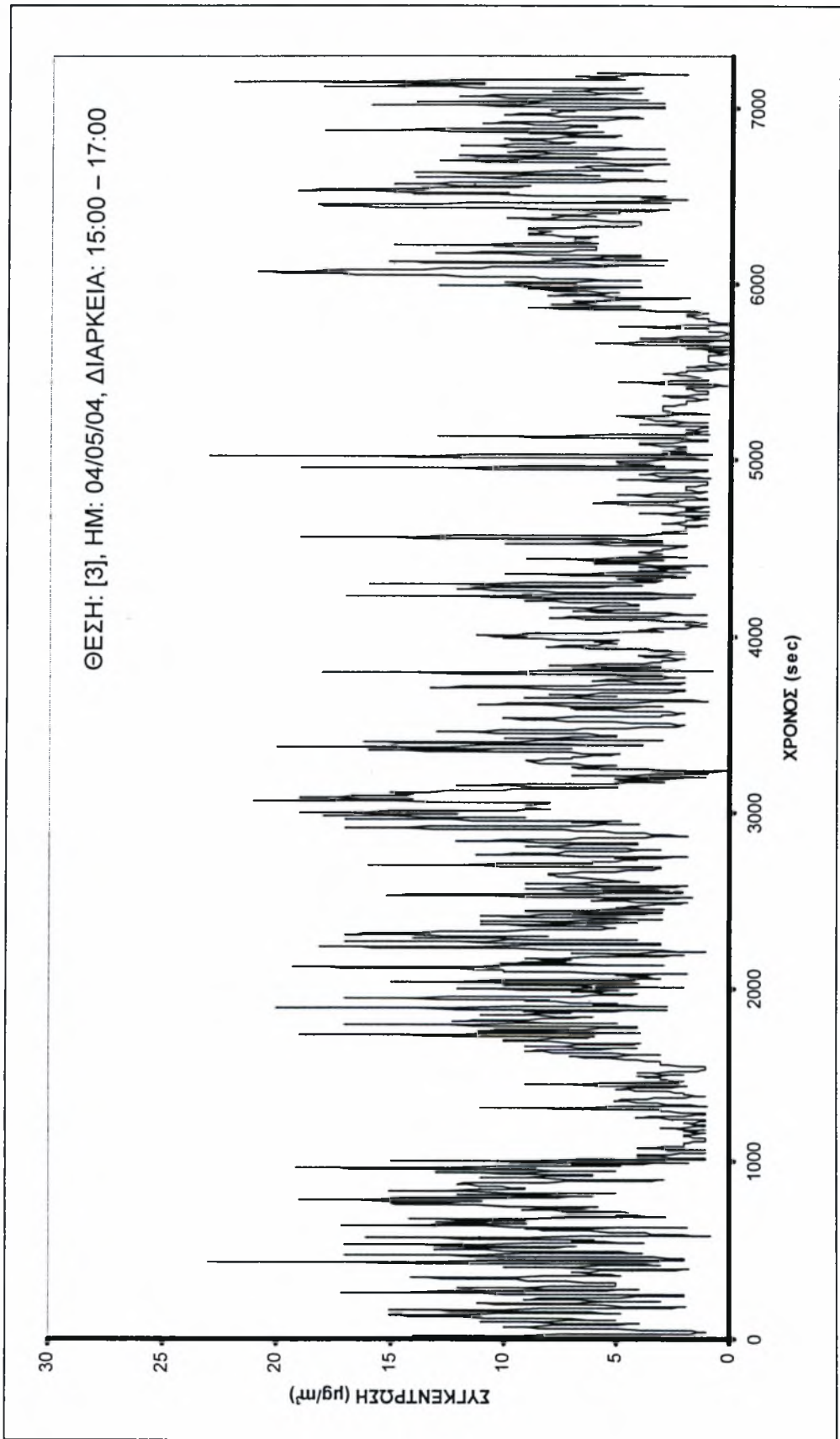


Σχήμα 5.16 – Απεικόνιση των σημείων μέτρησης της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης

Σχήμα 5.17 – Θέση [3]

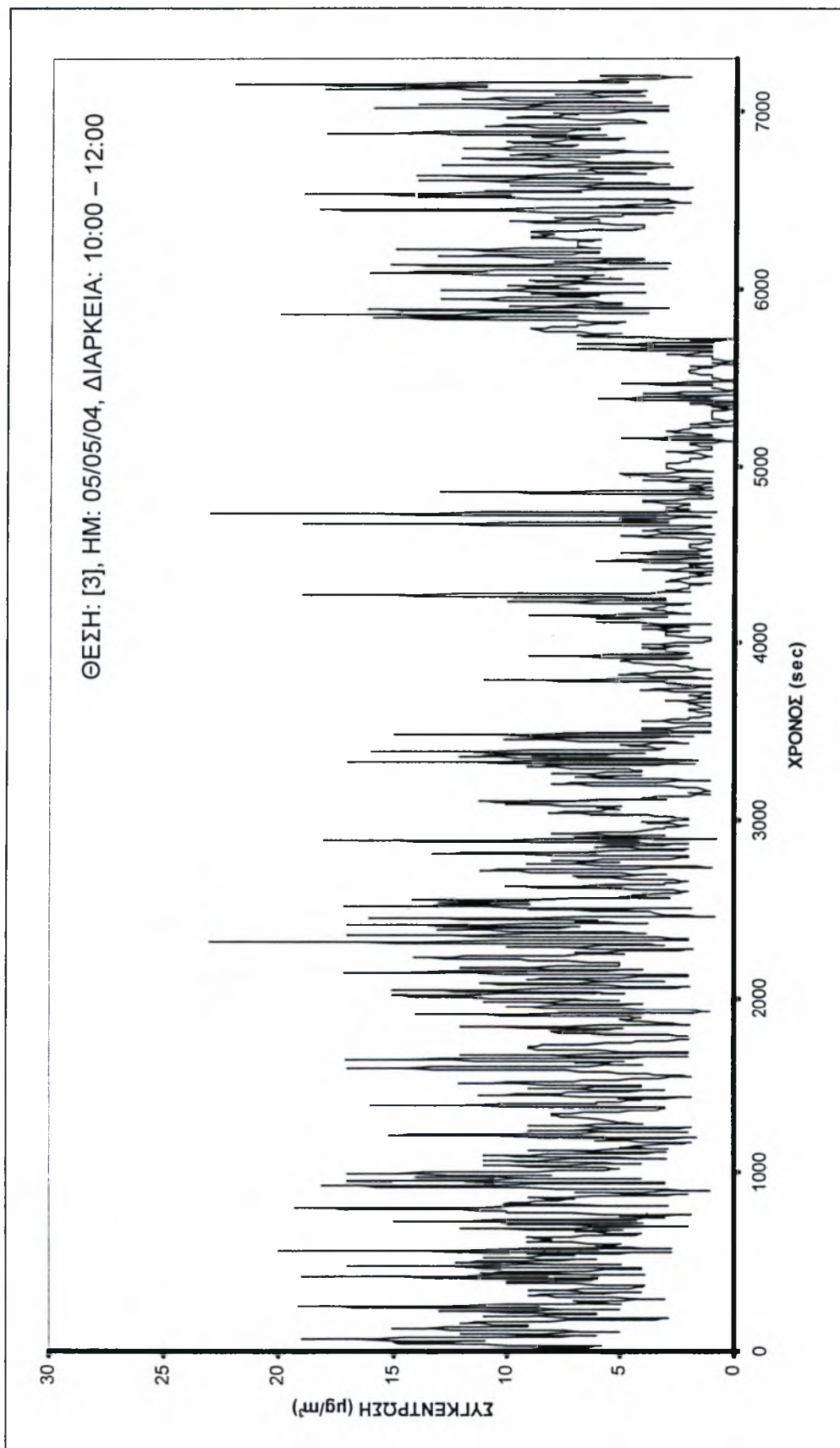


Σχήμα 5.18 – Θέση [3]

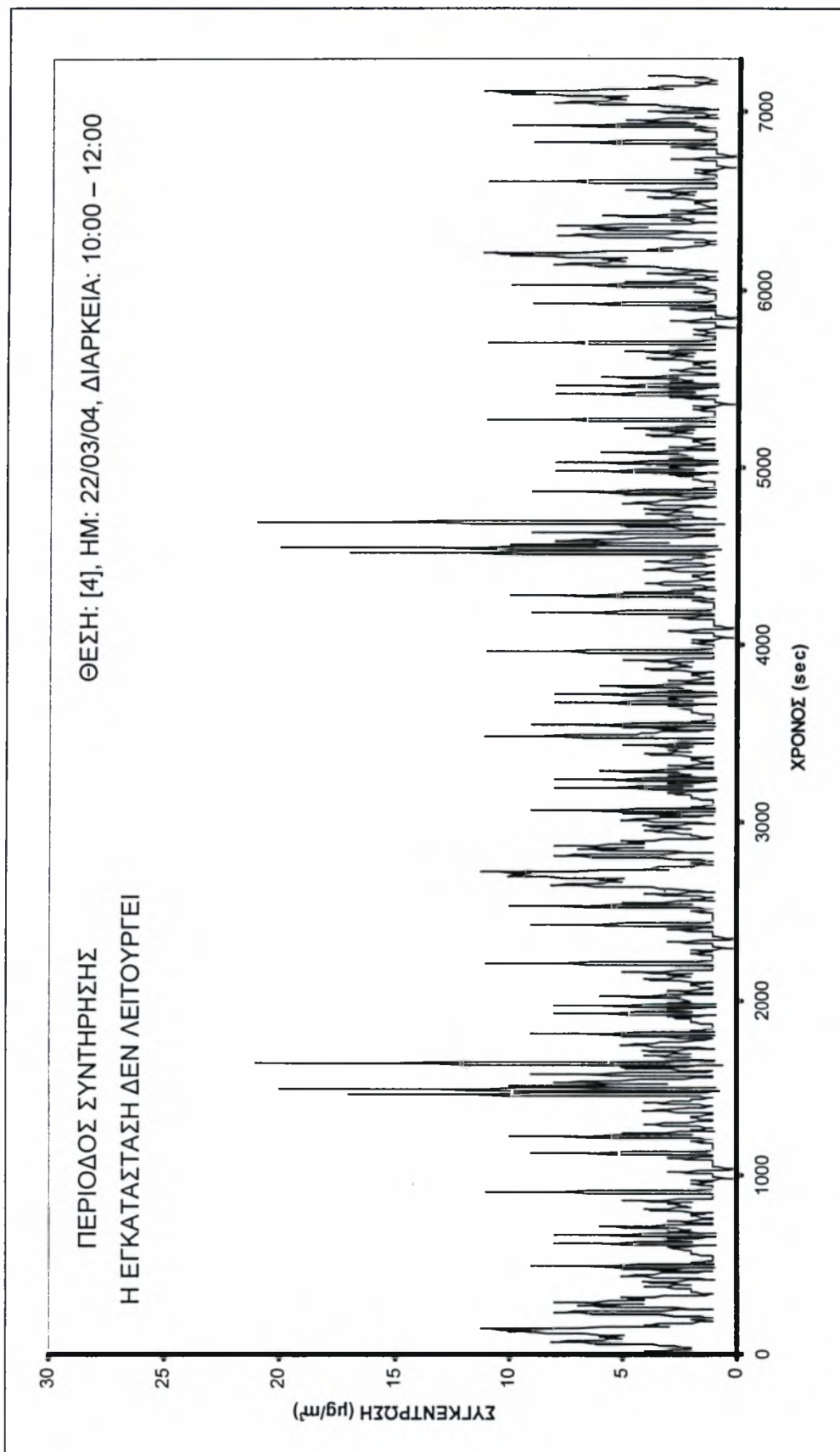




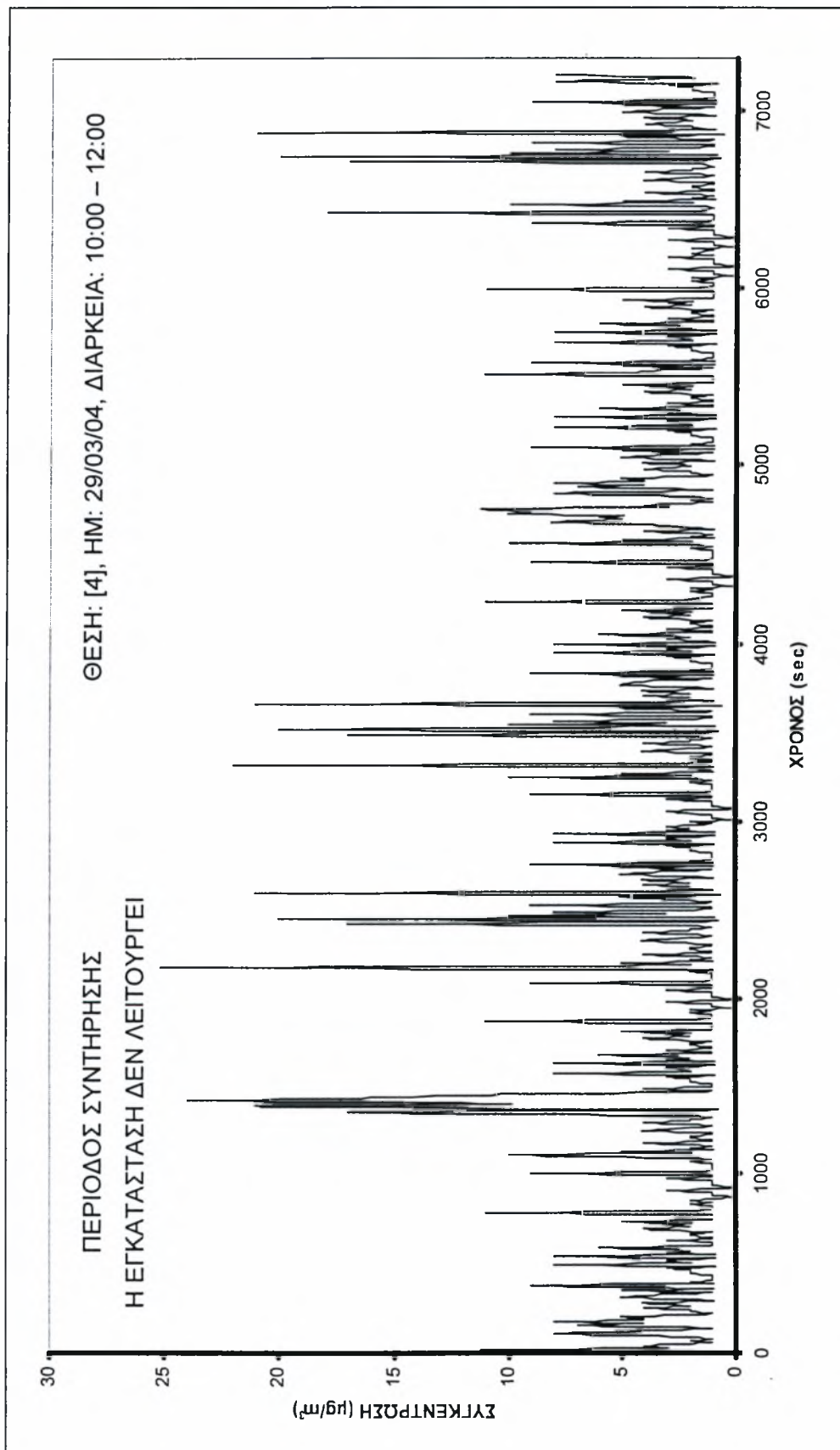
Σχήμα 5.19 – Θέση [3]



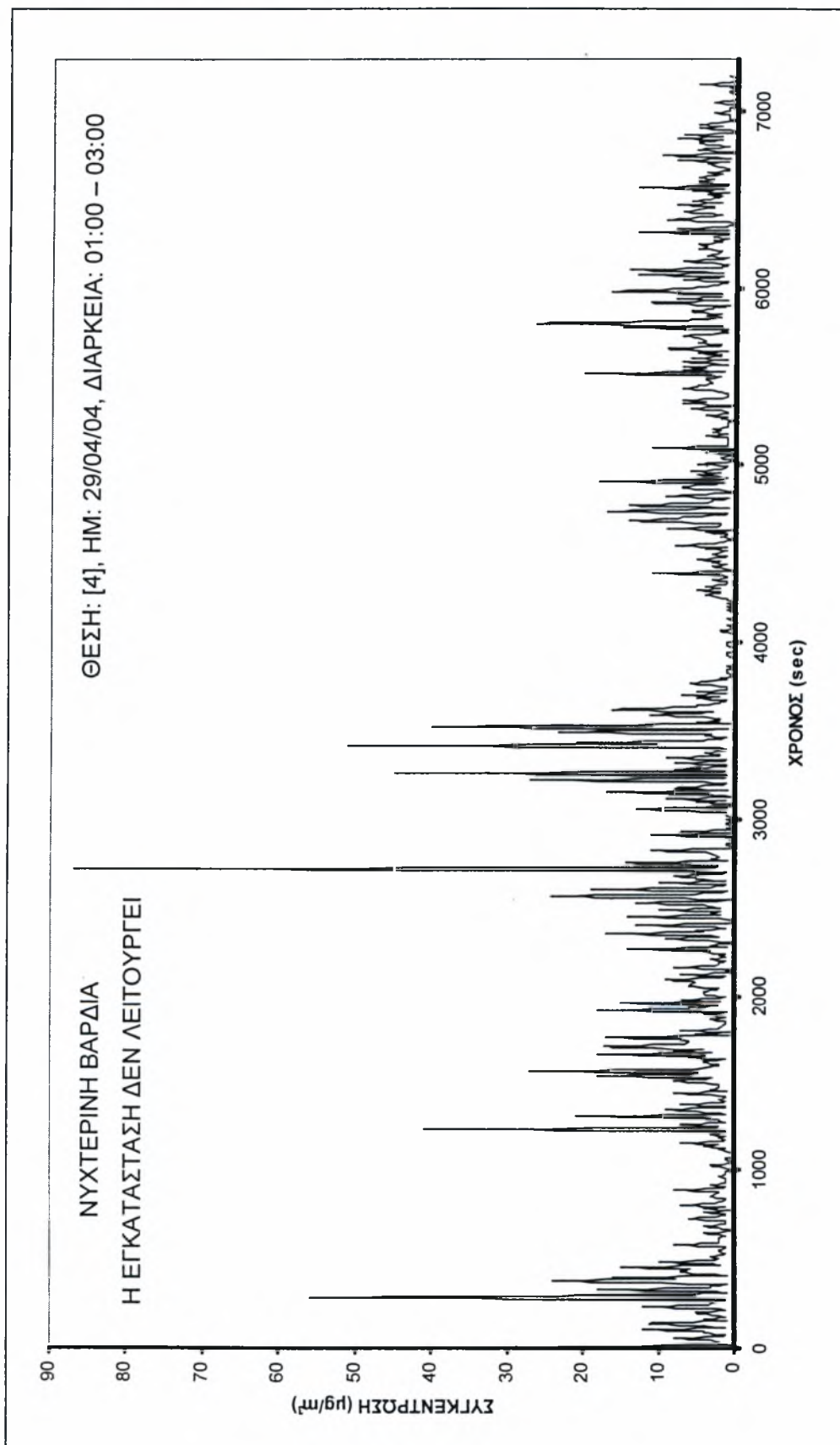
Σχήμα 5.20 – Θέση [4], Περίοδος συντήρησης



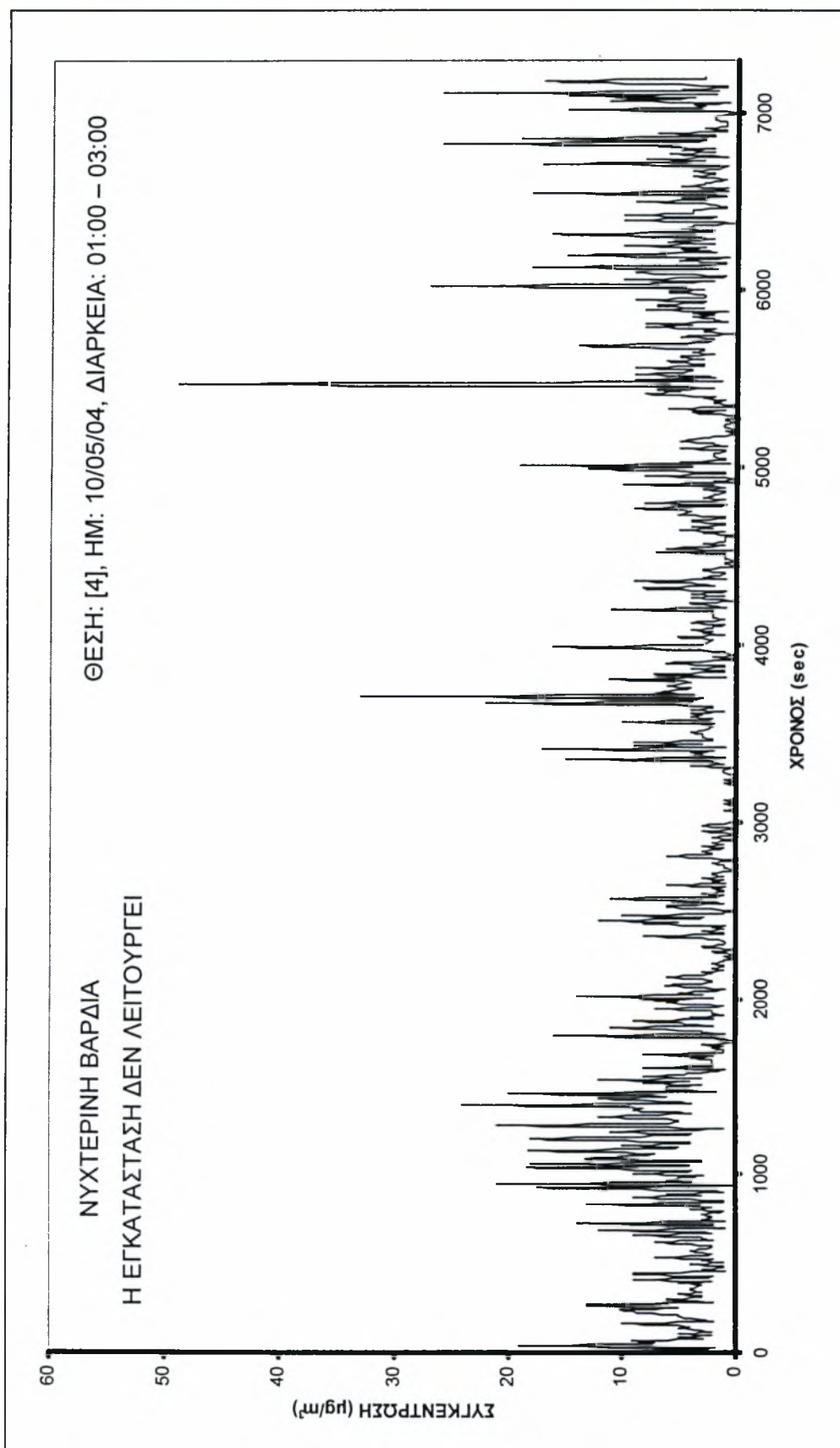
Σχήμα 5.21 – Θέση [4], Περίοδος συντήρησης



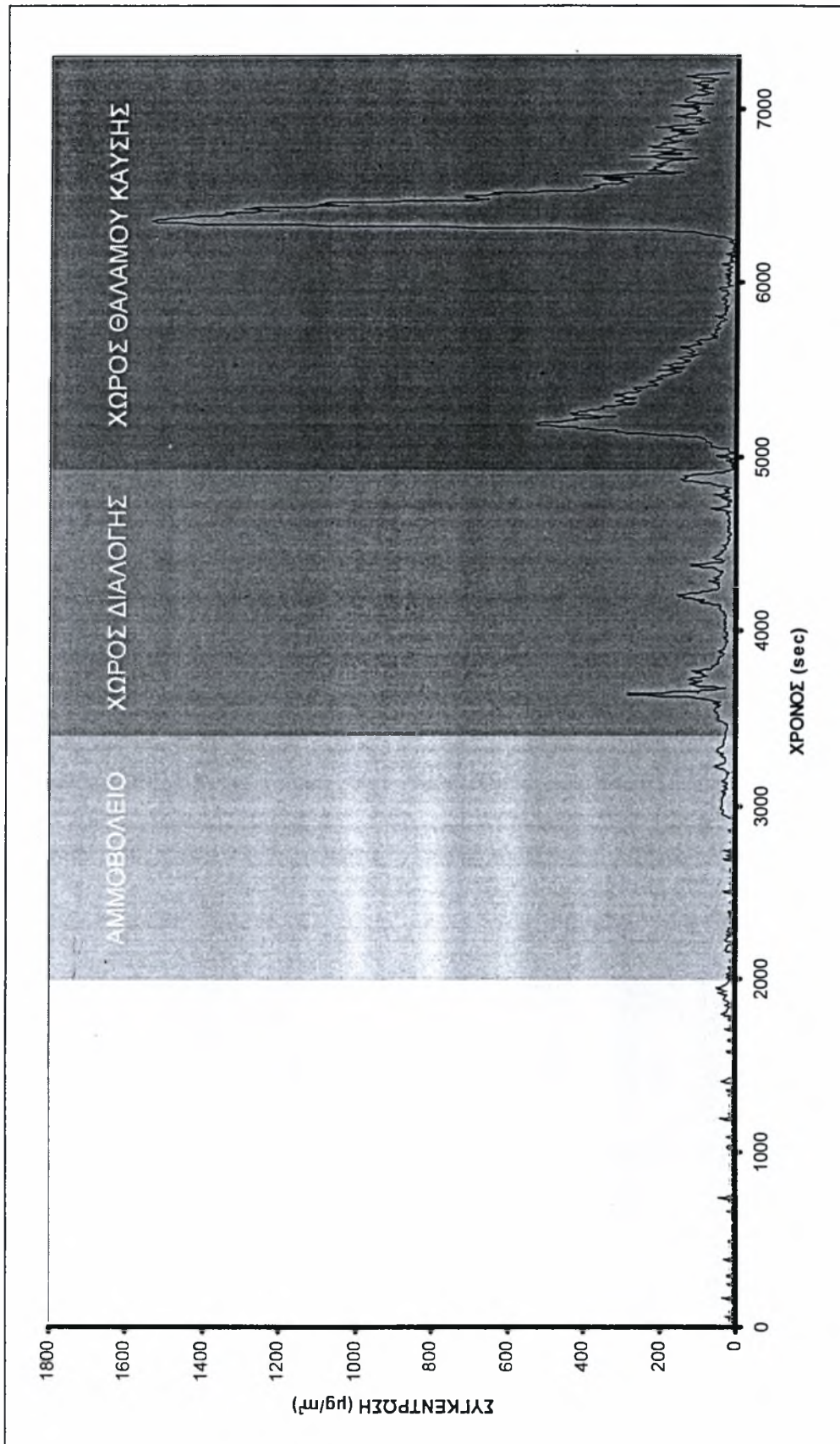
Σχήμα 5.22 – Θέση [4], Νυχτερινή βάρδια



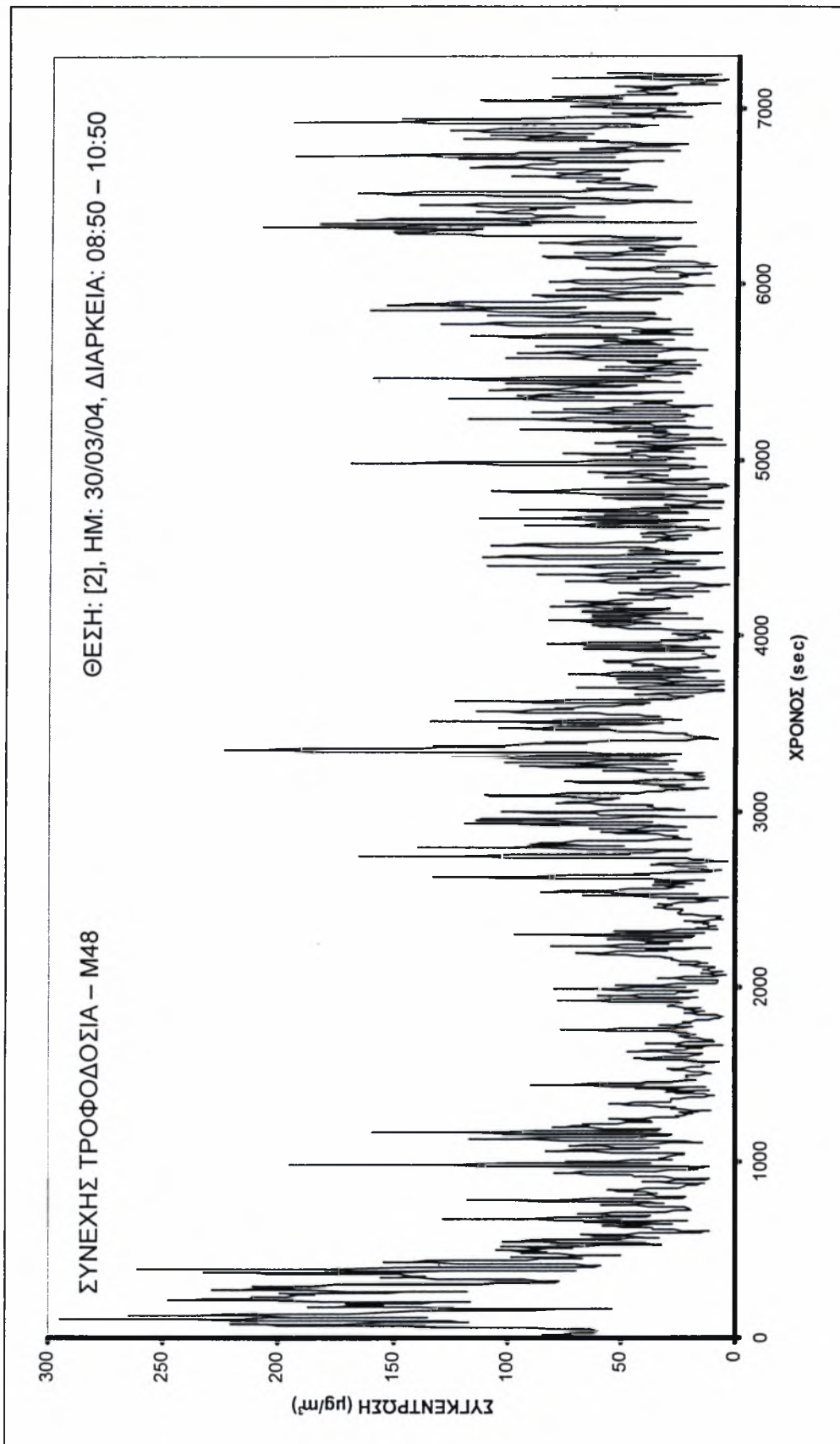
Σχήμα 5.23 – Θέση [4], Νυχτερινή βάρδια



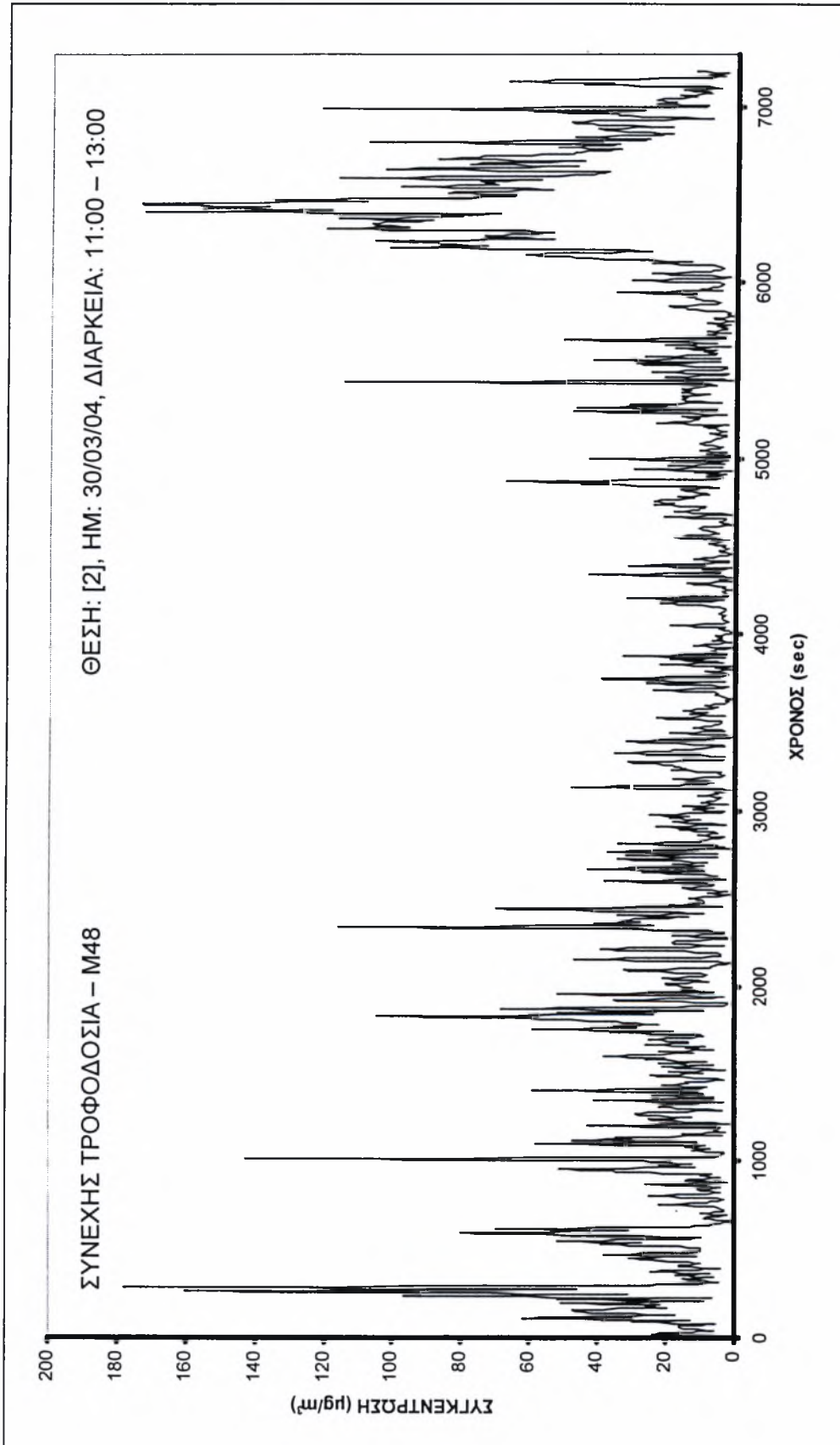
Σχήμα 5.24 – Θέση [4], Ενδεικτικές μετρήσεις



Σχήμα 5.25 – Θέση [2], Συνεχής τροφοδοσία – M48

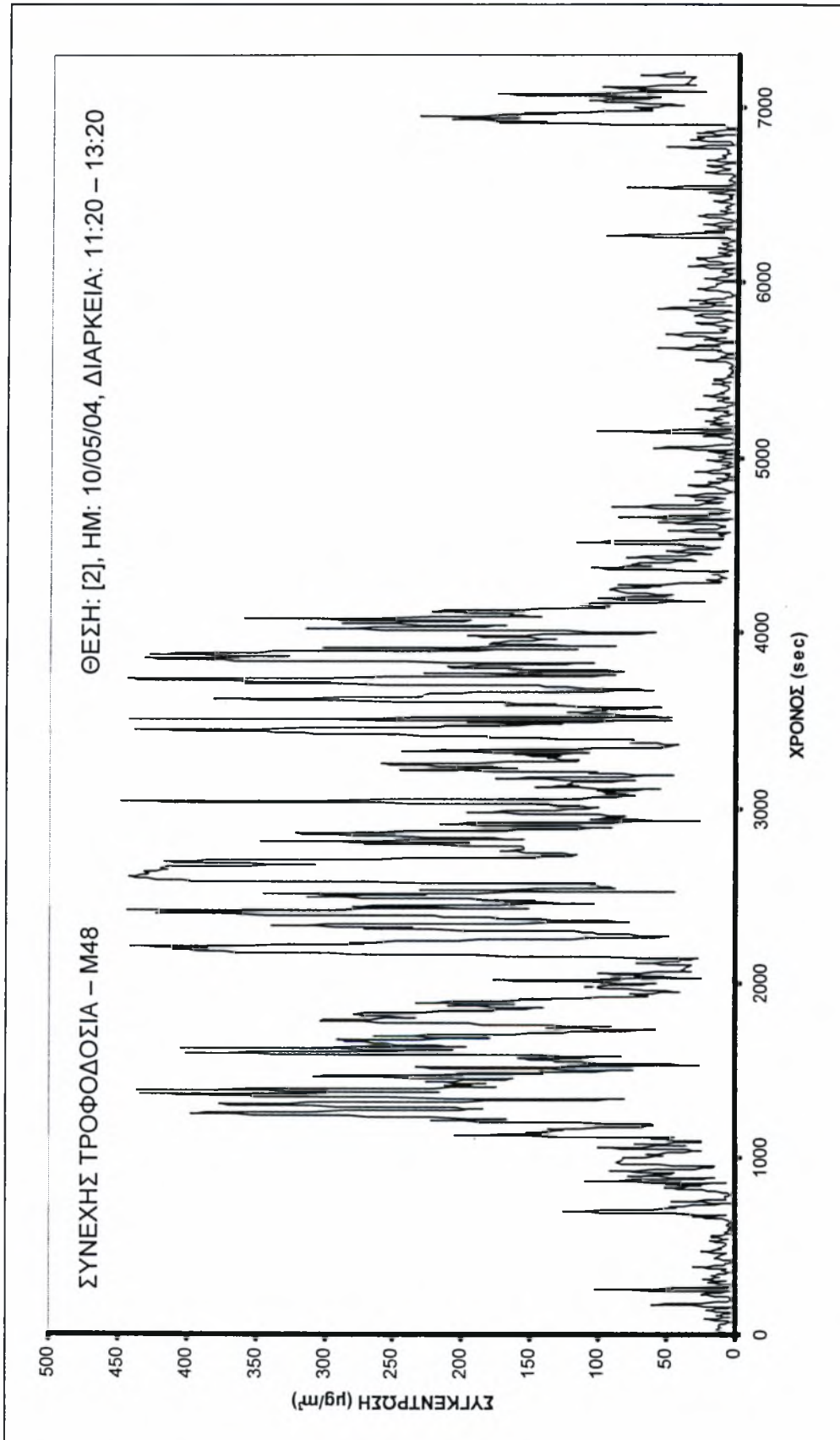


Σχήμα 5.26 – Θέση [2]. Συνεχής τροφοδοσία – M48

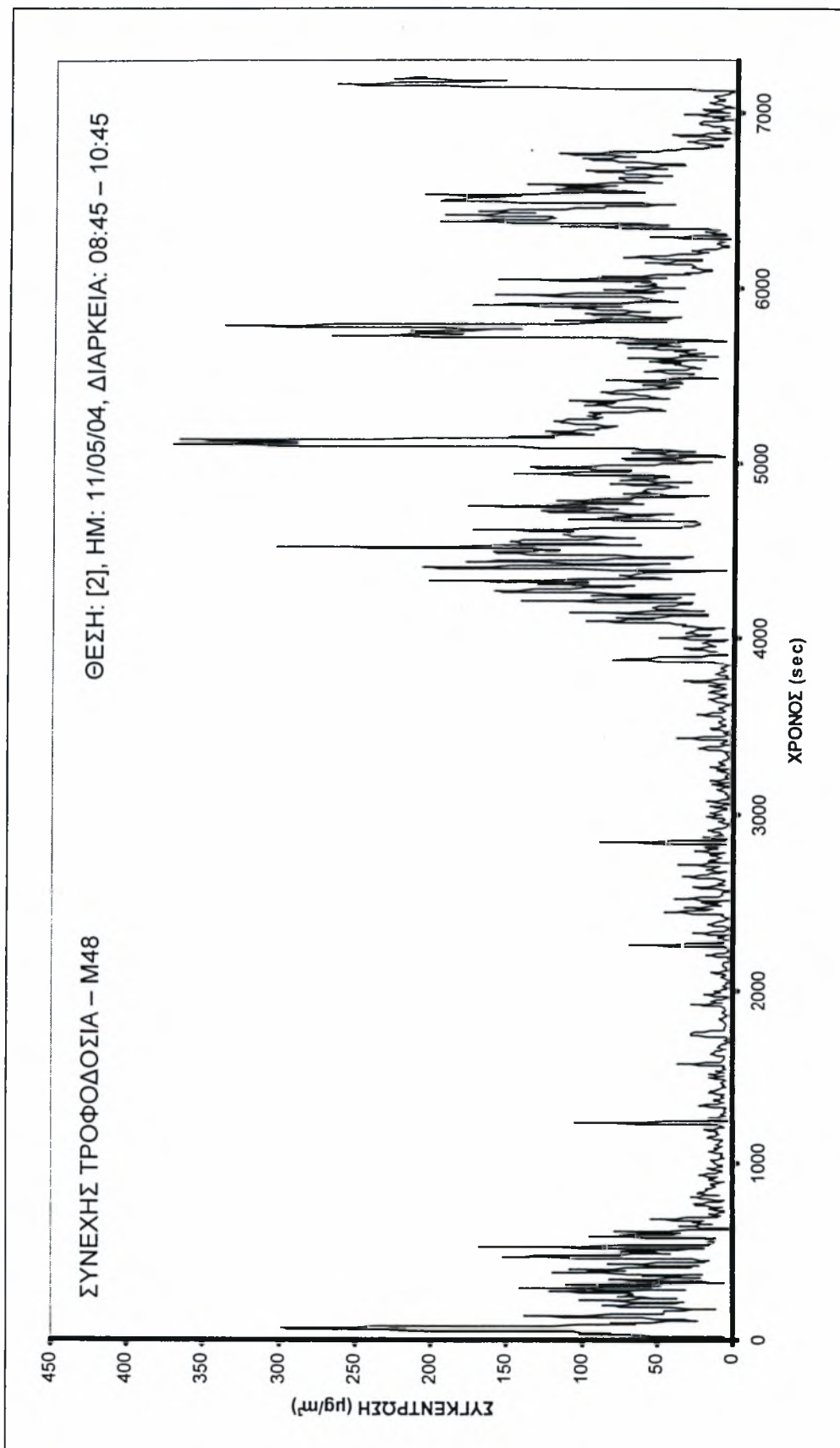




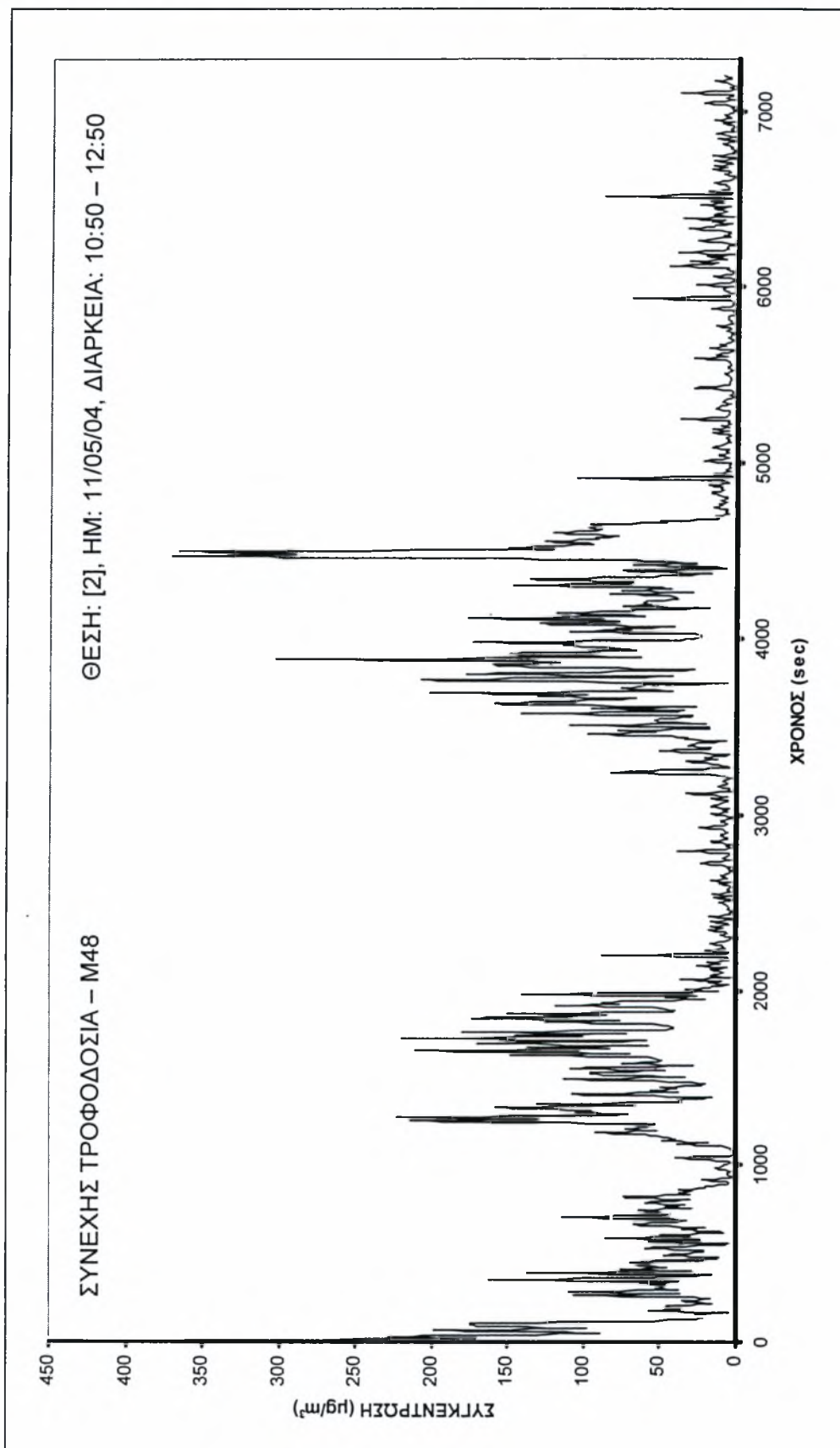
Σχήμα 5.27 - Θέση [2], Συνεχής τροφοδοσία - M48



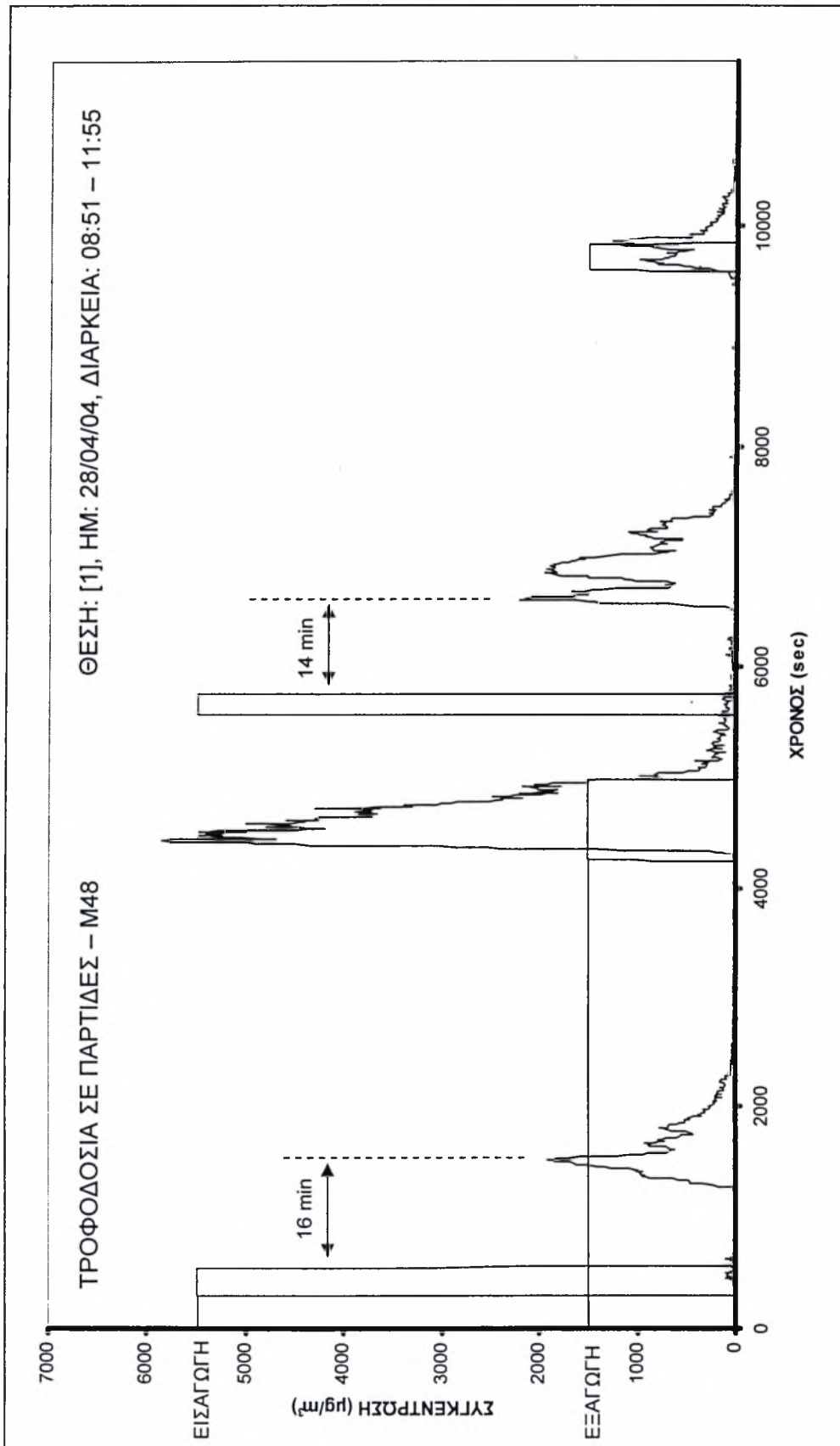
Σχήμα 5.28 – Θέση [2], Συνεχής τροφοδοσία – M48



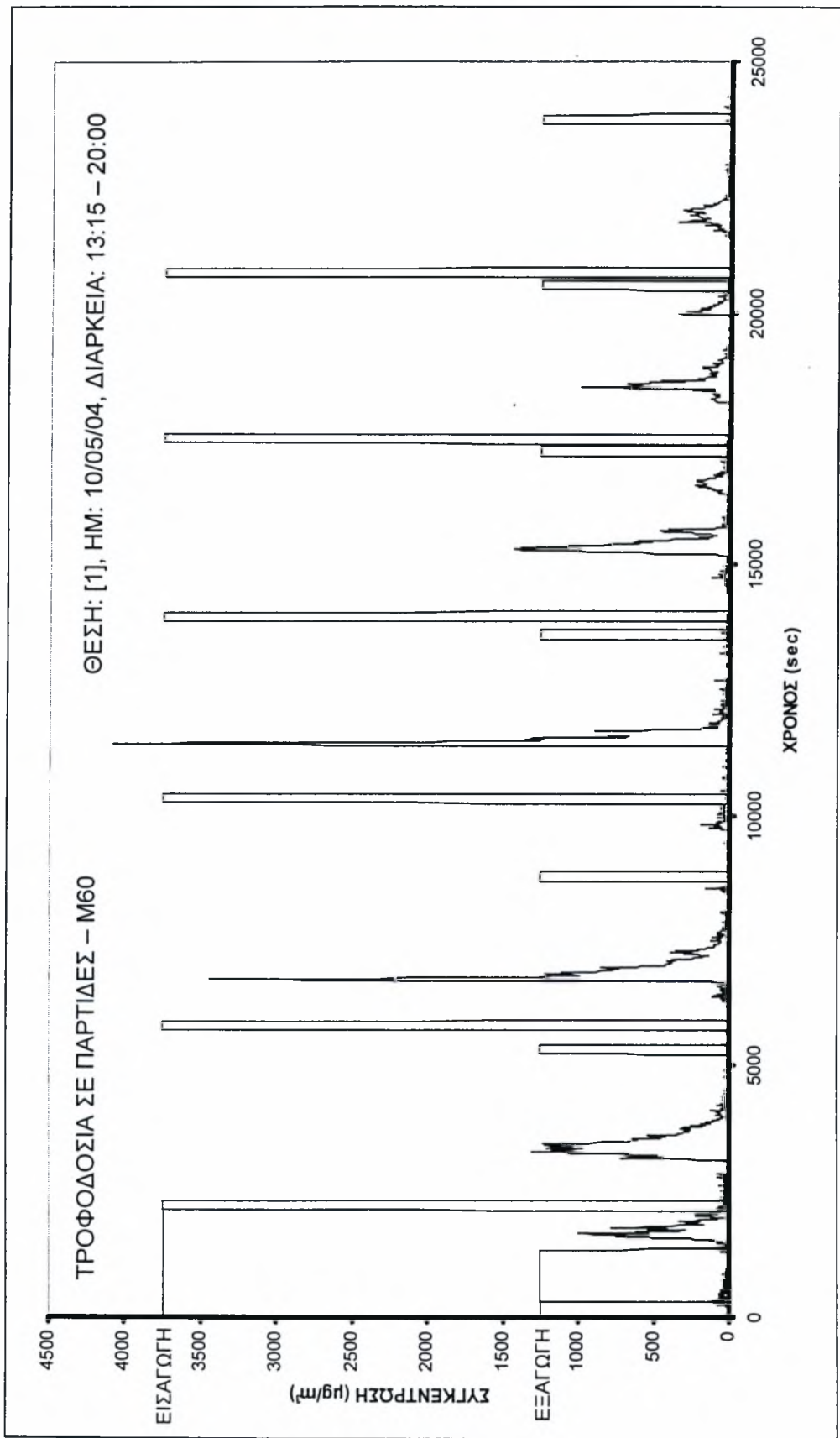
Σχήμα 5.29 – Θέση [2], Συνεχής τροφοδοσία – M48

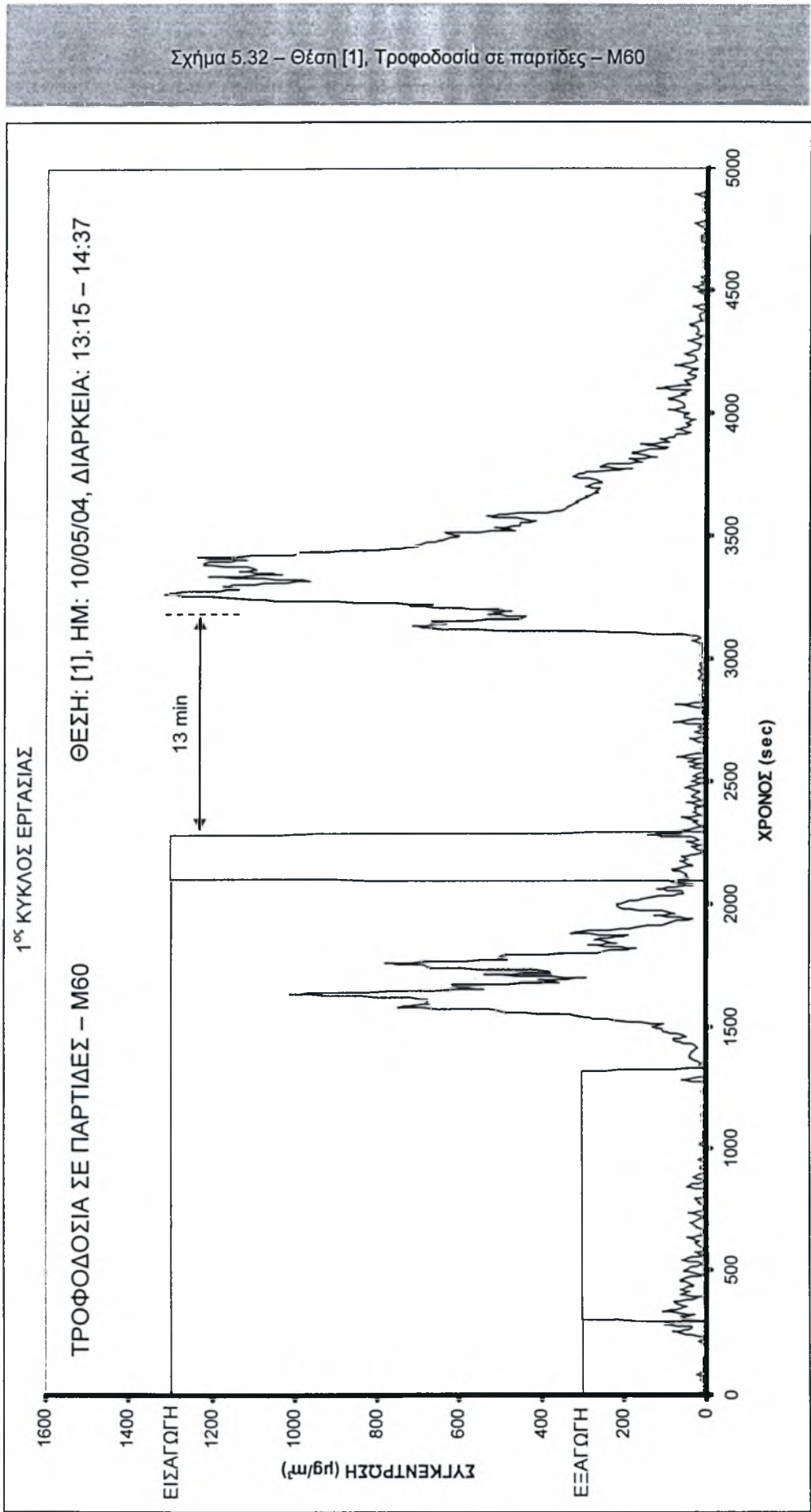


Σχήμα 5.30 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M48

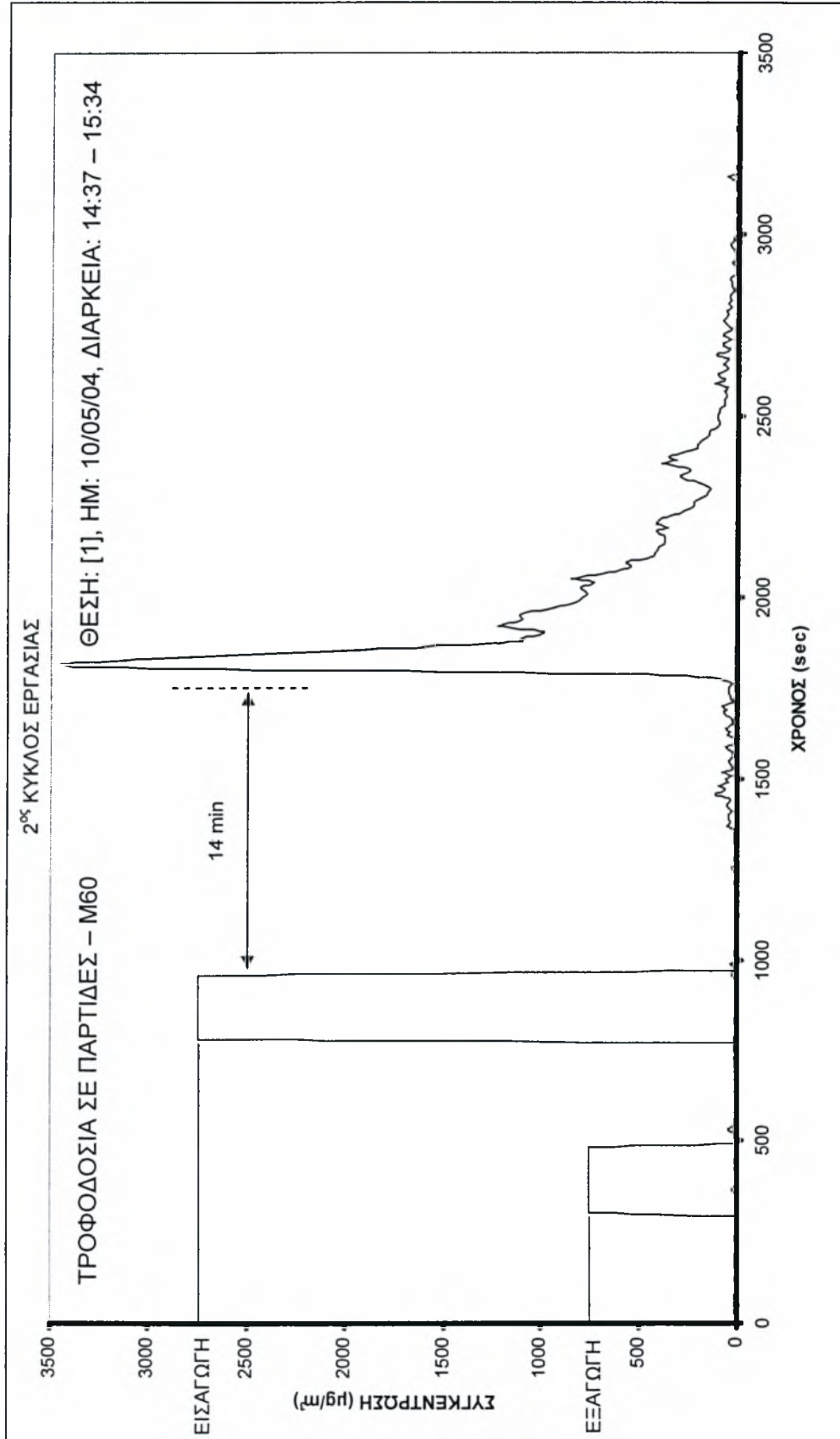


Σχήμα 5.31 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M60

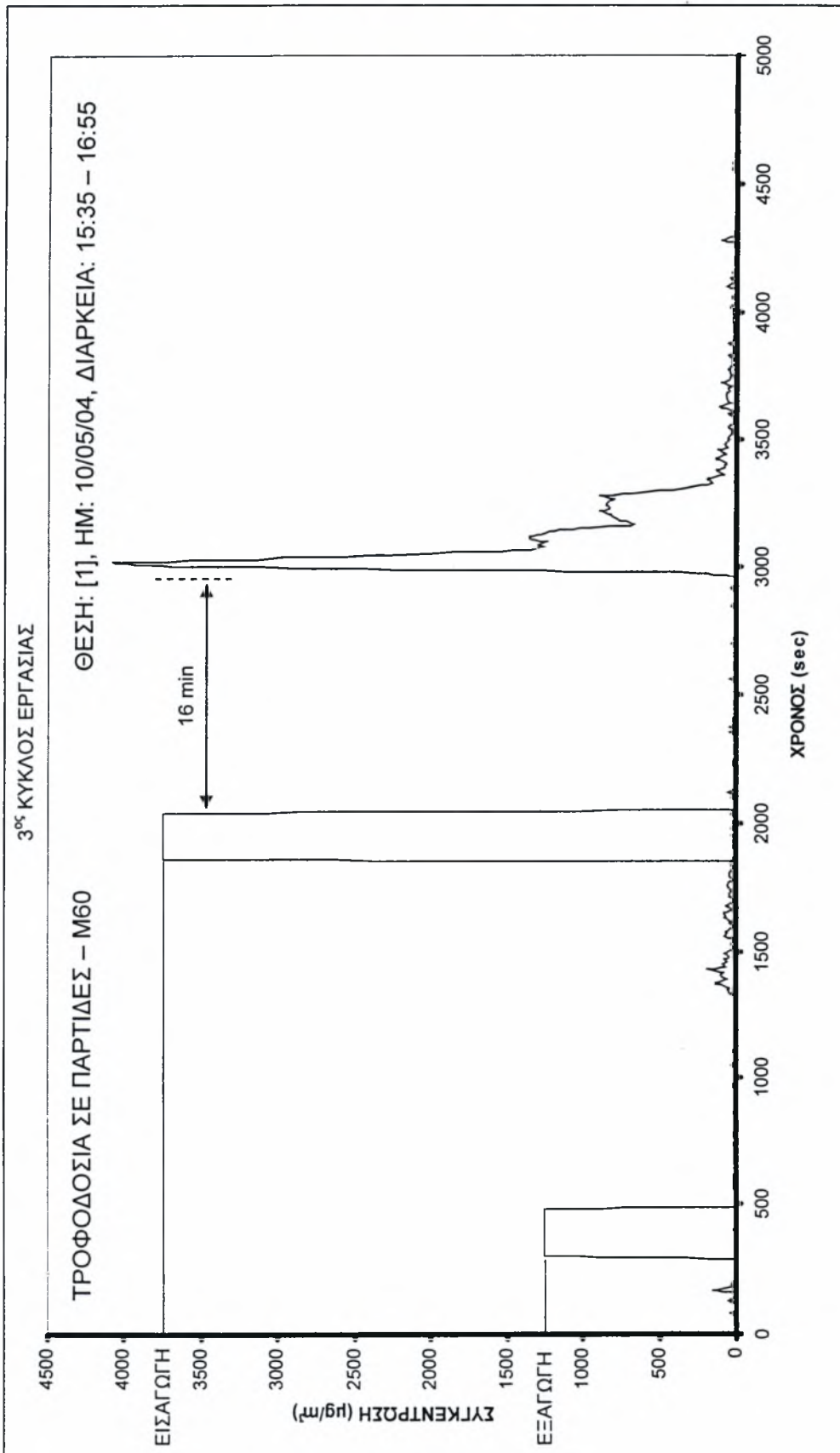




Σχήμα 5.33 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M60

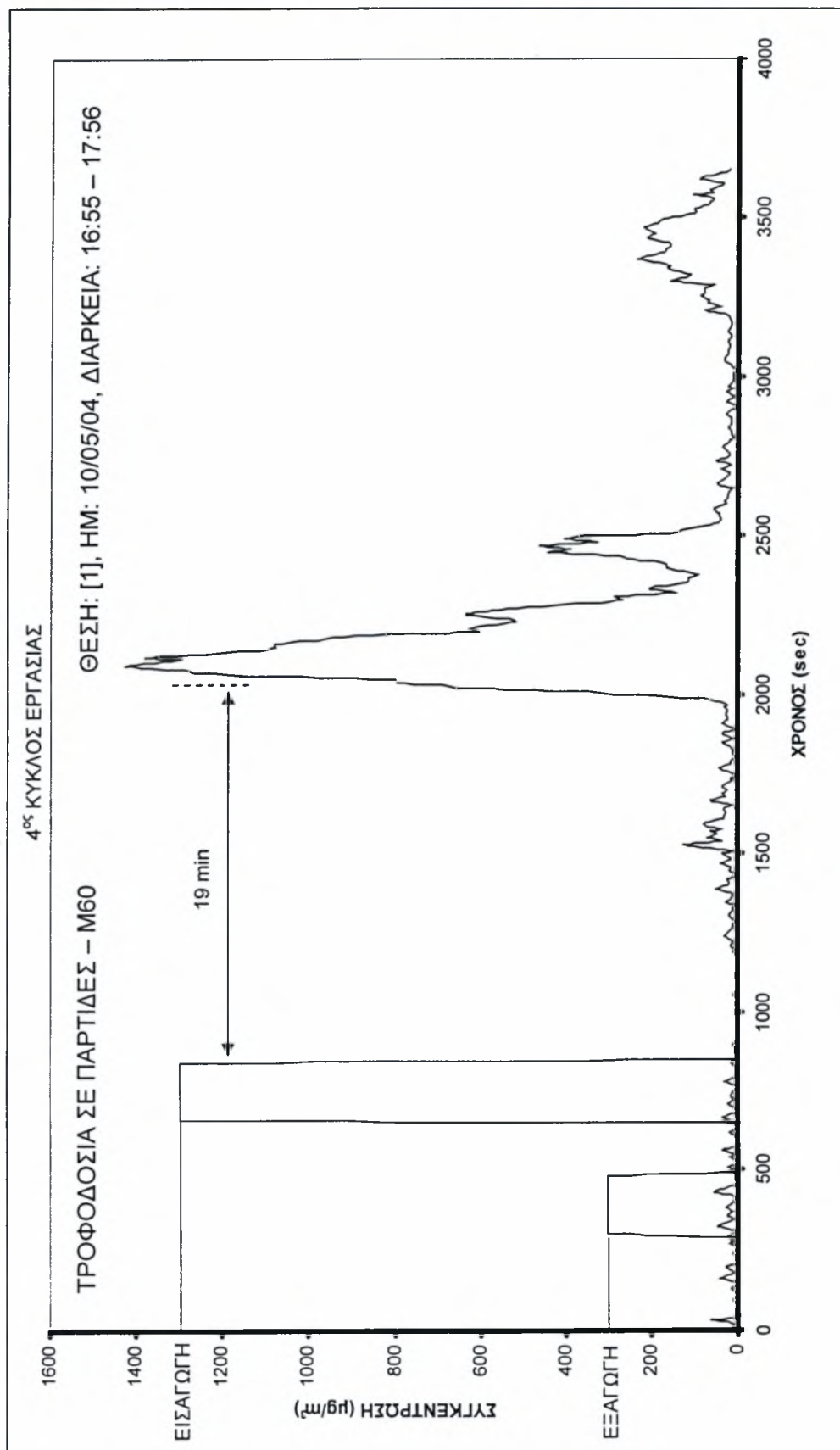


Σχήμα 5.34 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M60

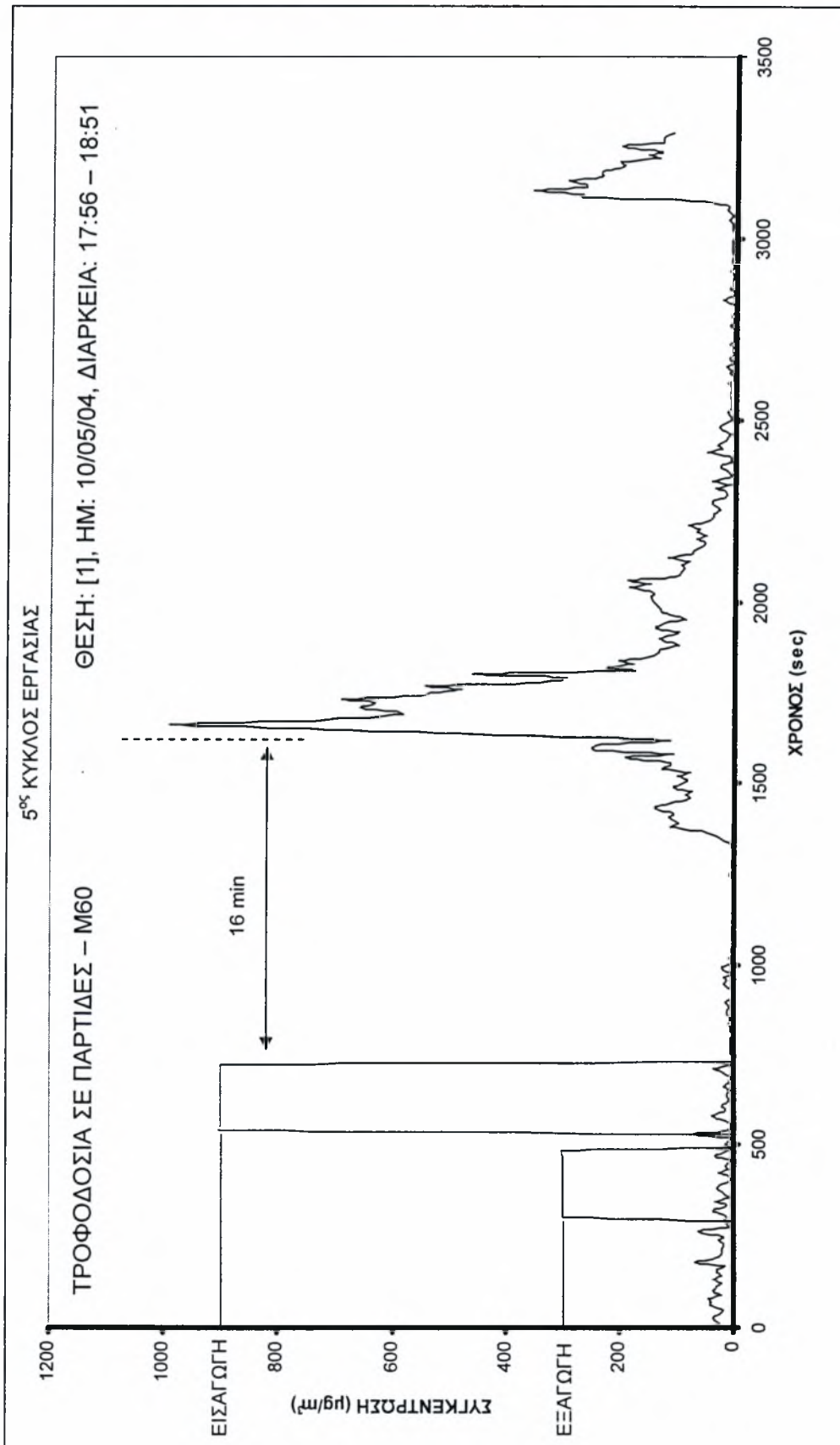


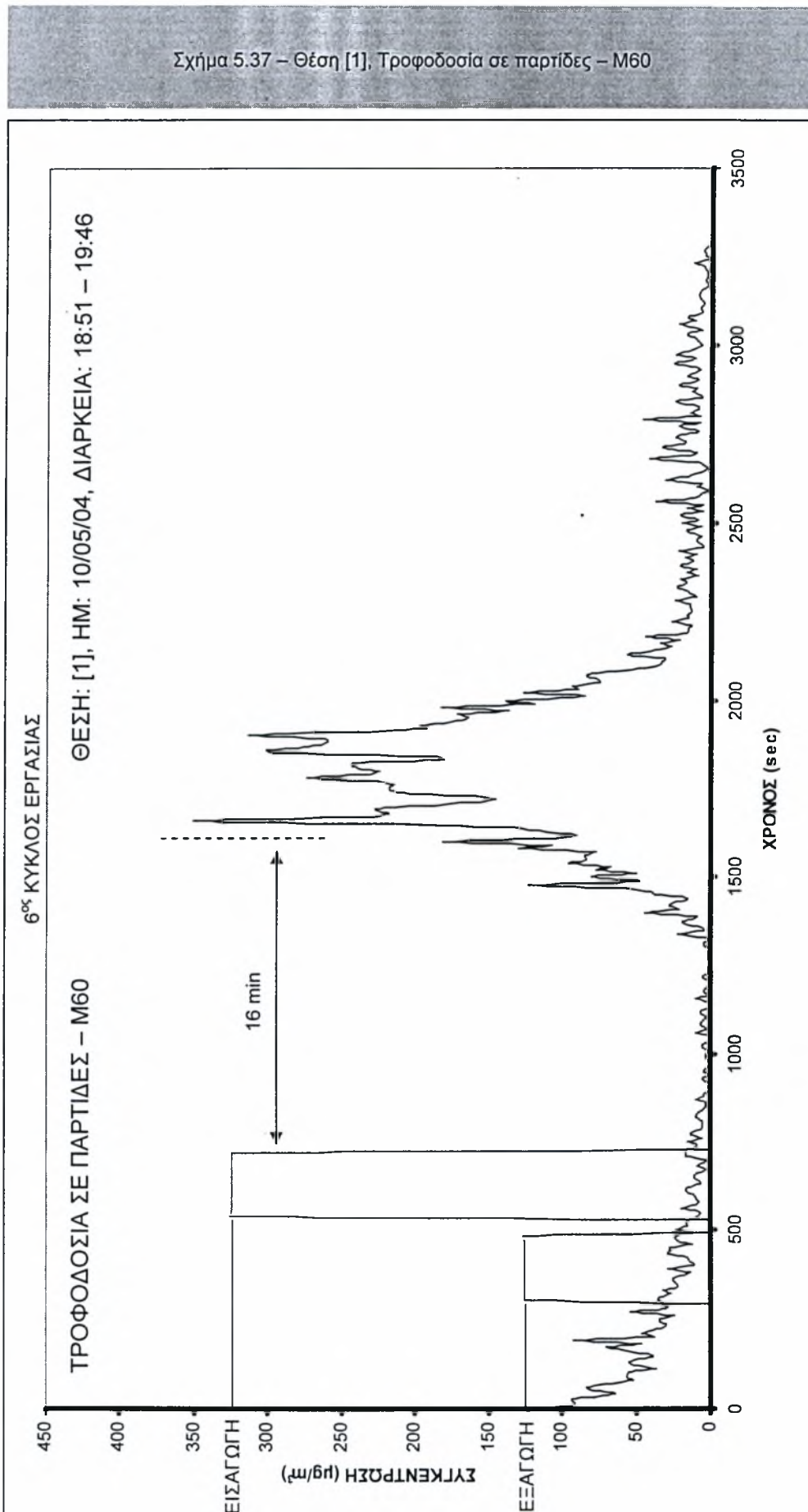


Σχήμα 5.35 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M60

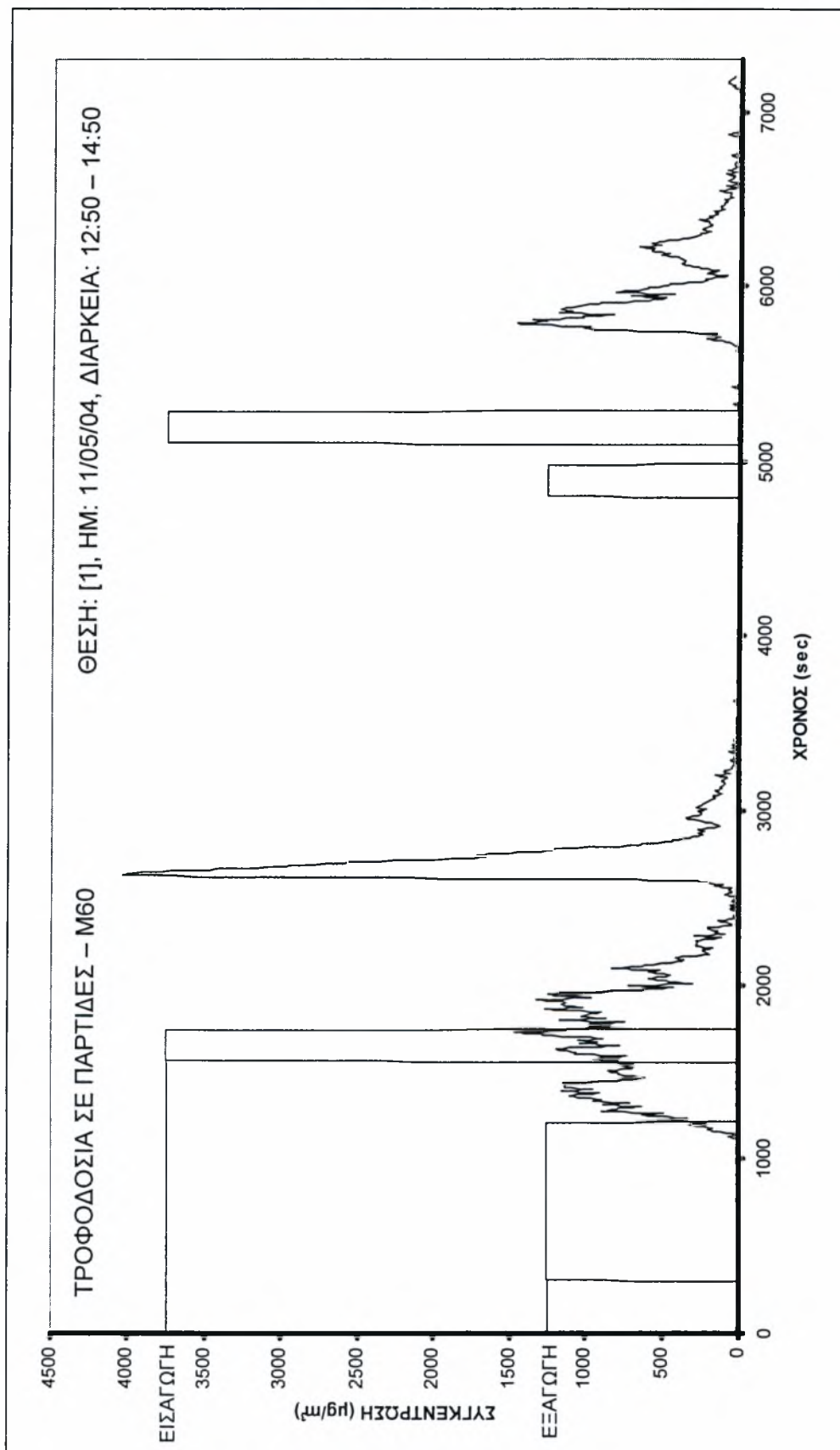


Σχήμα 5.36 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M60

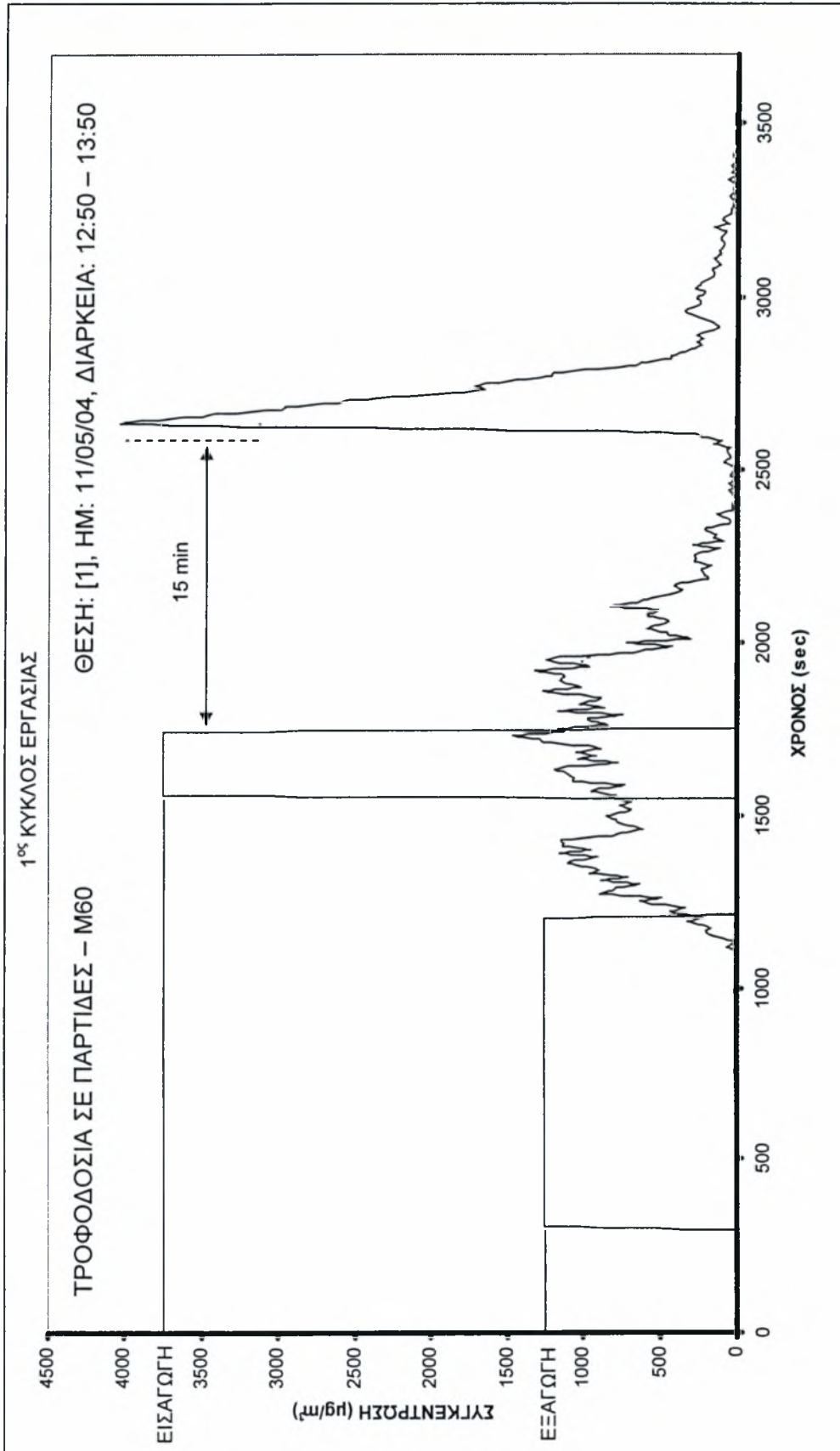




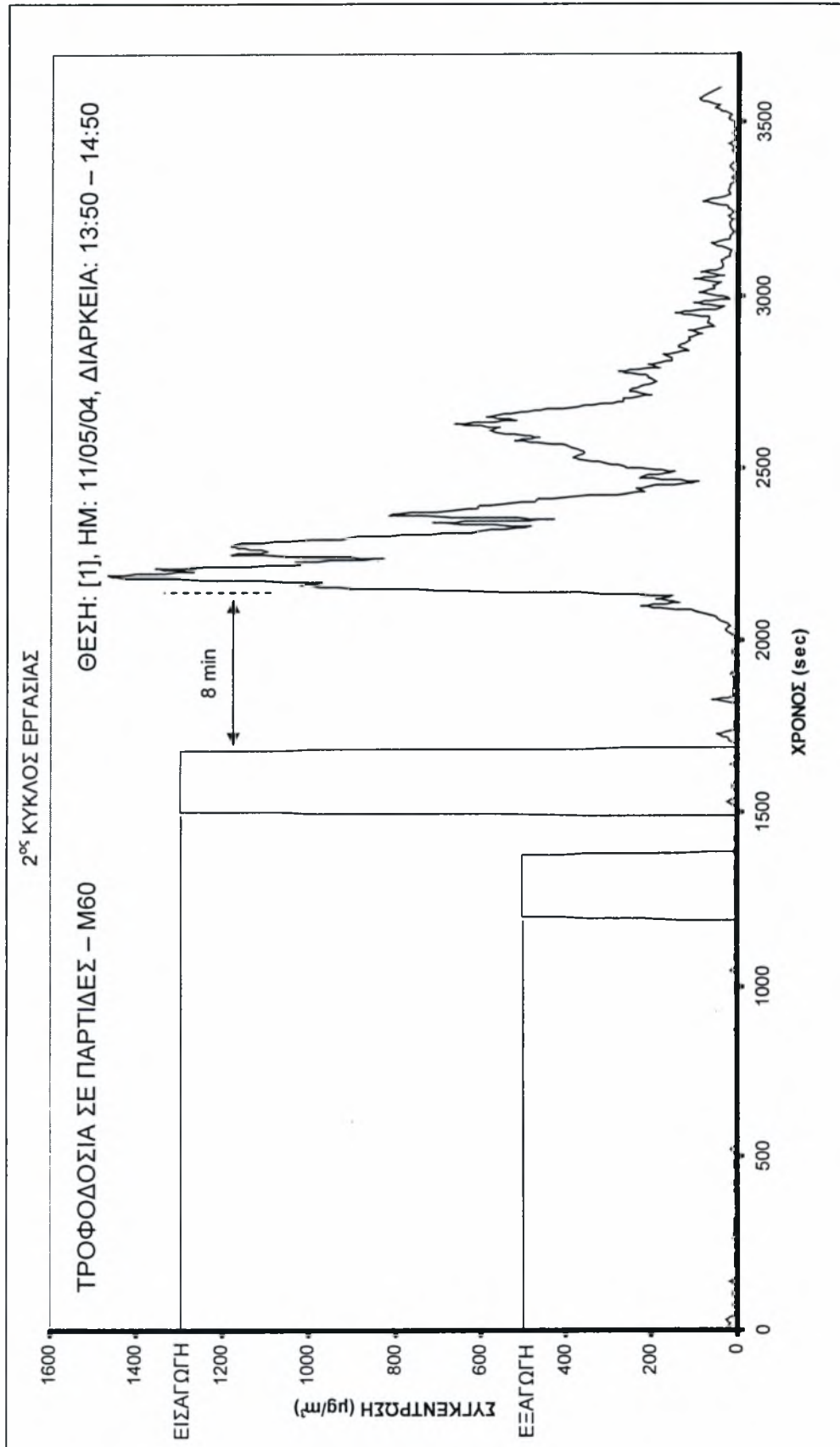
Σχήμα 5.38 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M60



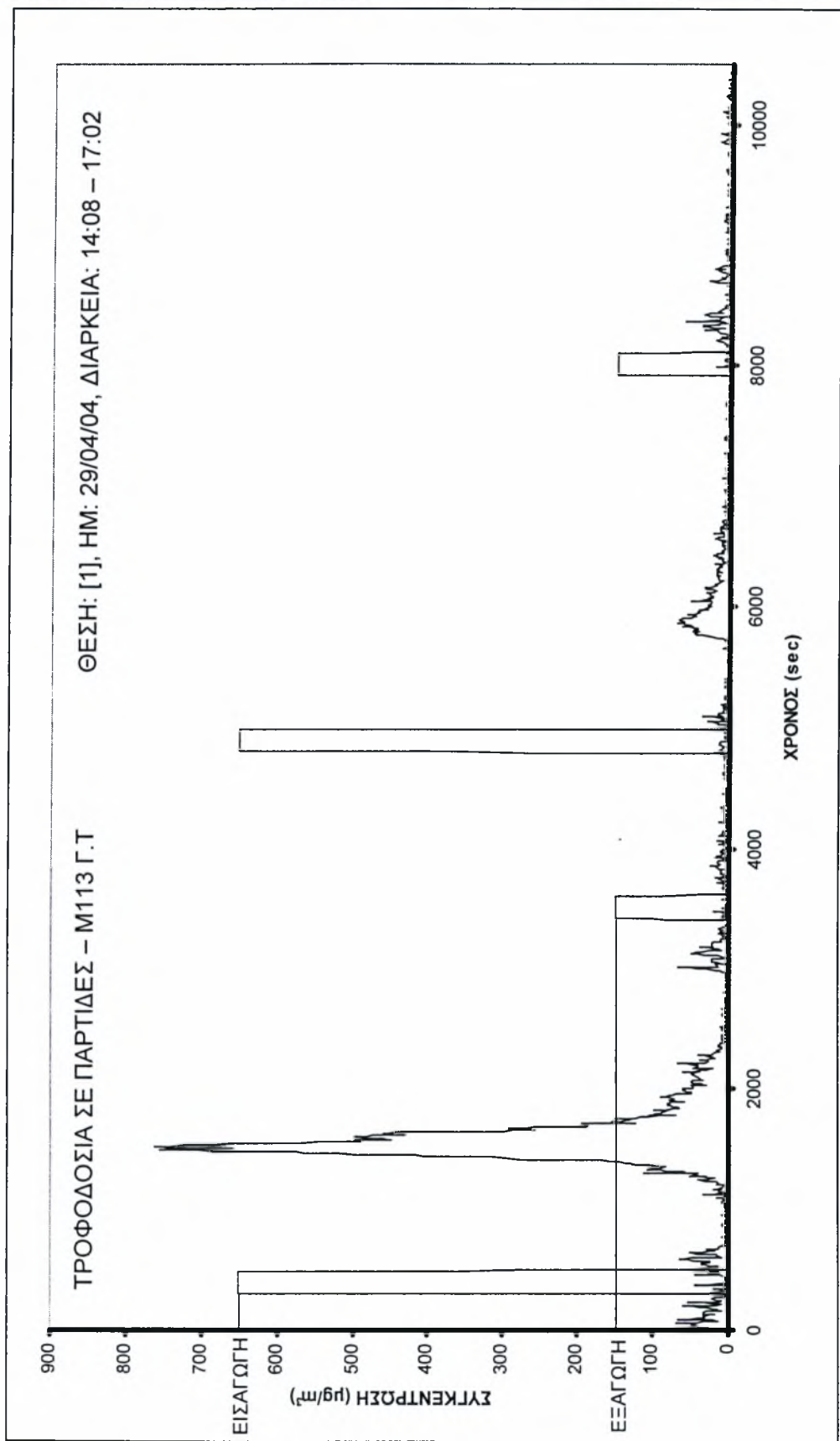
Σχήμα 5.39 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M60



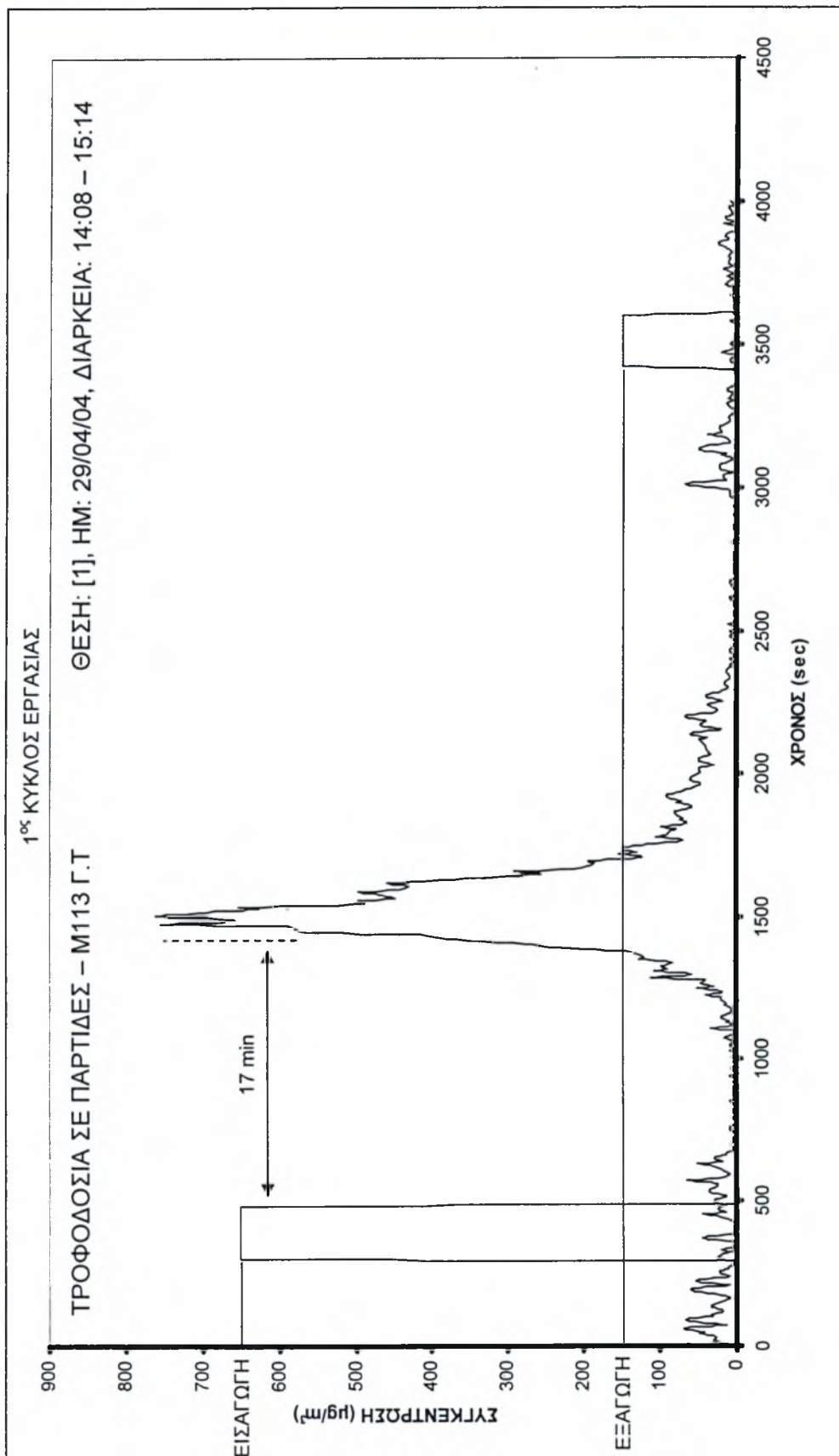
Σχήμα 5.40 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M60



Σχήμα 5.41 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M113Γ.Τ

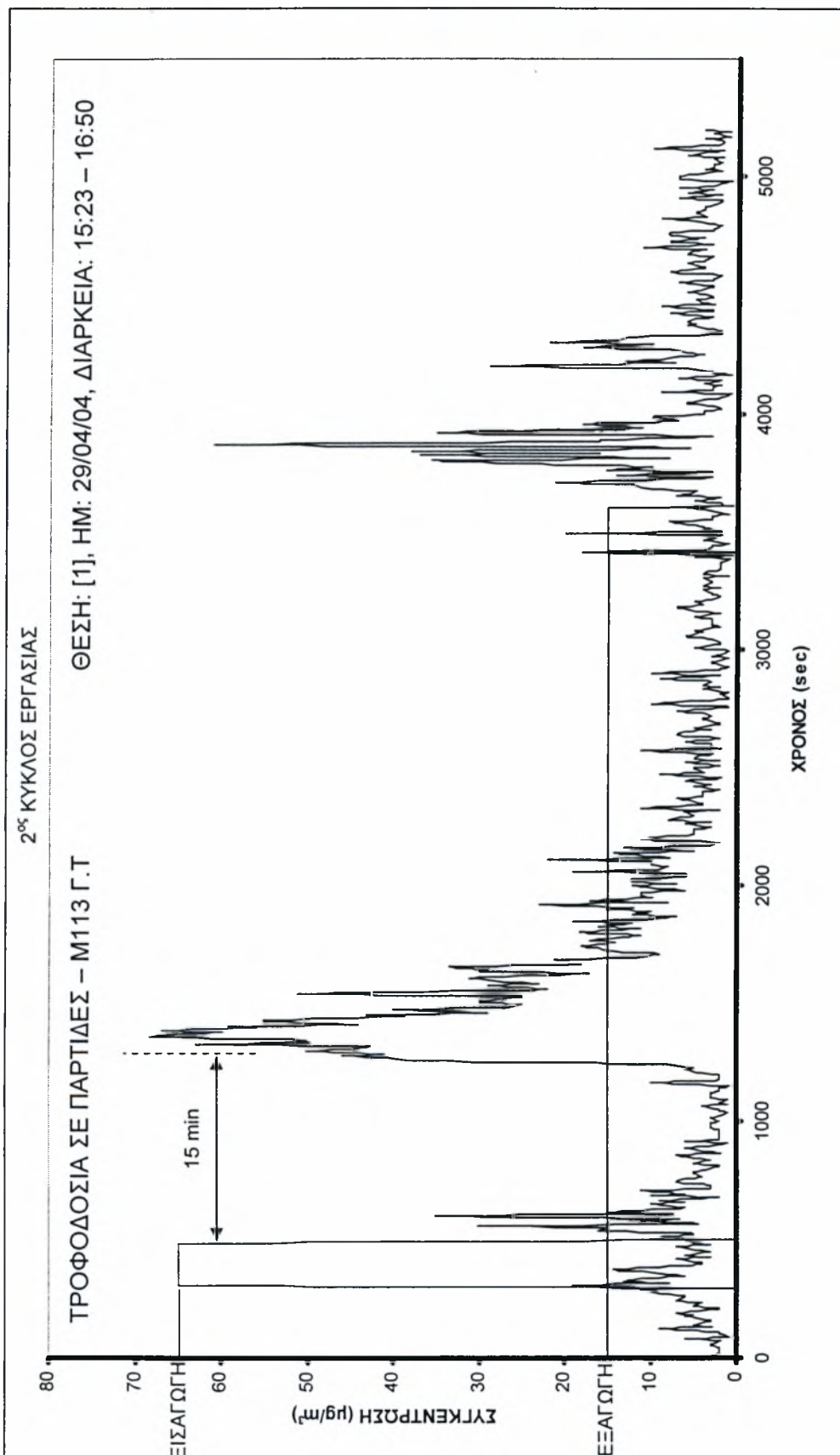


Σχήμα 5.42 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M113Γ.Τ

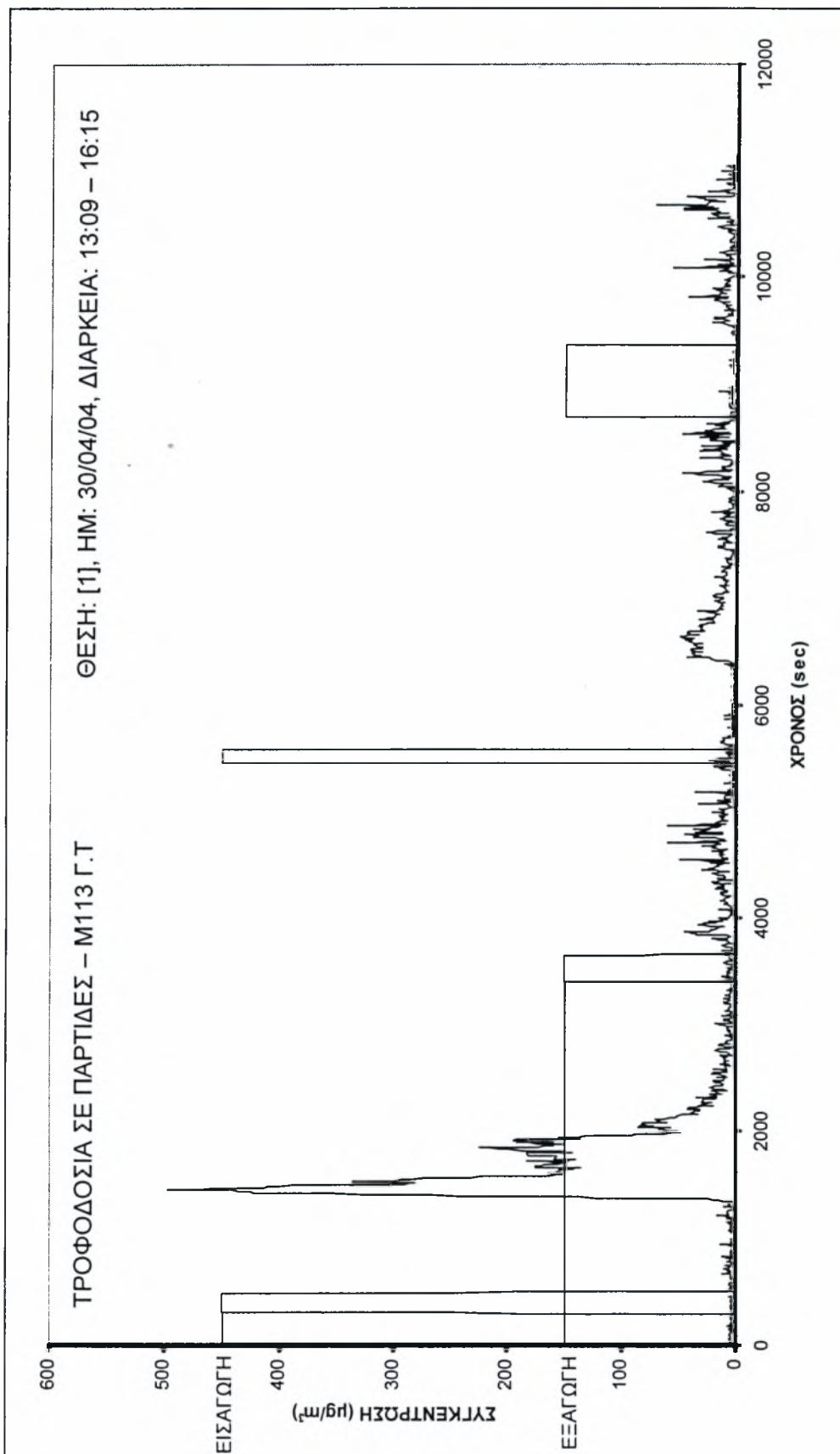




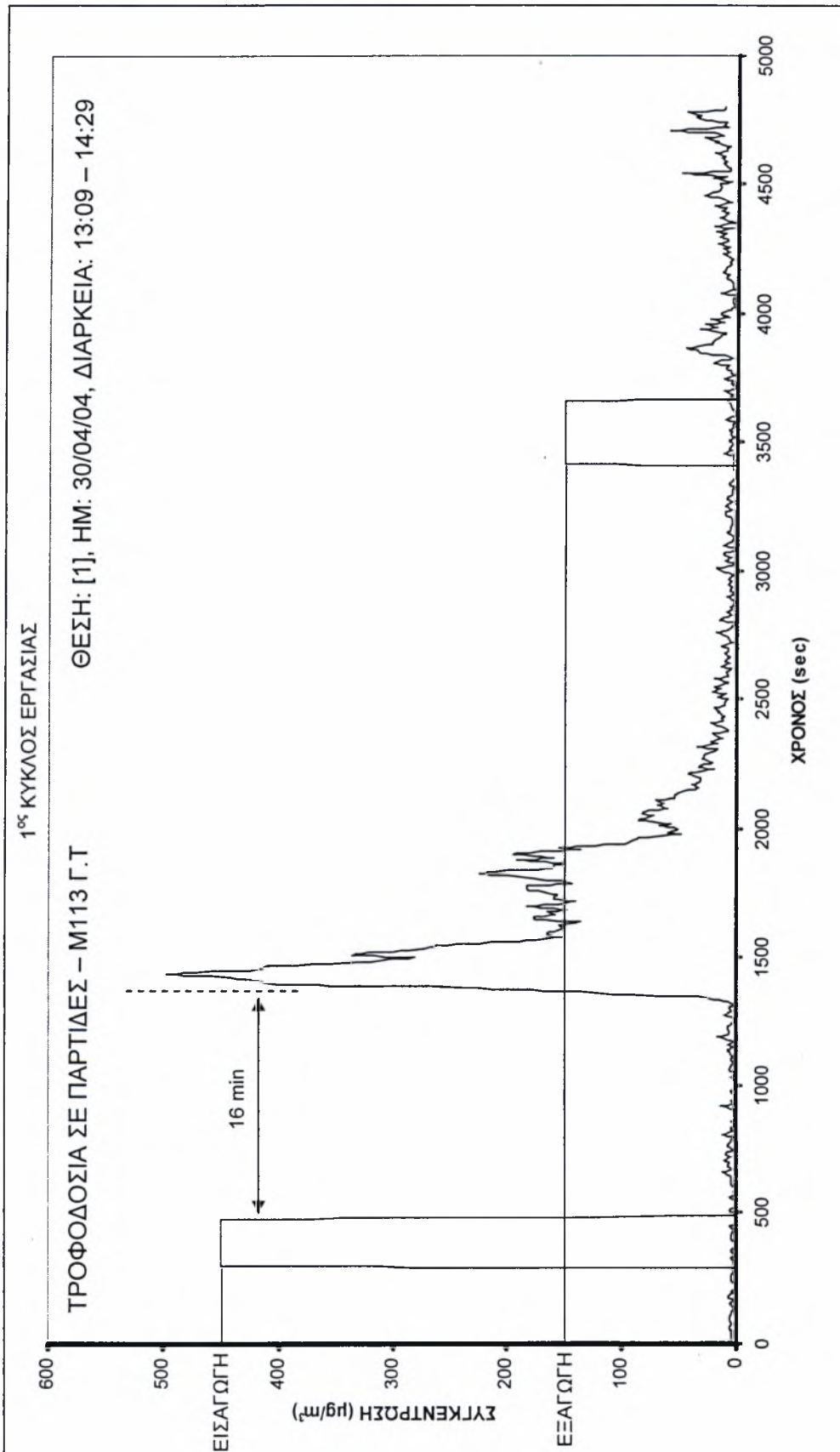
Σχήμα 5.43 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M113Γ.Τ



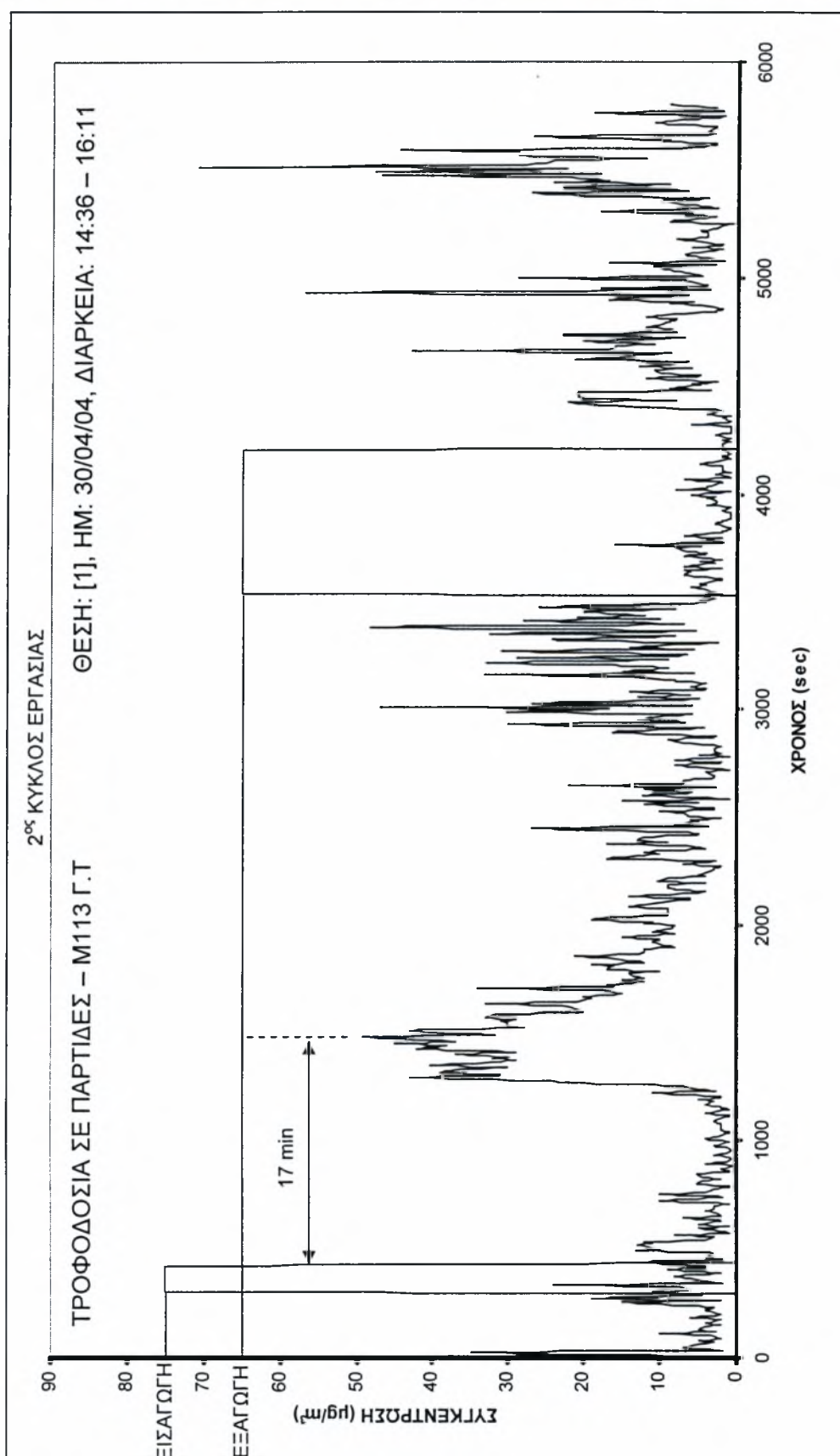
Σχήμα 5.44 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M113Γ.Τ



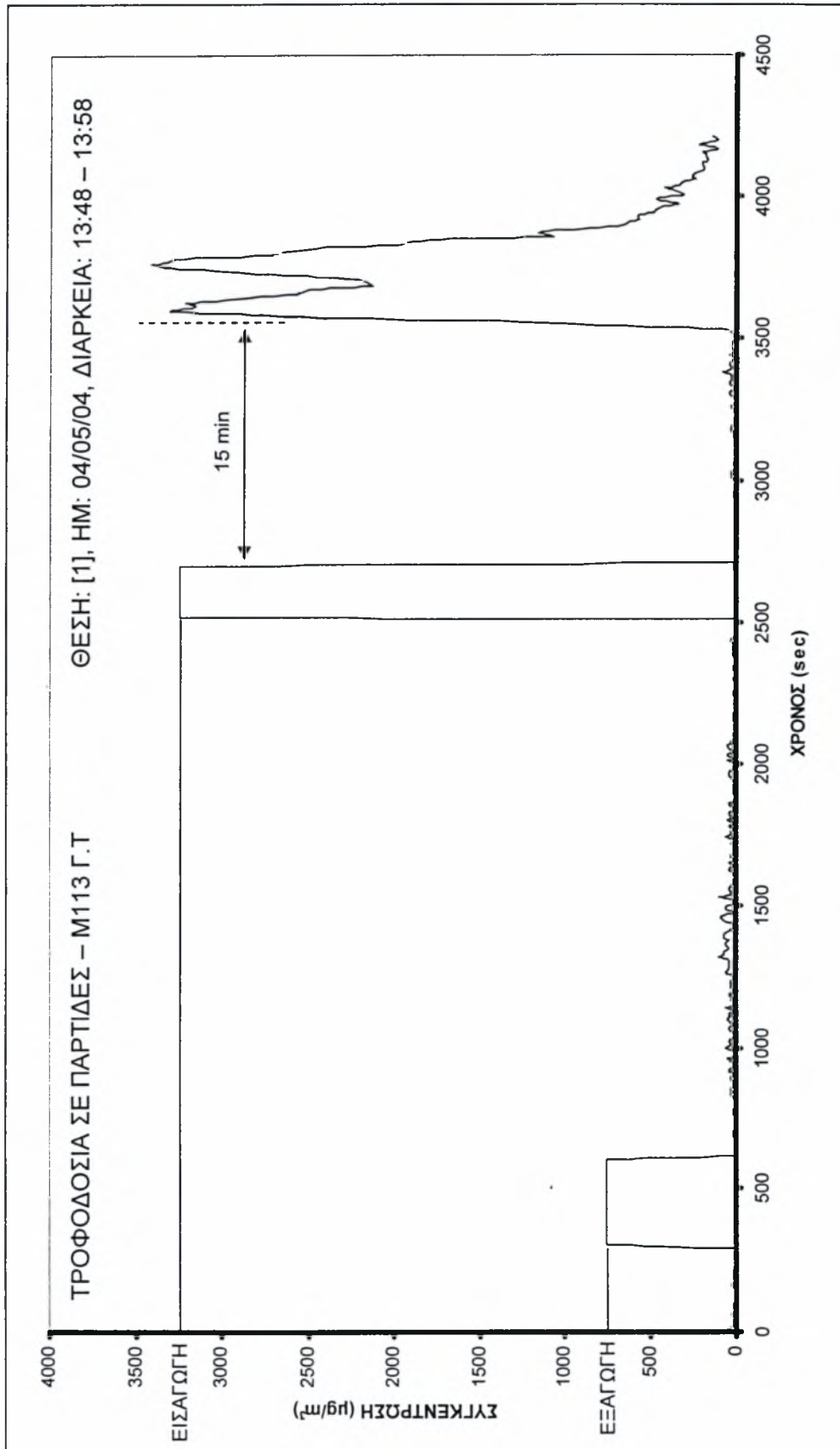
Σχήμα 5.45 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M113Γ.Τ



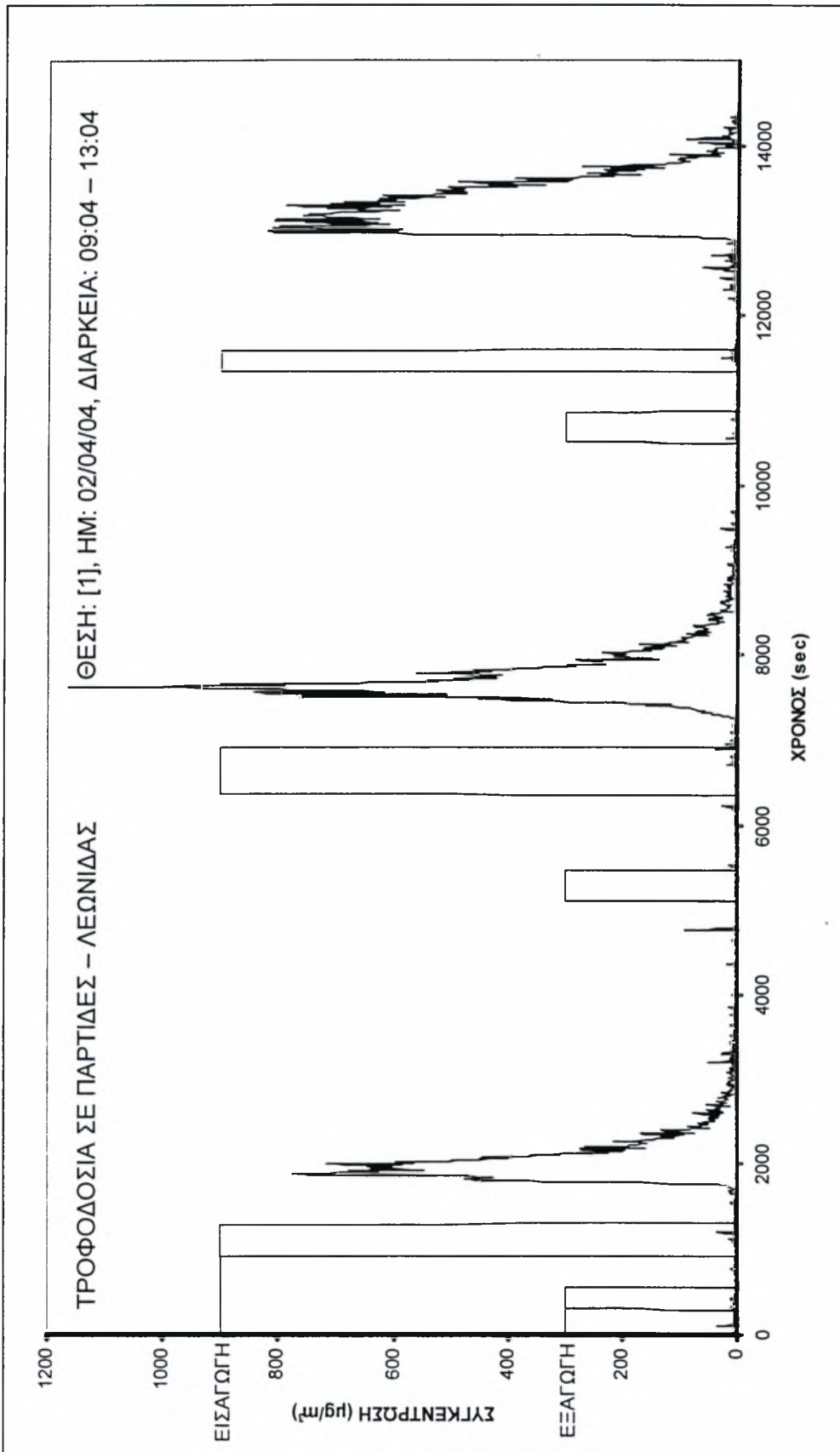
Σχήμα 5.46 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – M113Γ.Τ



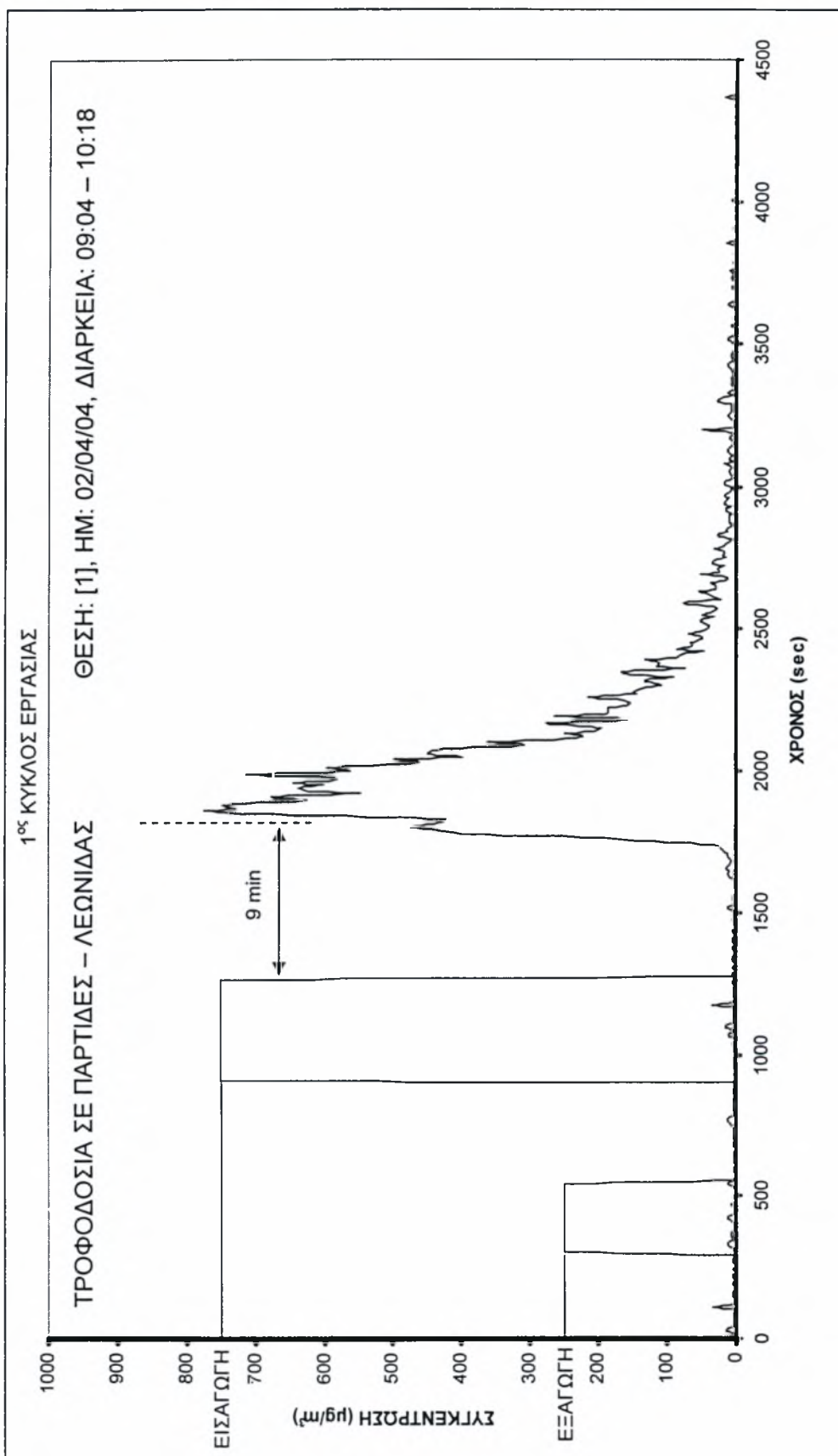
Σχήμα 5.47 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Μ113Γ.Τ



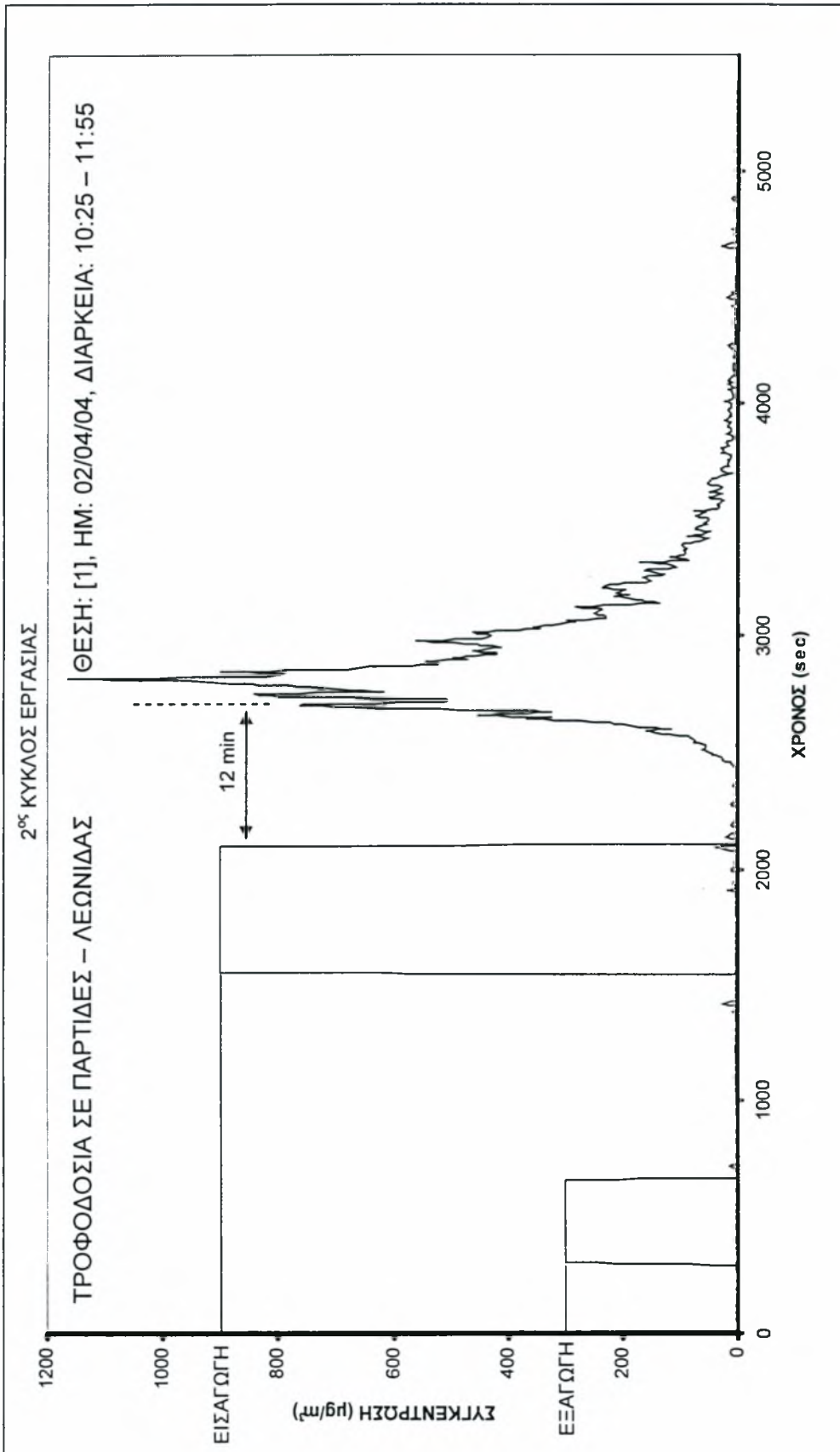
Σχήμα 5.48 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



Σχήμα 5.49 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα

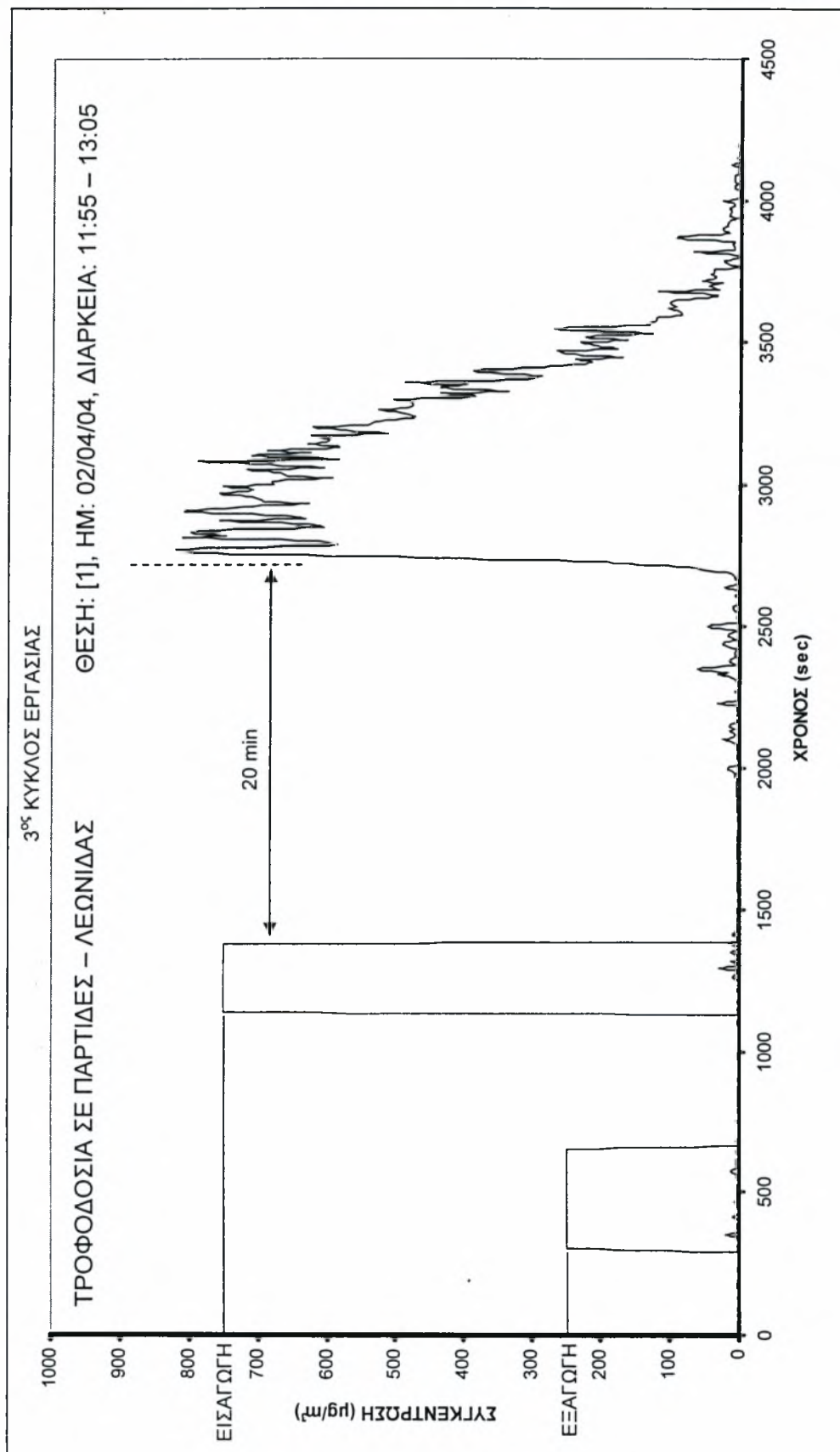


Σχήμα 5.50 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα

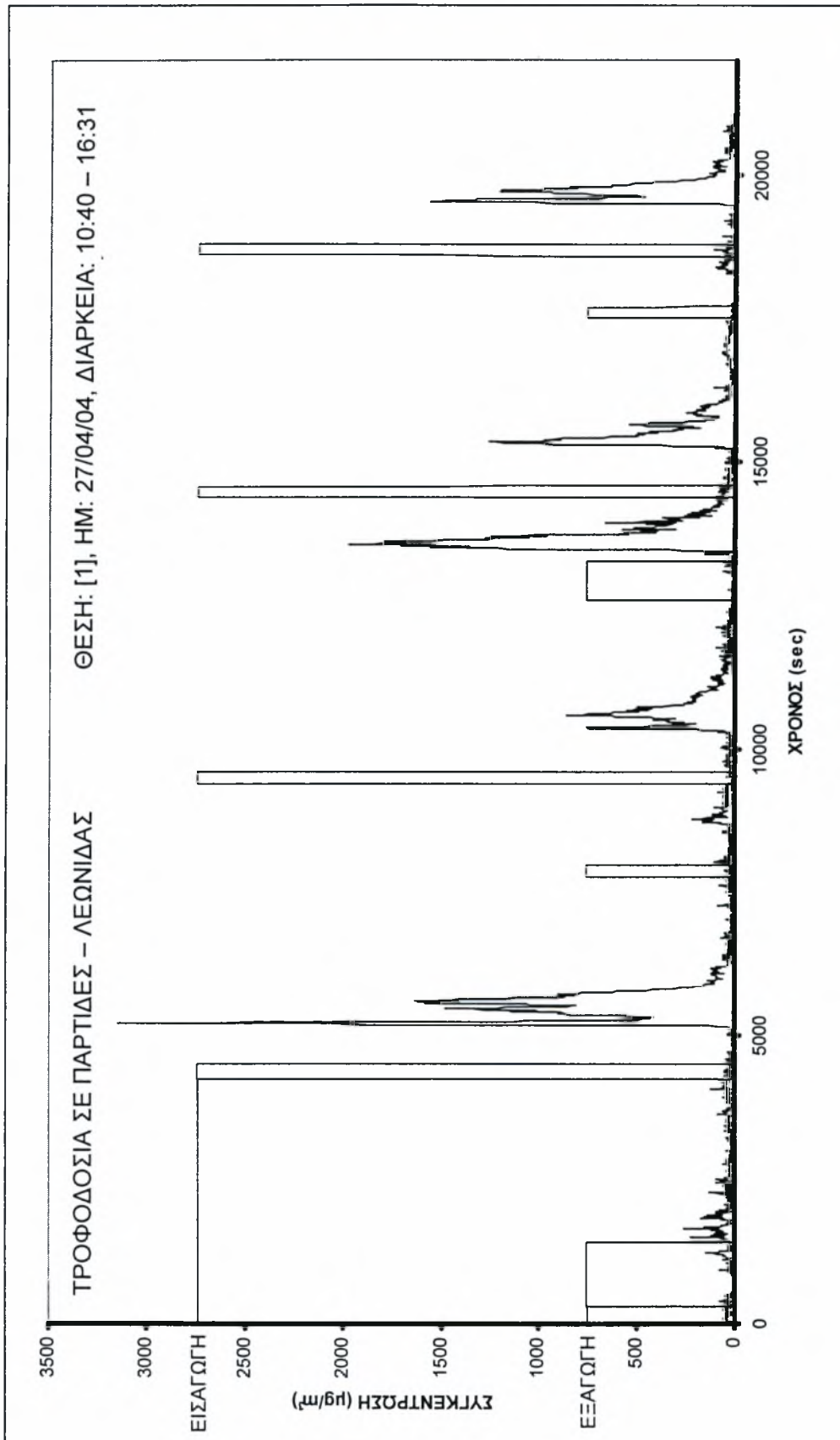




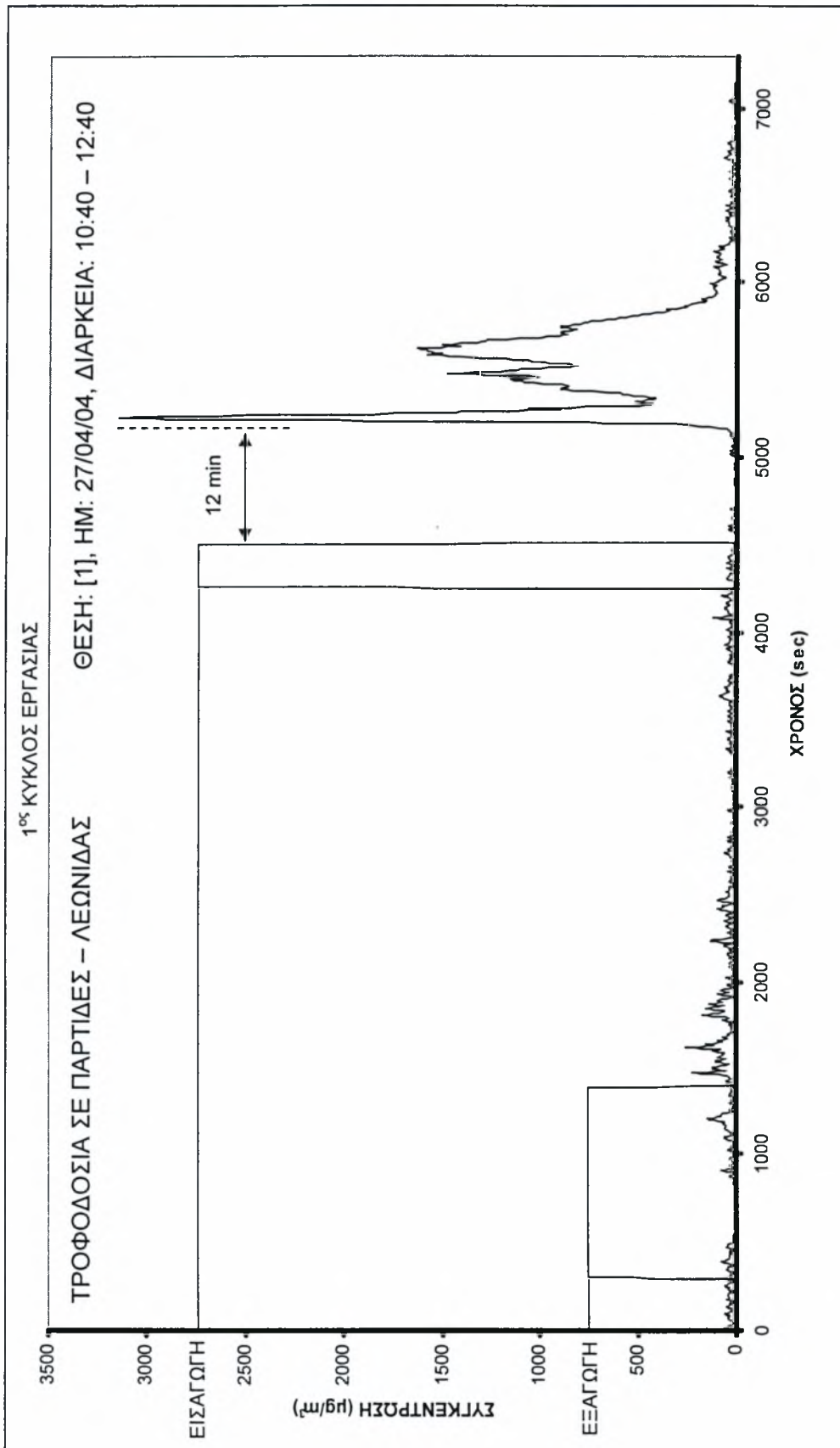
Σχήμα 5.51 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



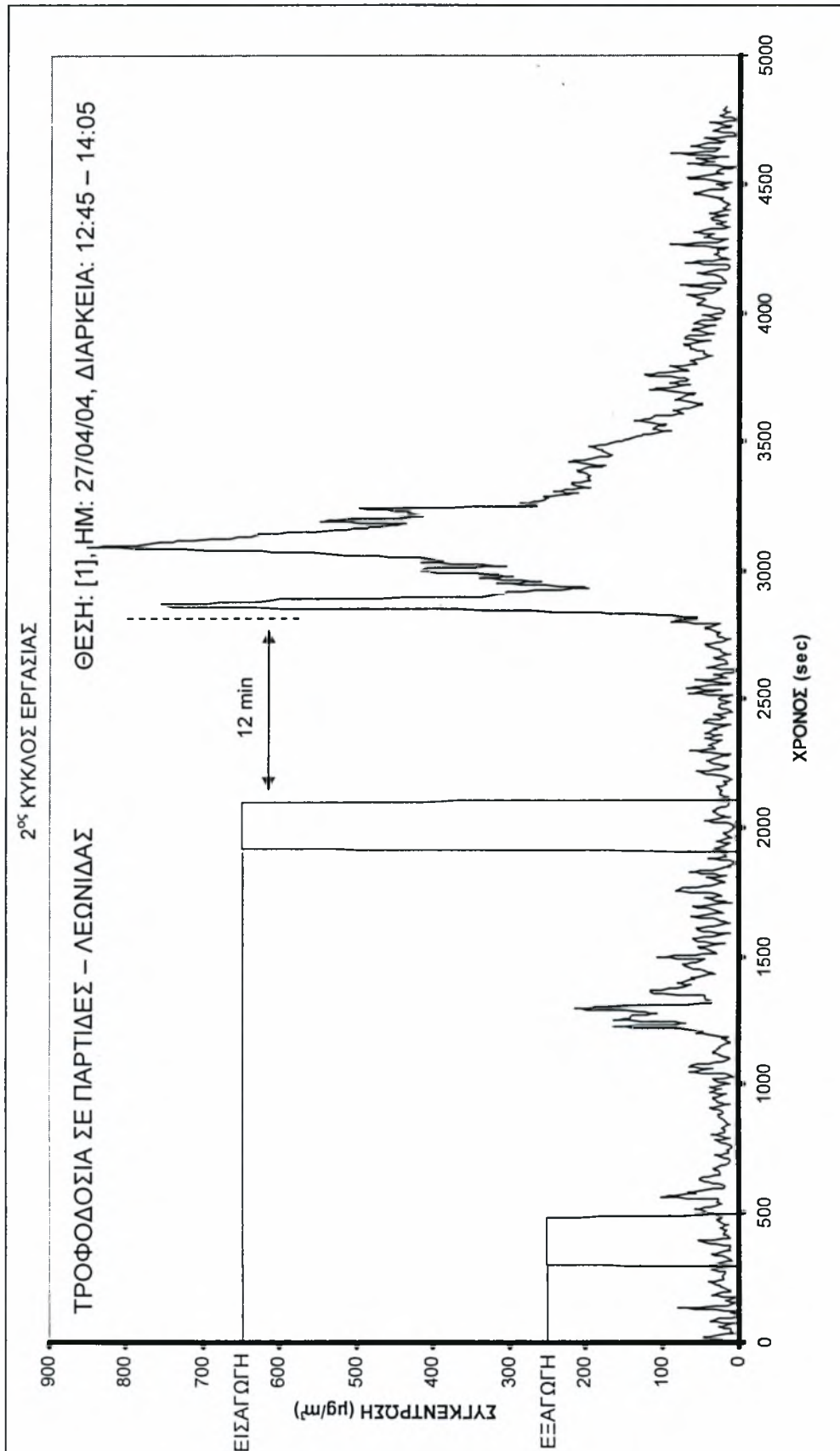
Σχήμα 5.52 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



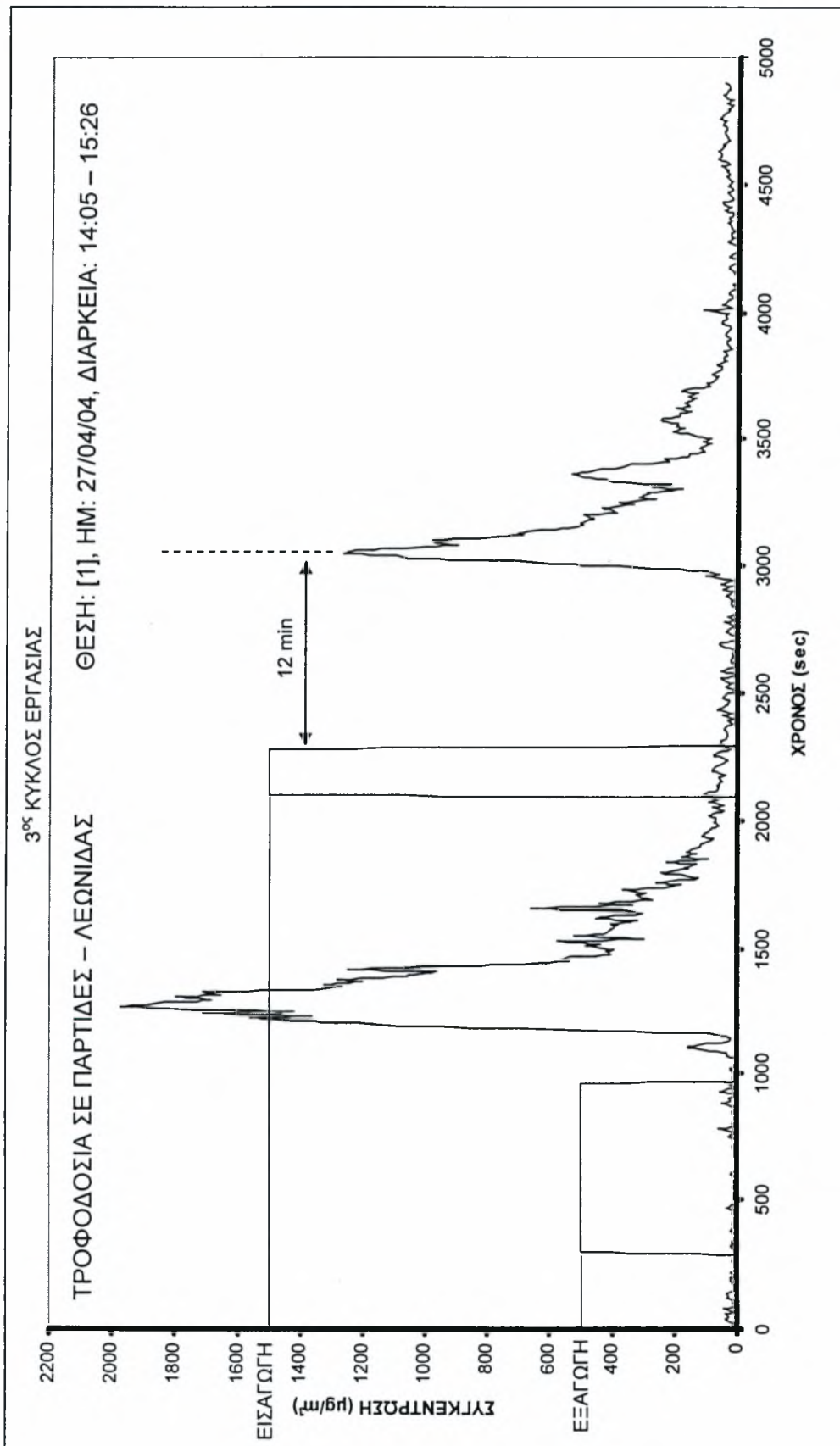
Σχήμα 5.53 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



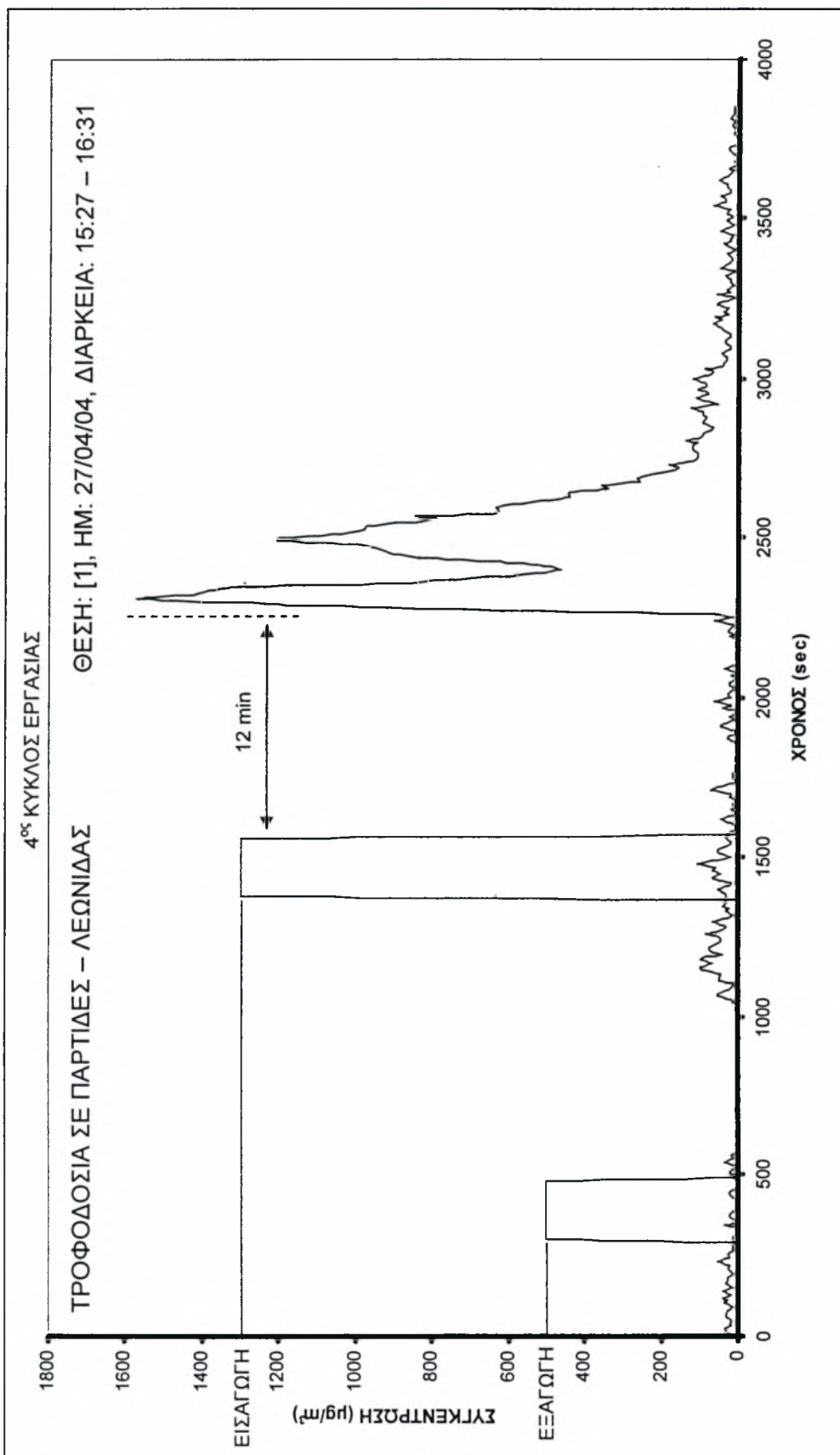
Σχήμα 5.54 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



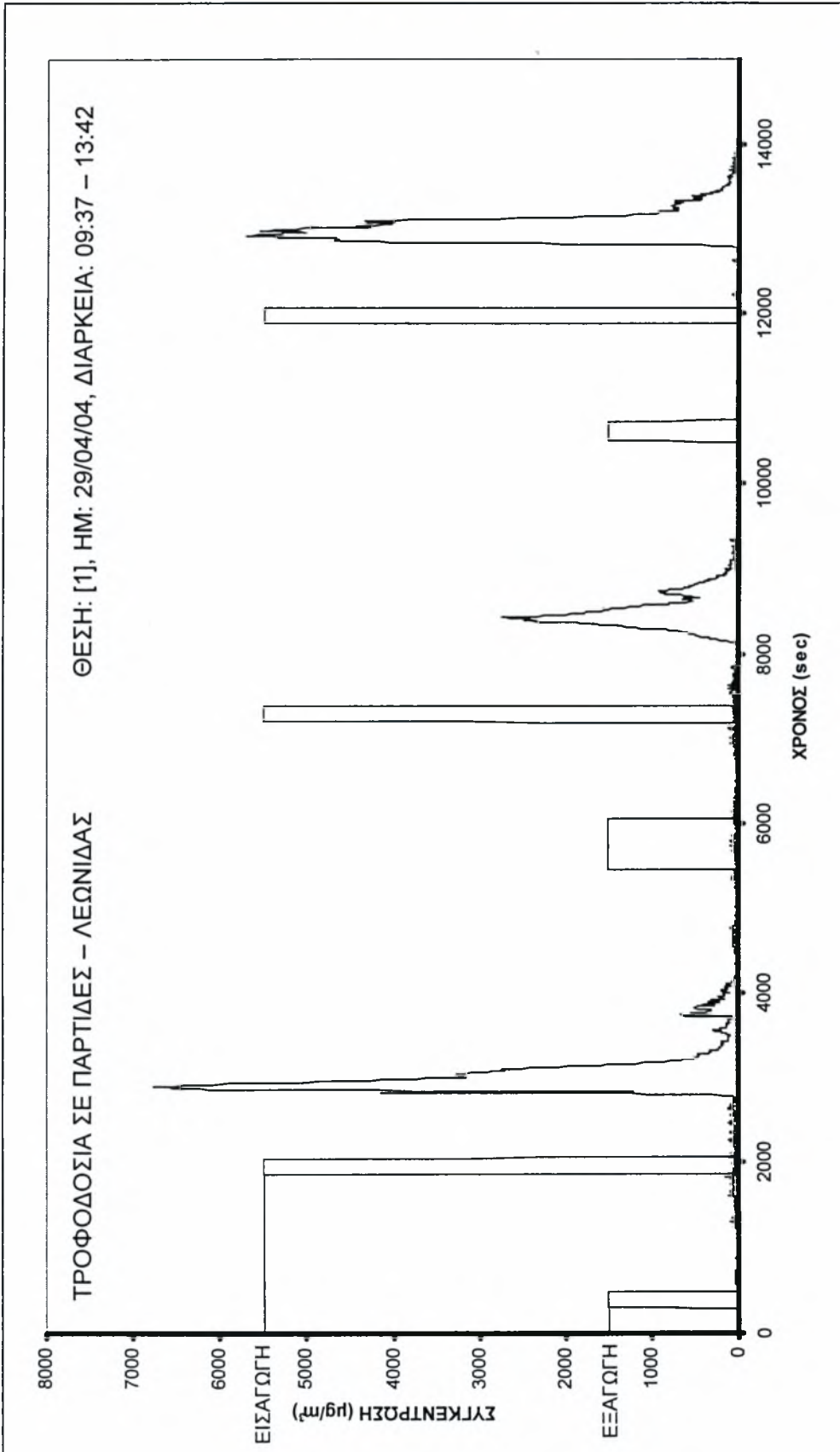
Σχήμα 5.55 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



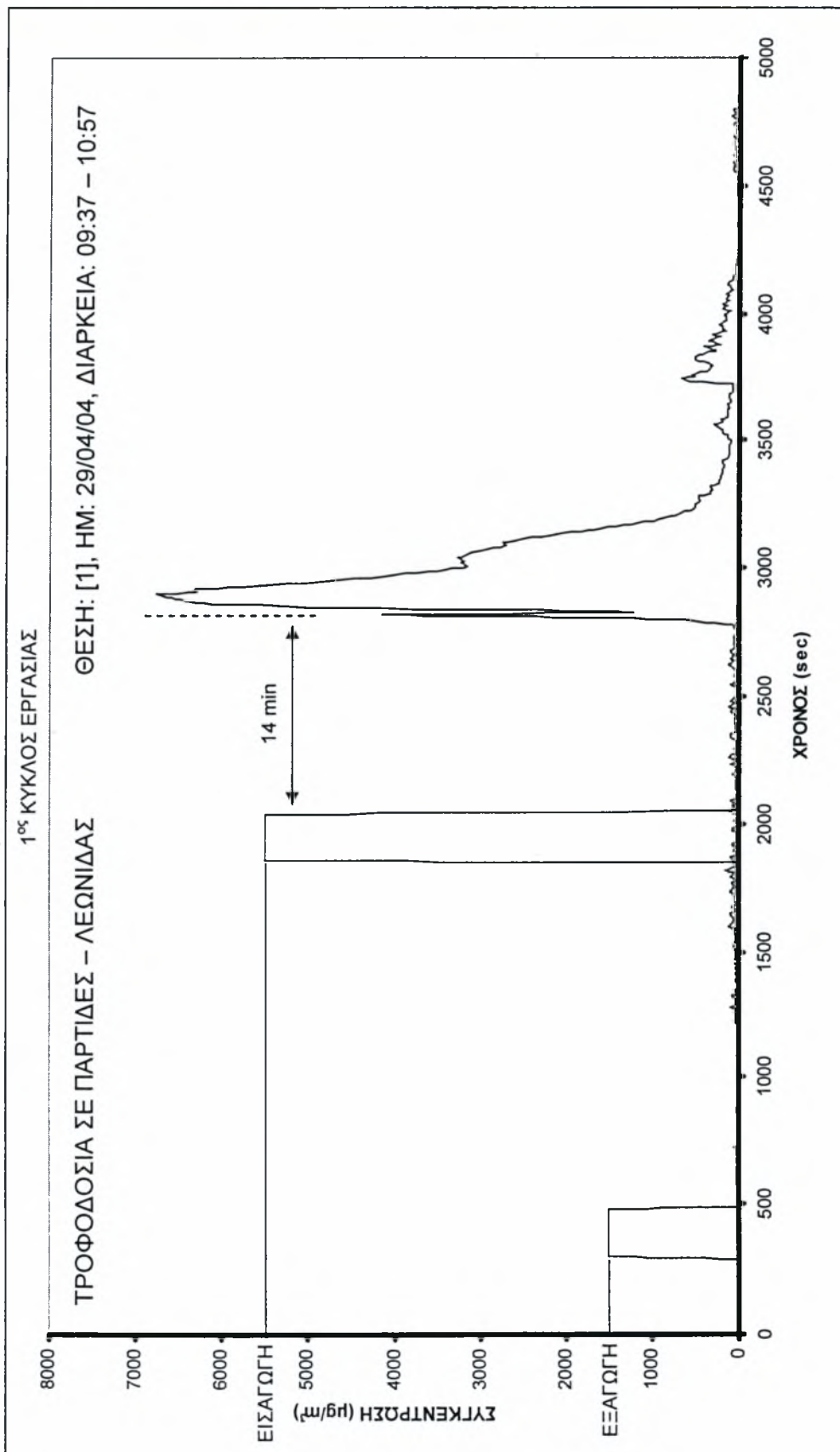
Σχήμα 5.56 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



Σχήμα 5.57 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα

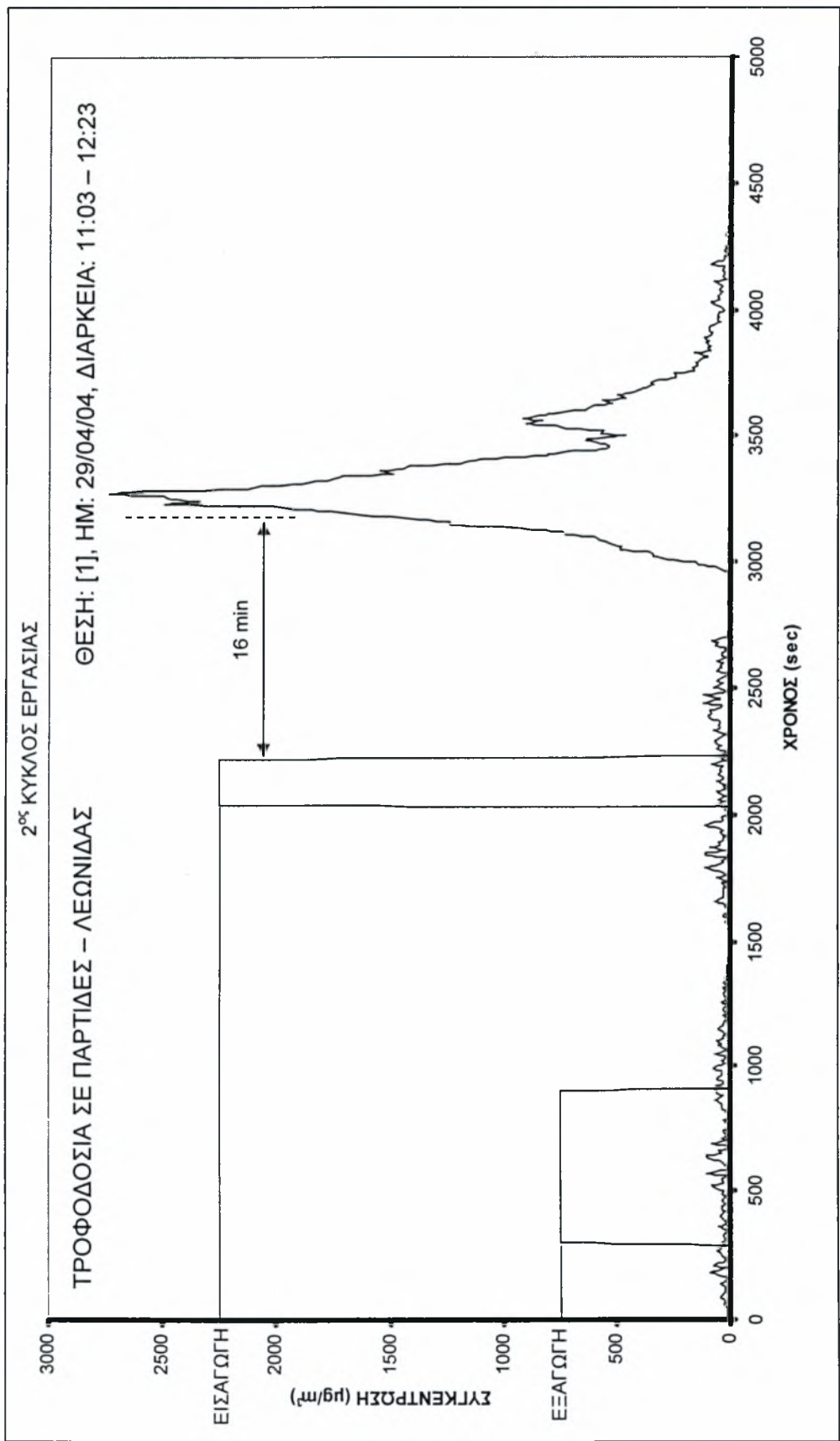


Σχήμα 5.58 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα

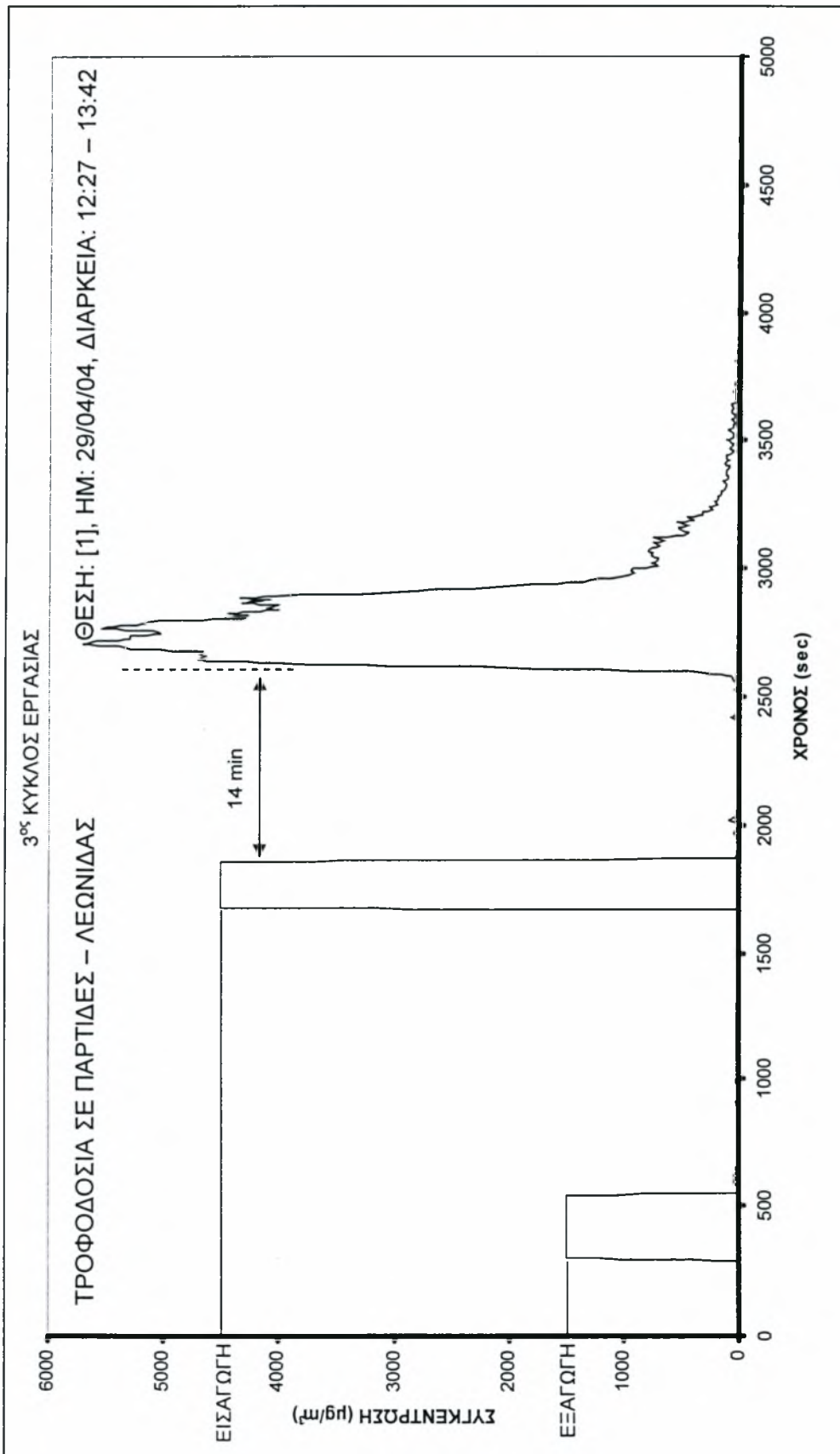




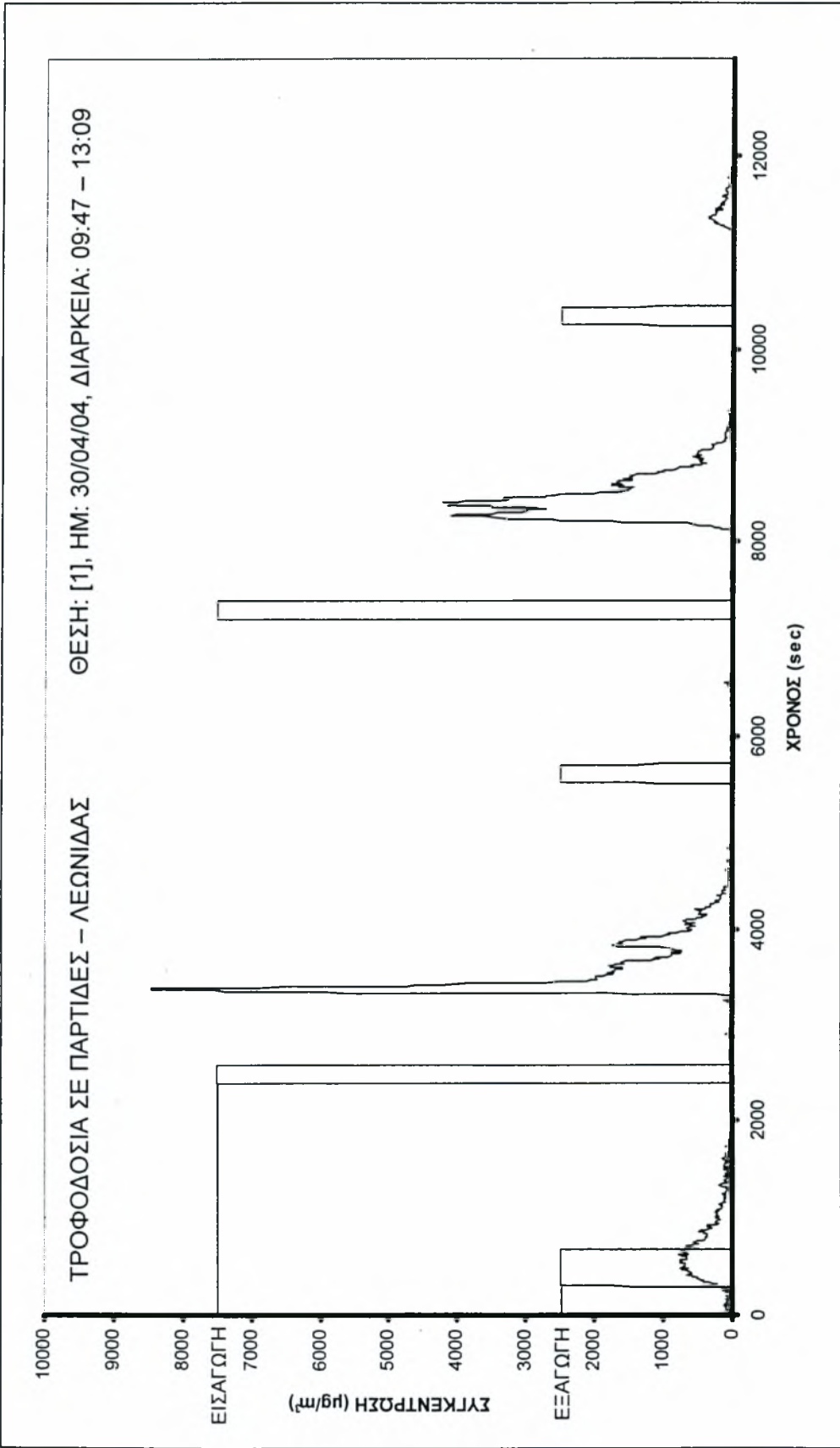
Σχήμα 5.59 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



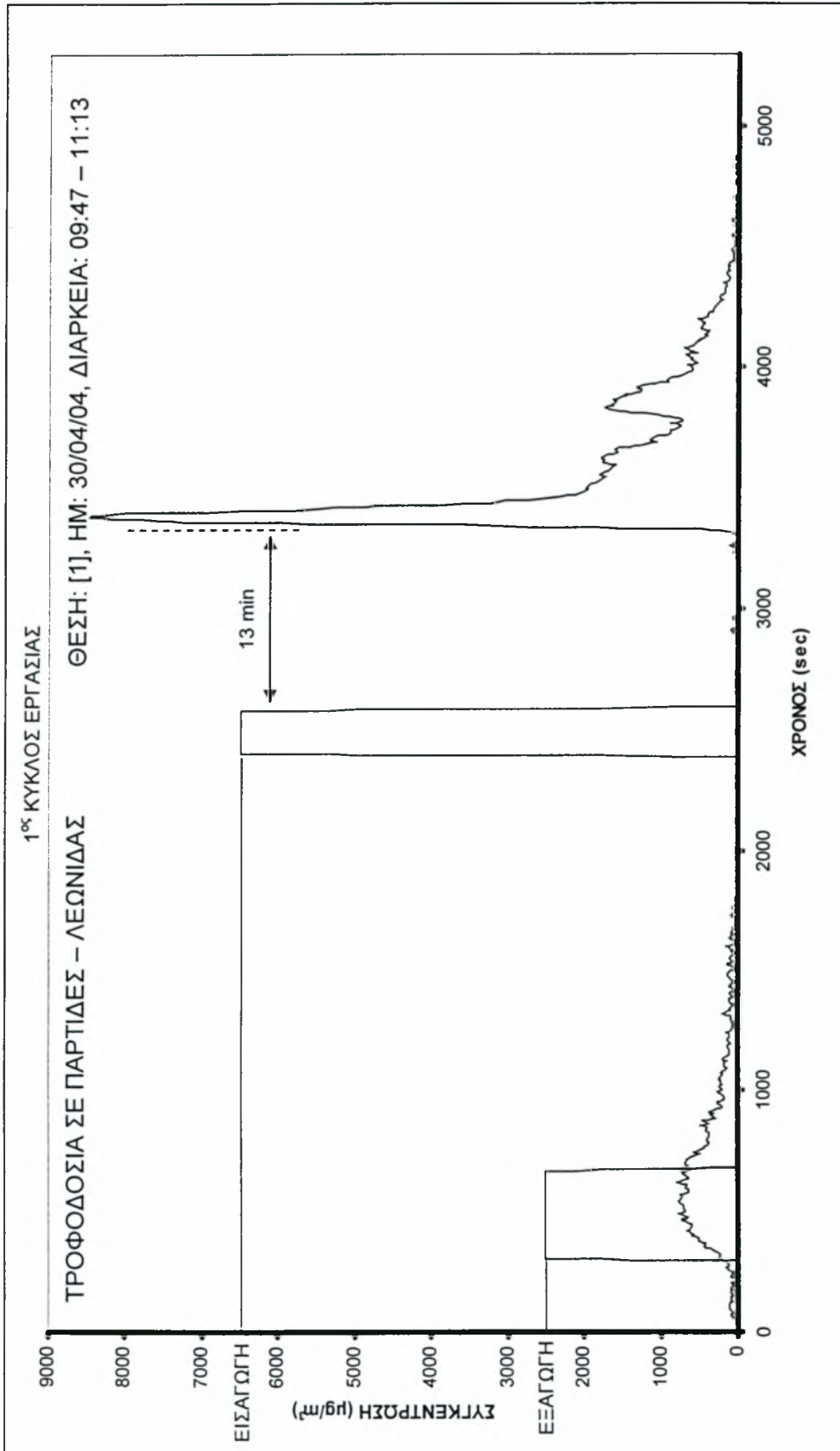
Σχήμα 5.60 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



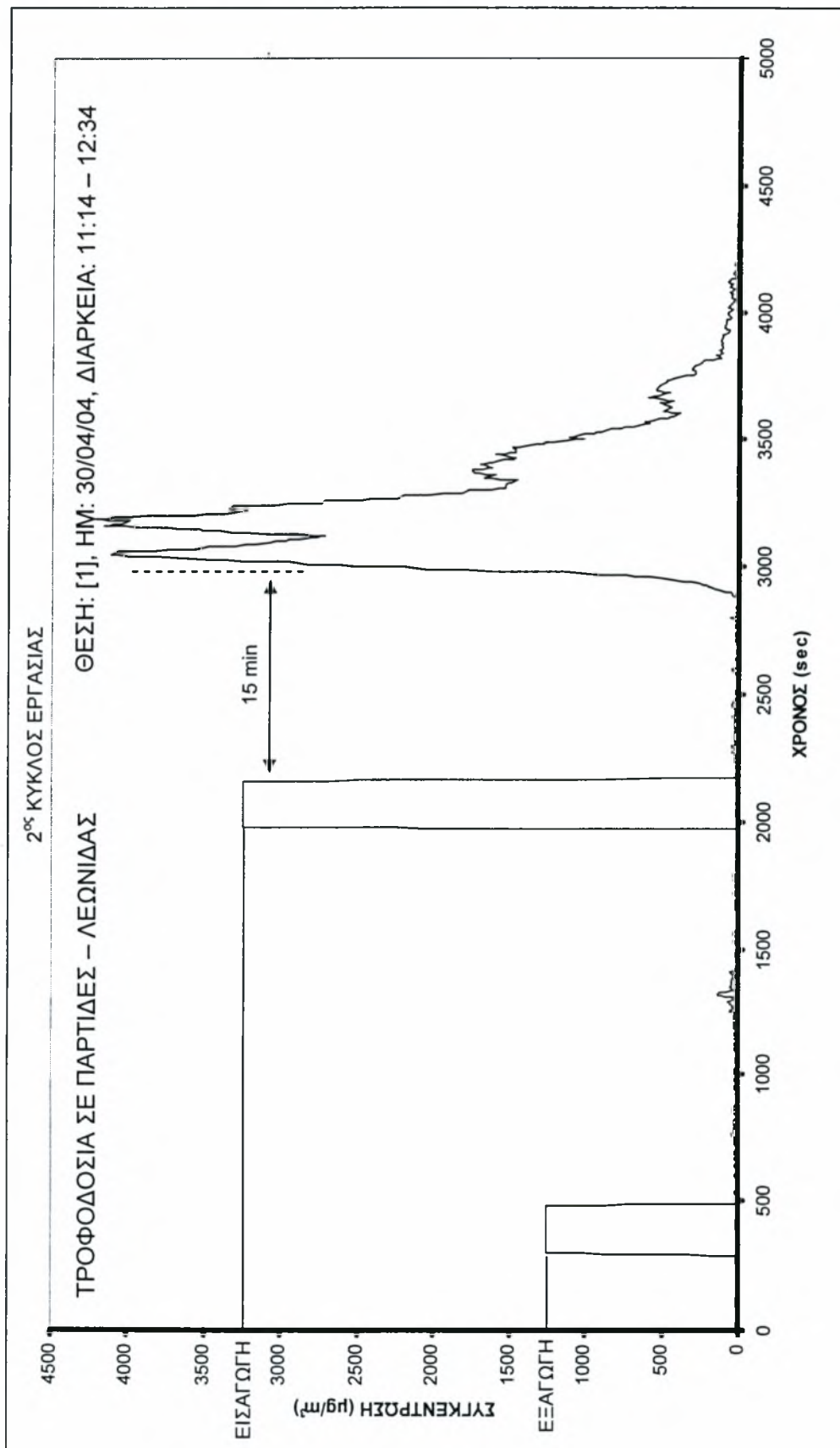
Σχήμα 5.61 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



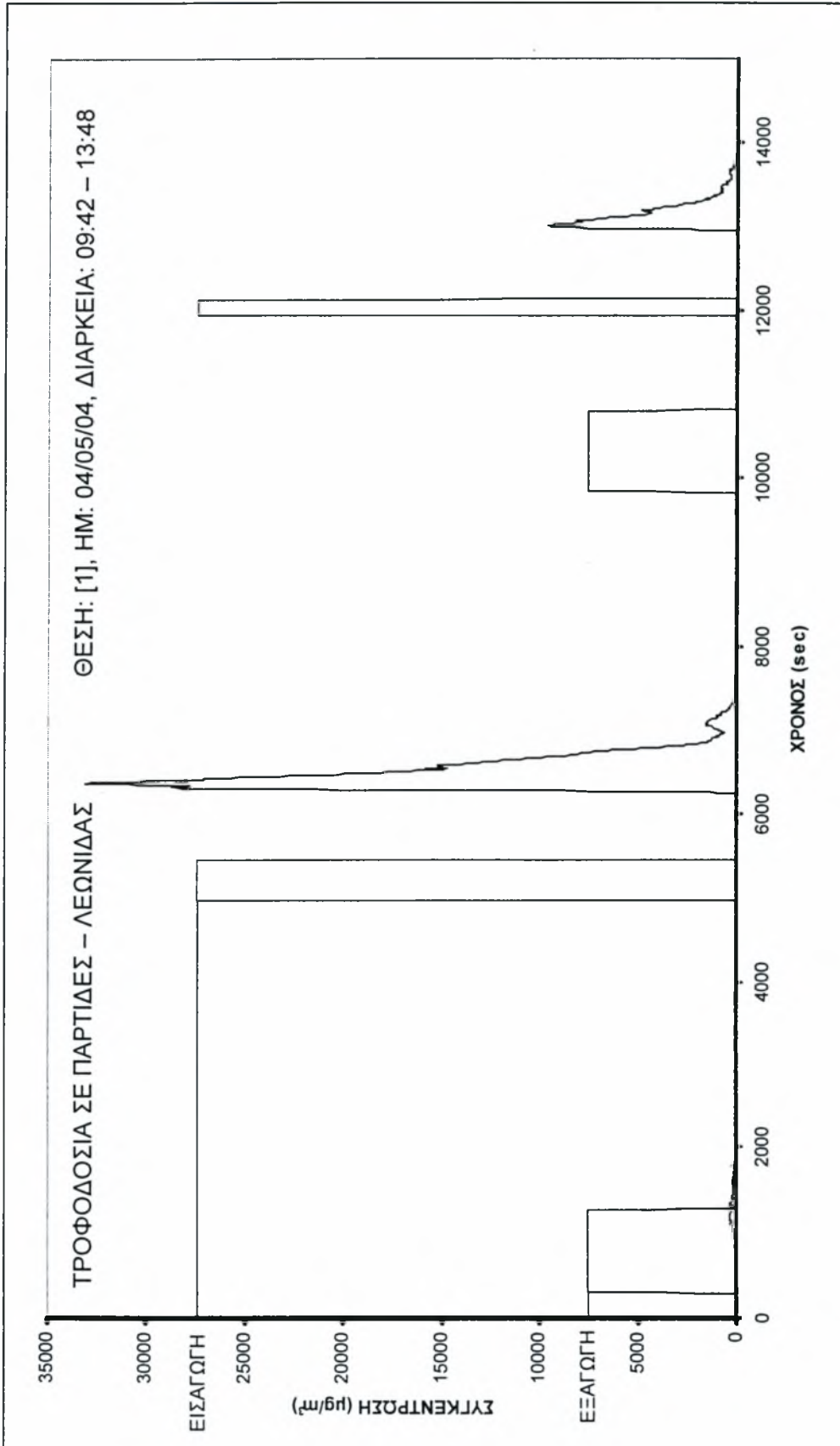
Σχήμα 5.62 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



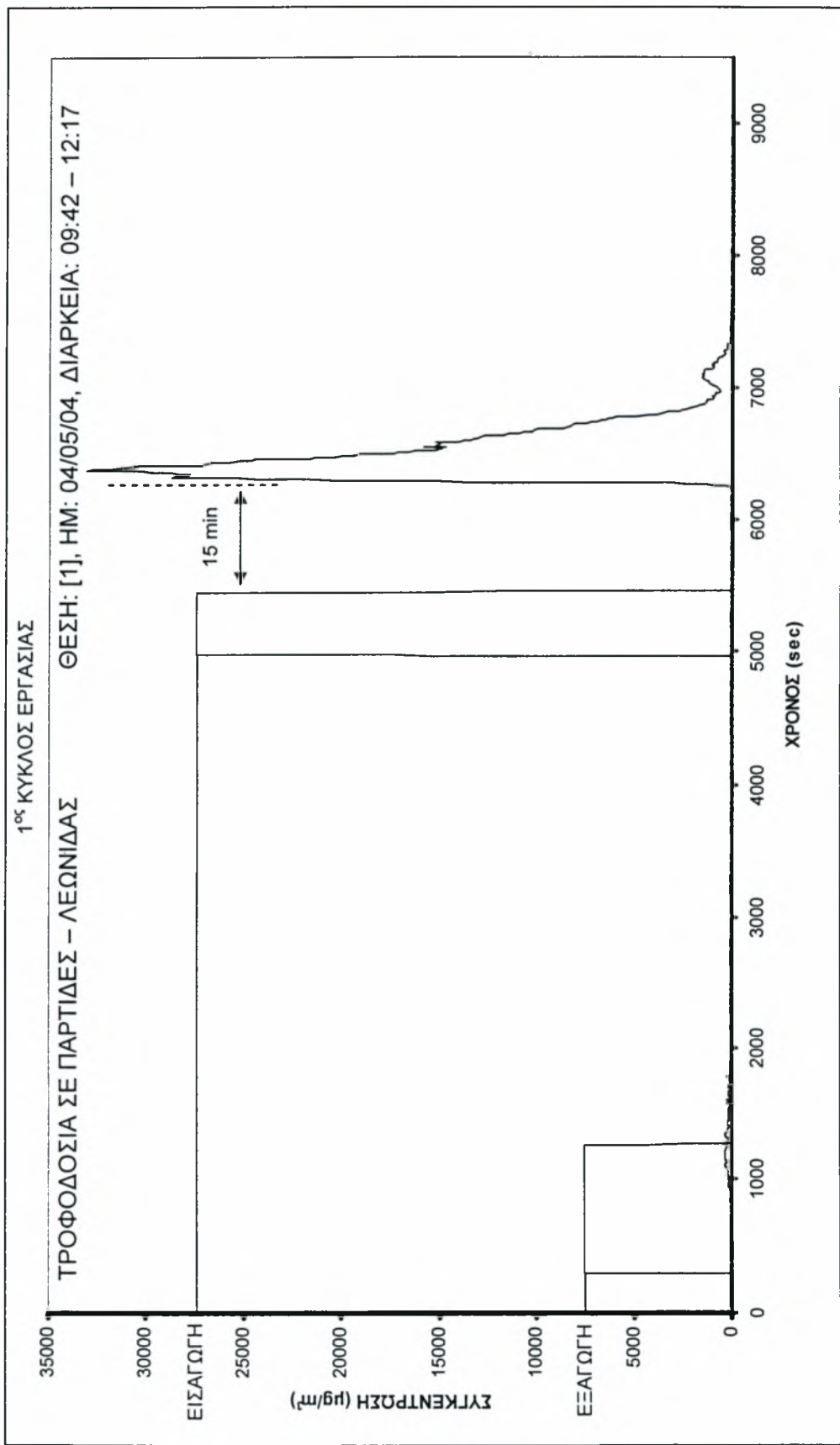
Σχήμα 5.63 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



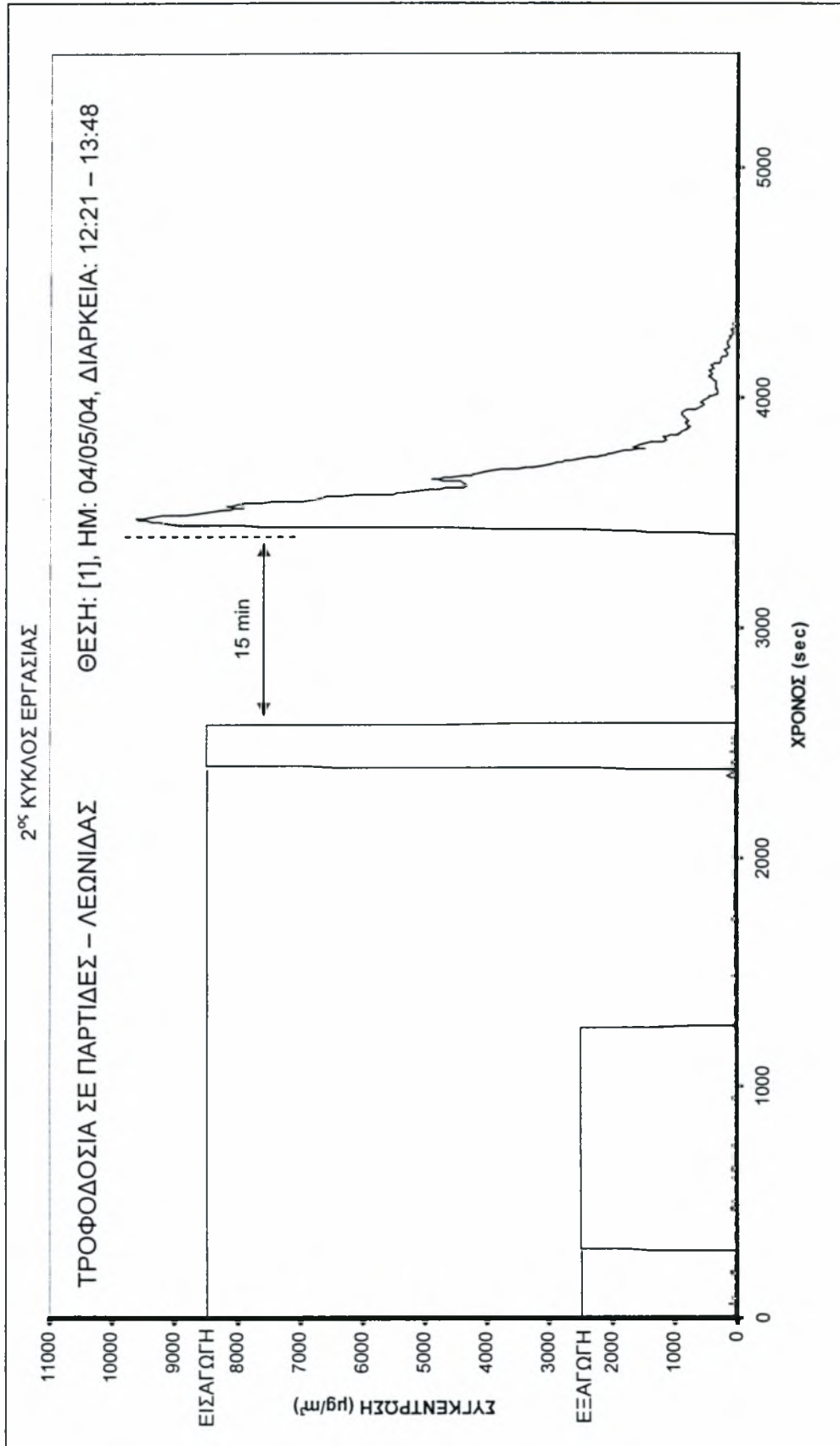
Σχήμα 5.64 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδας



Σχήμα 5.65 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδα



Σχήμα 5.66 – Θέση [1], Τροφοδοσία σε παρτίδες – Λεωνίδας



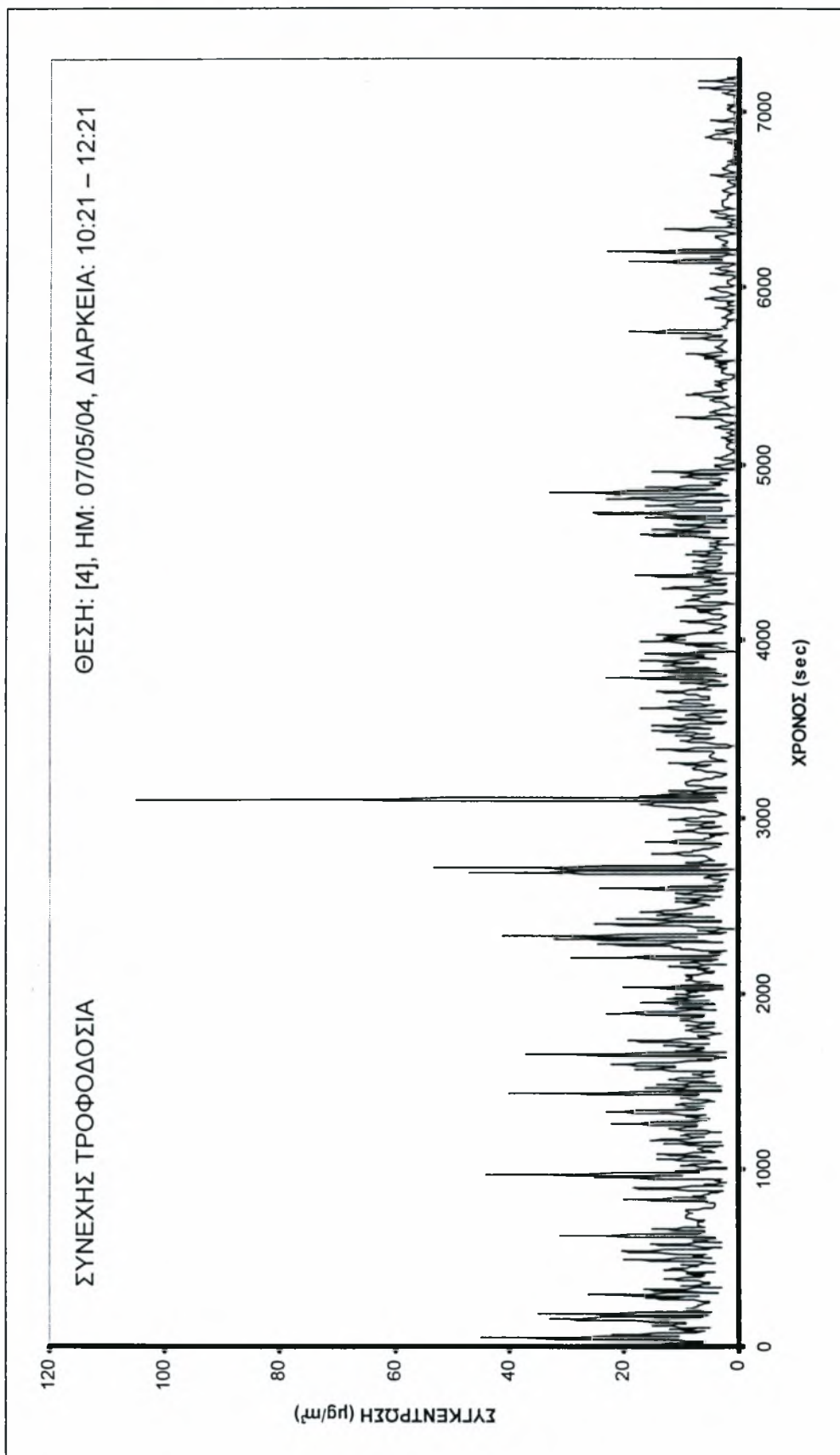


### 5.3.2 Αποτελέσματα στο χώρο εργασίας

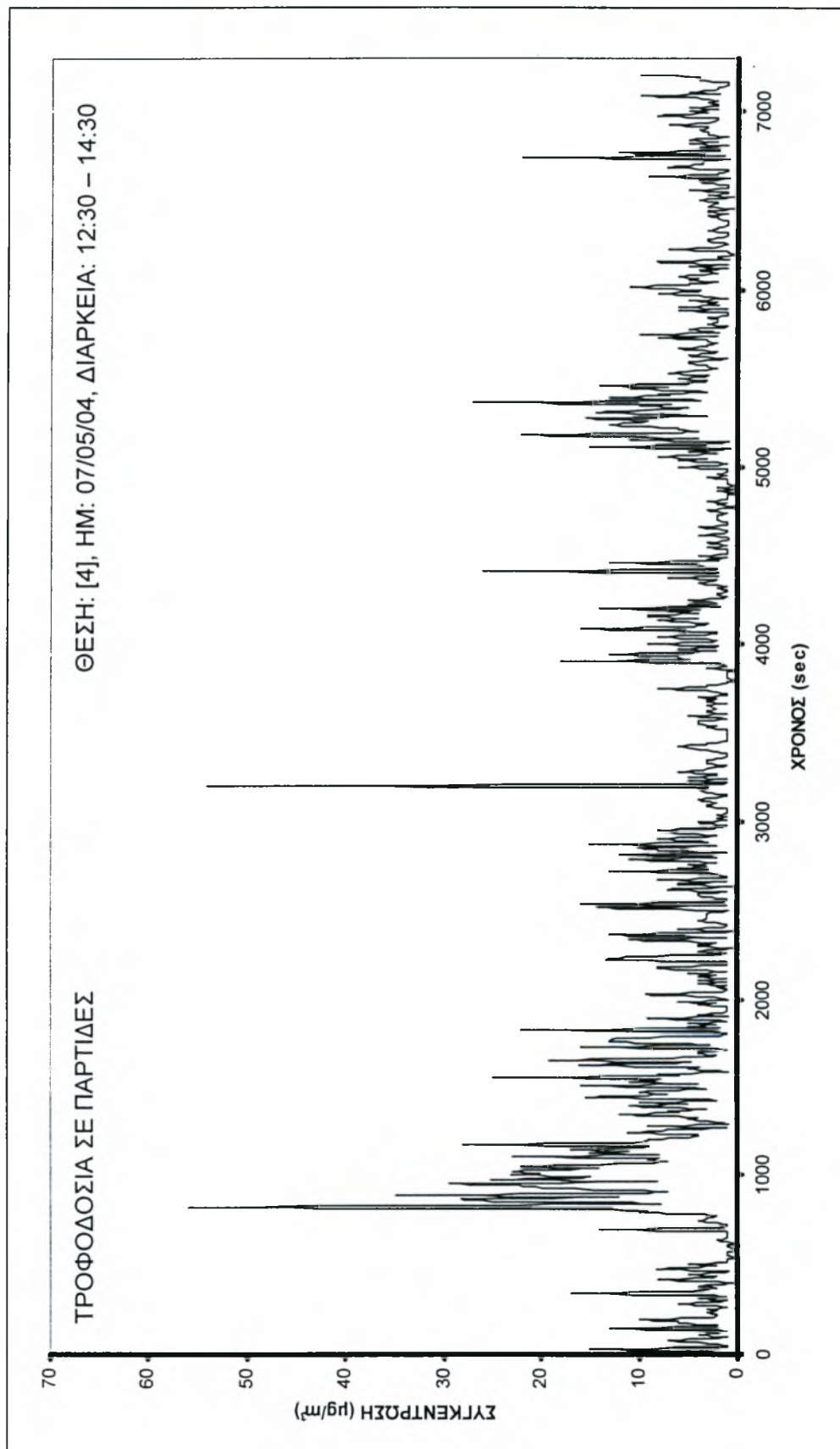
Στις σελίδες που ακολουθούν απεικονίζονται γραφικά, σε συνάρτηση με το χρόνο, τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στο χώρο εργασίας, που πραγματοποιήθηκαν με στόχο τον καθορισμό των συνθηκών εργασίας και την εκτίμηση πιθανών κινδύνων της υγείας των εργαζομένων στην εγκατάσταση. Εξαιτίας της πλήρως αυτοματοποιημένης λειτουργίας της εγκατάστασης, η κύρια εργασία του προσωπικού περιορίζεται στην τοποθέτηση των μεταλλικών εξαρτημάτων στα μεταλλικά καλάθια και στη διαλογή τους μετά το πέρας της διεργασίας και πραγματοποιείται σε μια περιορισμένη περιοχή του συνολικού χώρου της εγκατάστασης. Στο Σχήμα 4.8 σημειώνεται ο χώρος εργασίας με την επιγραφή “Load – Upload” και αντιστοιχεί στο σημείο που τοποθετήθηκε το όργανο μέτρησης. Εξαιτίας της ύπαρξης ενός μόνο οργάνου μέτρησης δεν κατέστη δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στην πηγή ρύπανσης και στο χώρο εργασίας και η συσχέτιση των αποτελεσμάτων. Για την καλύτερη κατανόηση των γραφικών παραστάσεων πρέπει να αναφέρουμε τα εξής:

- Η δειγματοληψία γίνεται κάθε 1 sec, ενώ η σταθερά χρόνου είναι 10 sec.
- Η χρονική διάρκεια των μετρήσεων είναι δύο ώρες (7200 sec).
- Στο γράφημα σημειώνεται επιπλέον το σύστημα τροφοδοσίας της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο χώρο εργασίας.

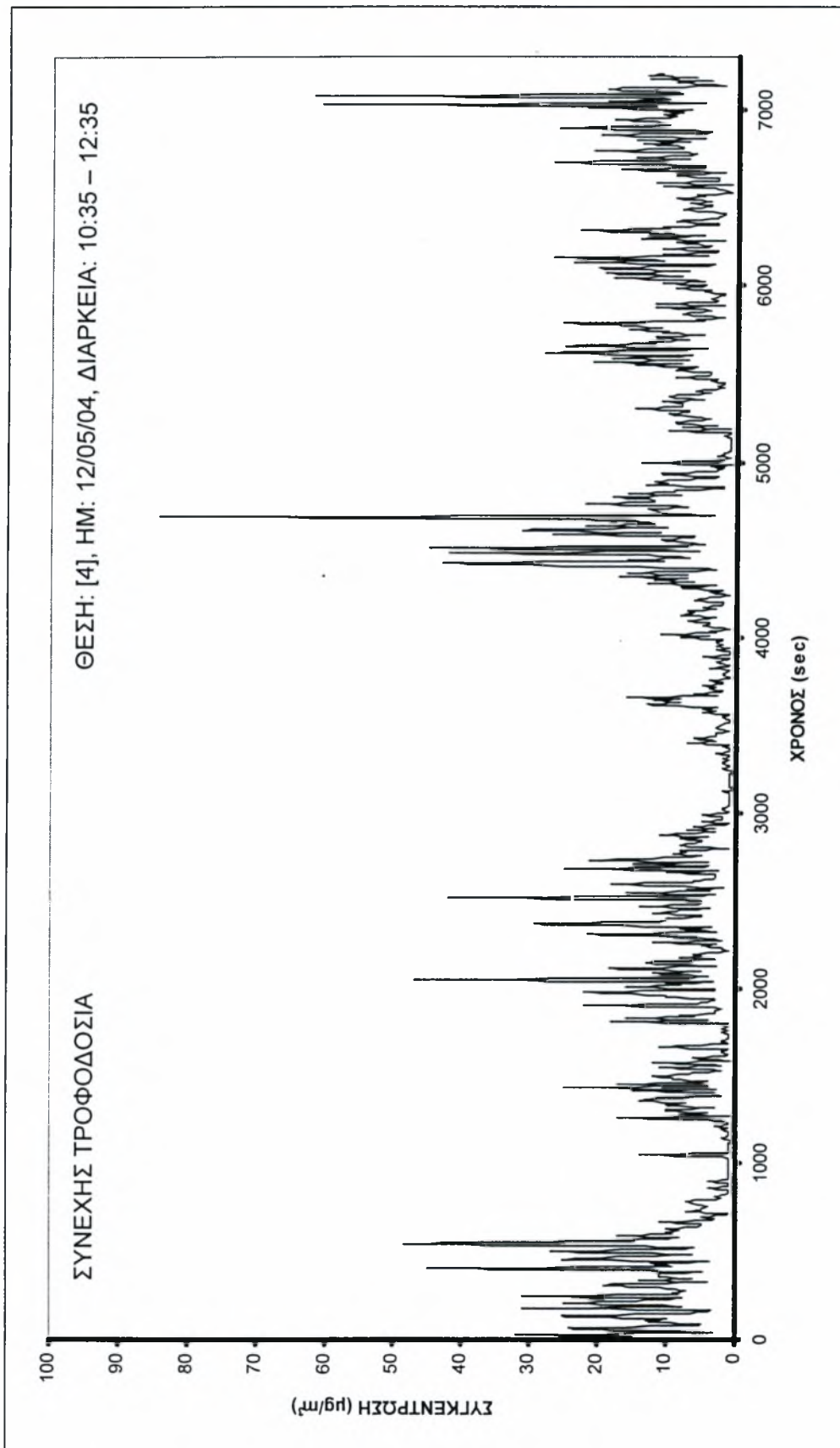
Σχήμα 5.67 – Θέση [4], Συνεχής τροφοδοσία



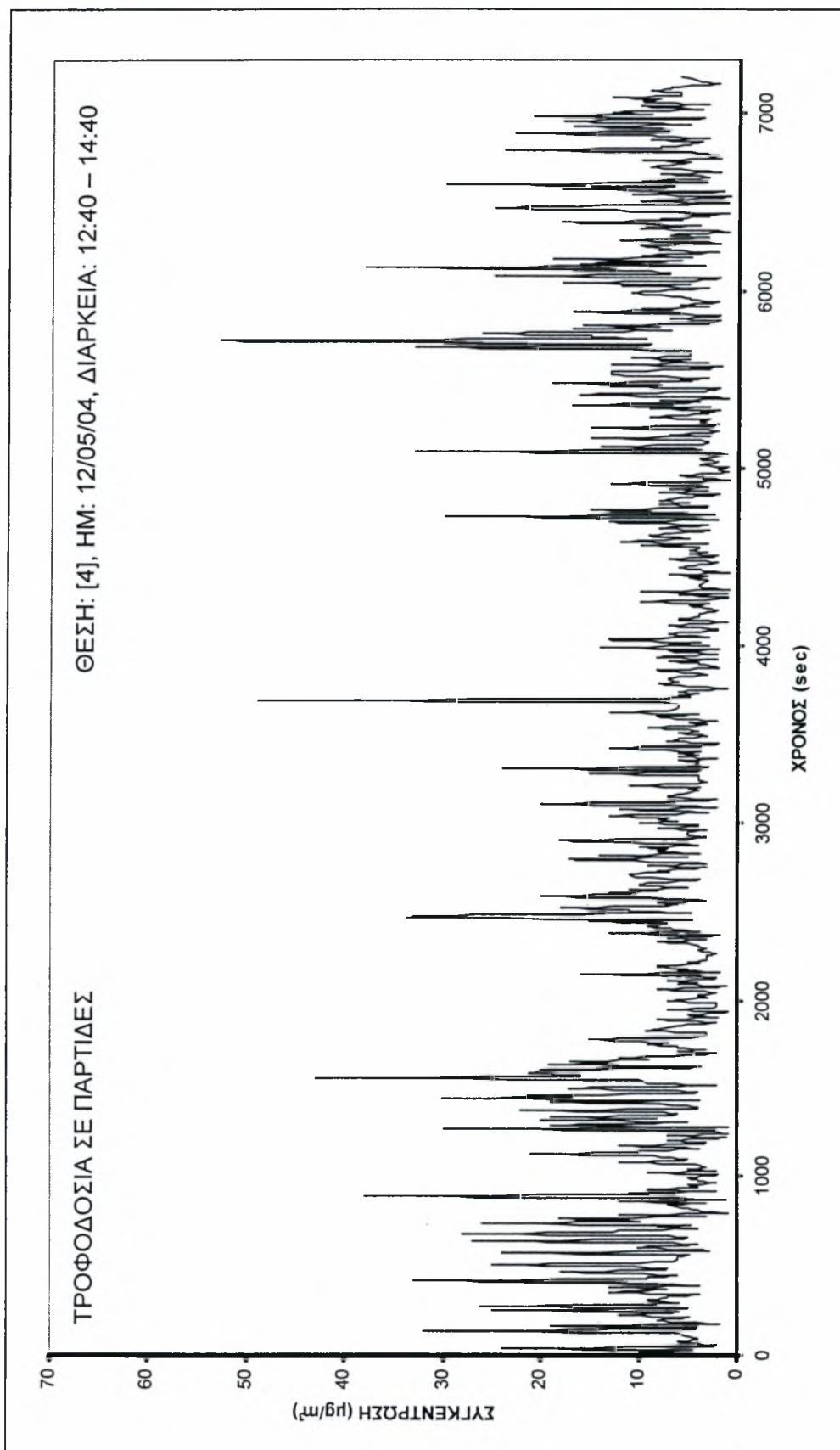
Σχήμα 5.68 – Θέση [4], Τροφοδοσία σε παρτίδες



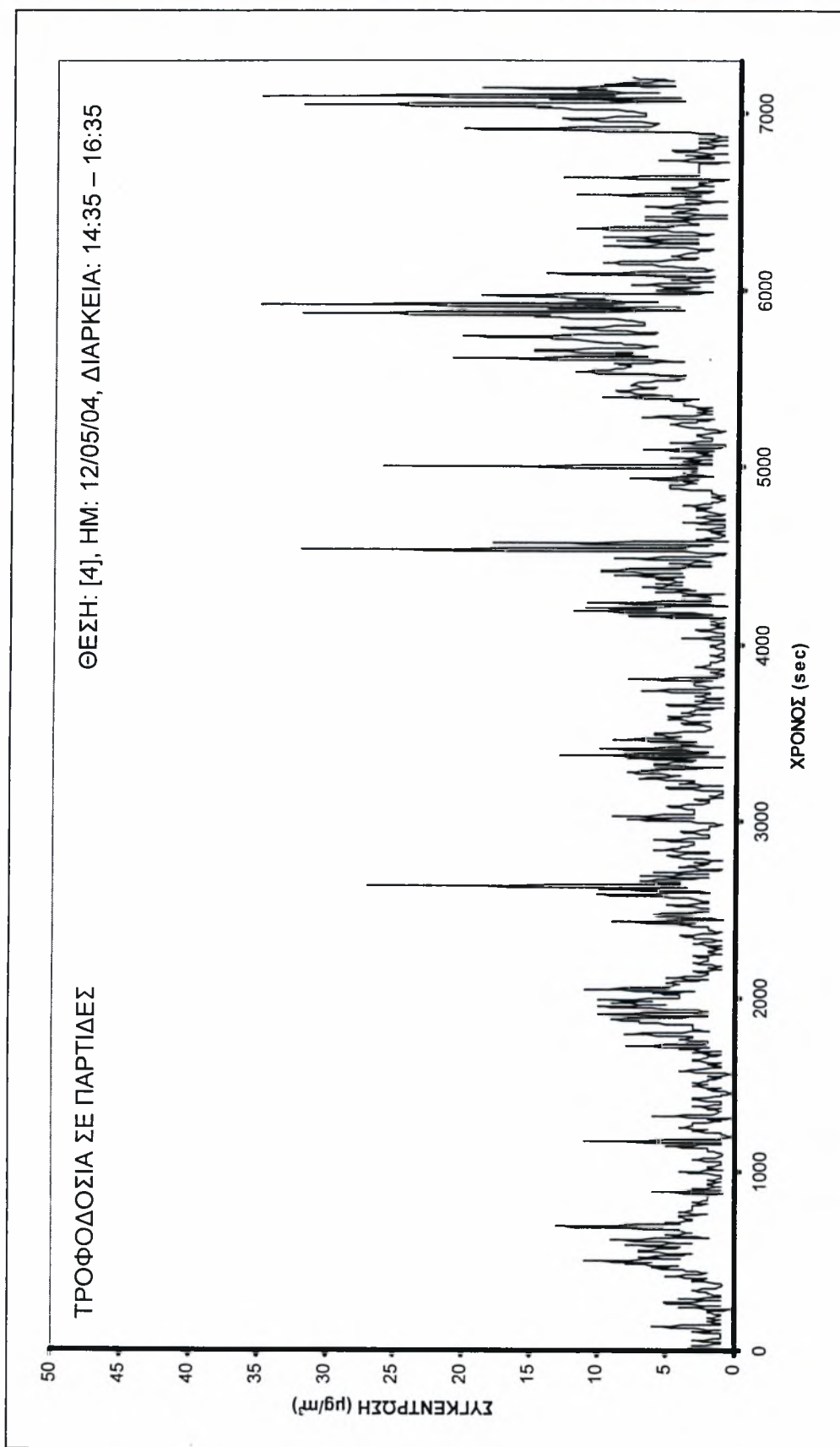
Σχήμα 5.69 – Θέση [4], Συνεχής τροφοδοσία



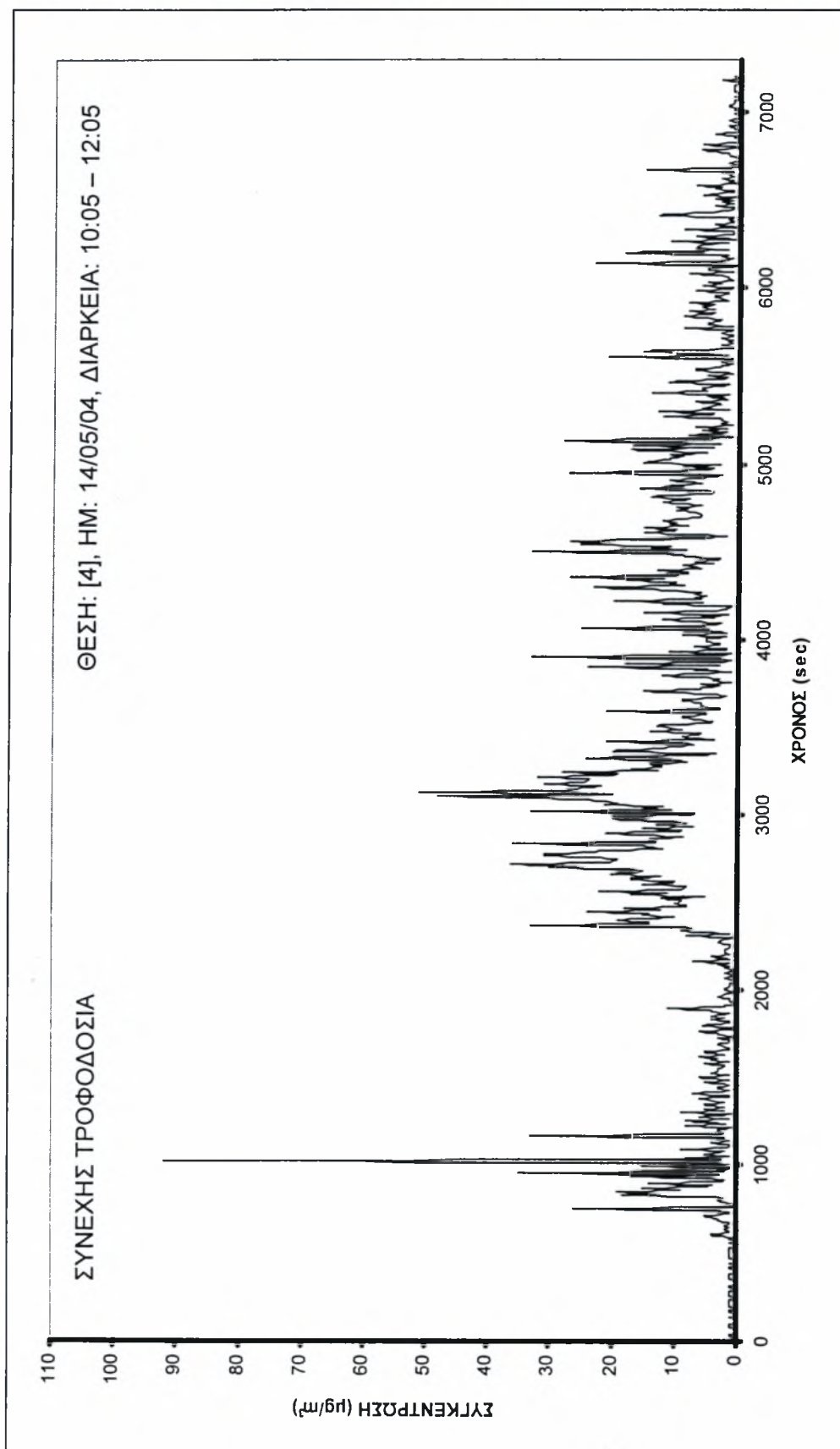
Σχήμα 5.70 – Θέση [4], Τροφοδοσία σε παρτίδες



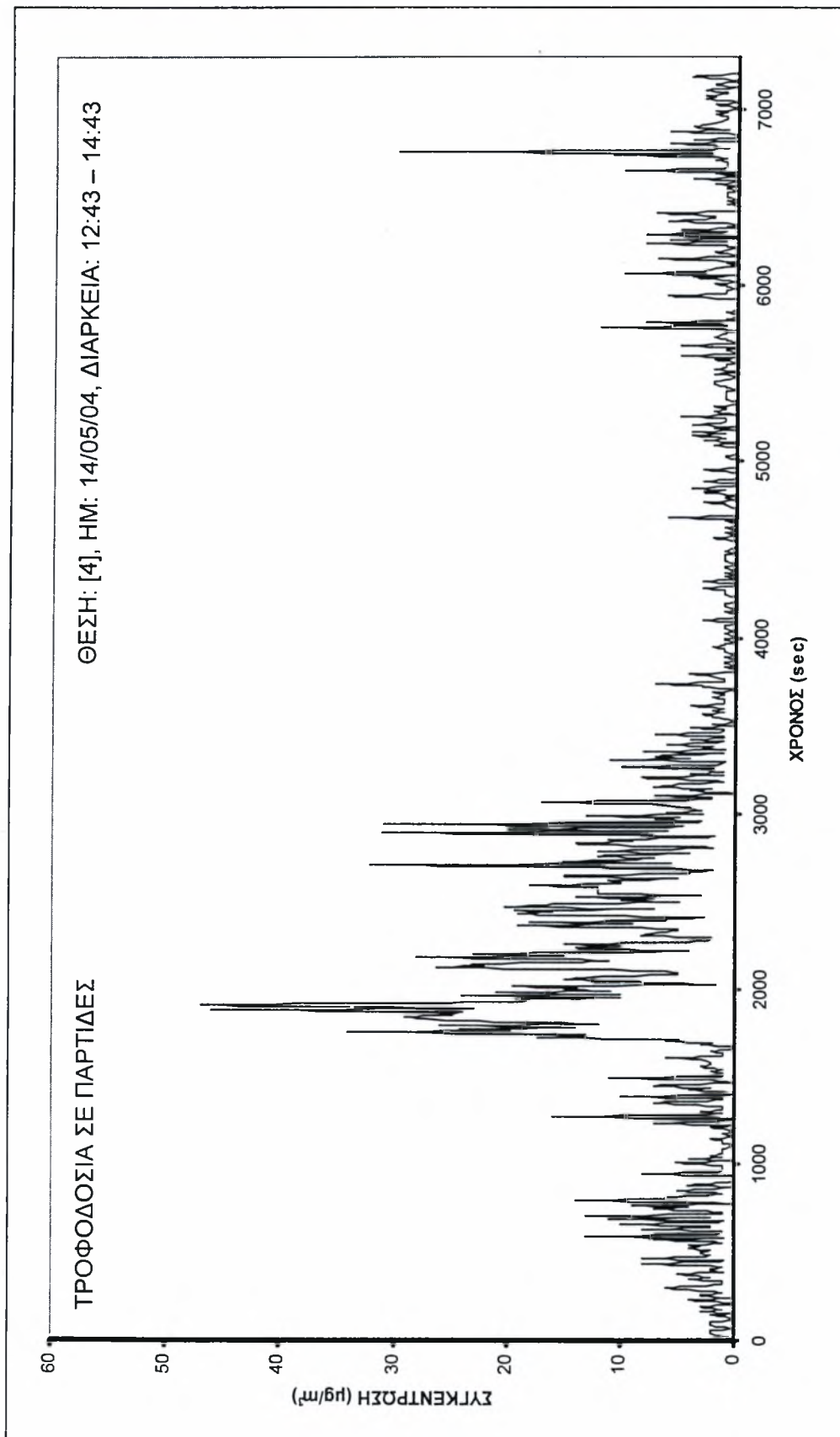
Σχήμα 5.71 – Θέση [4], Τροφοδοσία σε παρτίδες



Σχήμα 5.72 – Θέση [4], Συνεχής τροφοδοσία



Σχήμα 5.73 – Θέση [4], Τροφοδοσία σε παρτίδες

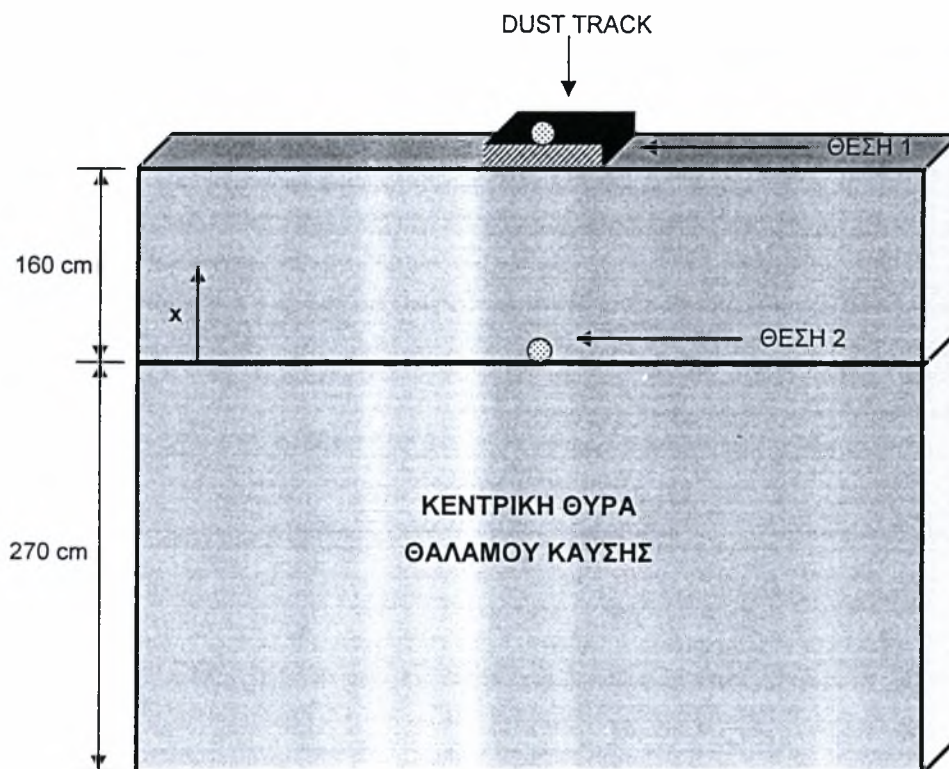




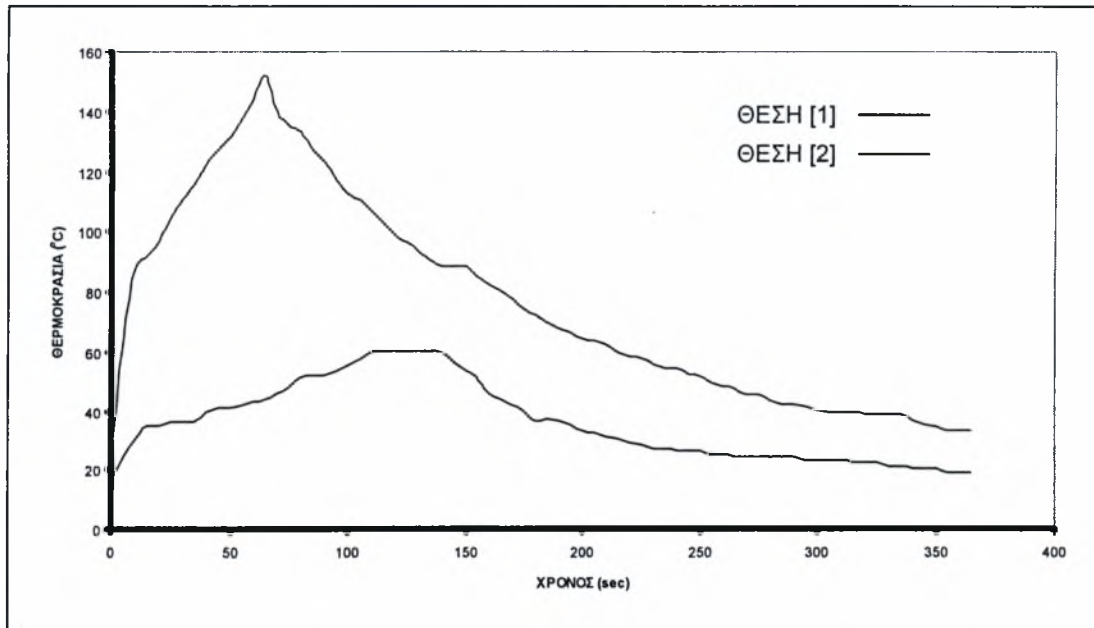
## 5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας του αέρα που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μπροστά από το θάλαμο καύσης. Στο Σχήμα 5.74 απεικονίζεται σχηματικά η περιοχή των μετρήσεων.

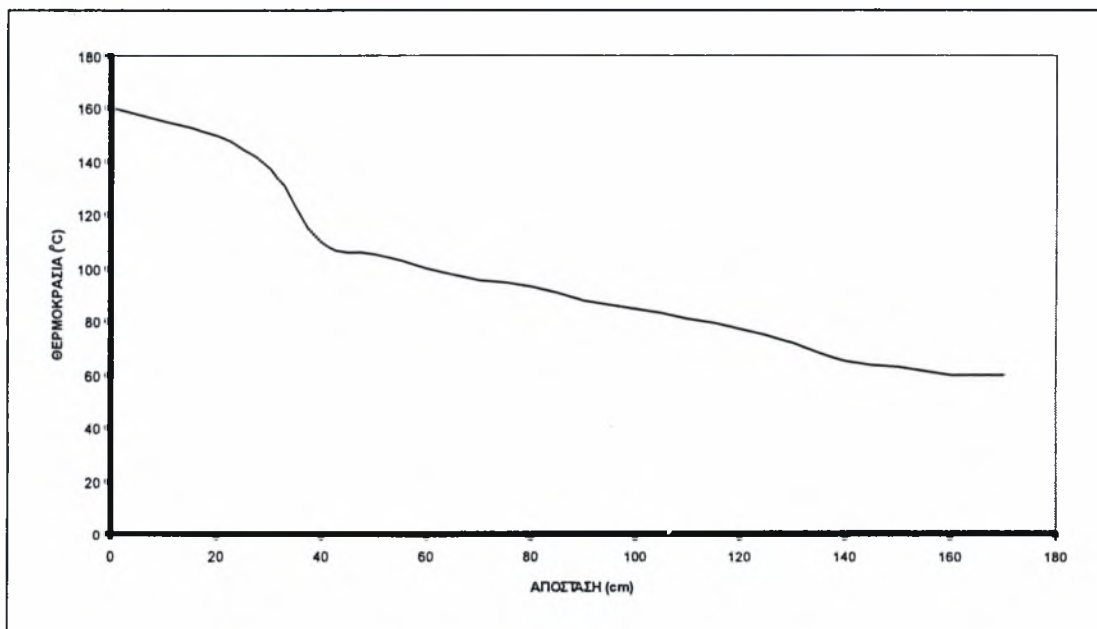
Στο πρώτο διάγραμμα παριστάνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο για τις θέσεις [1] και [2] που σημειώνονται στο Σχήμα 5.74. Η θέση [1] αντιστοιχεί στο ανώτερο σημείο της κεντρικής θύρας του θαλάμου καύσης, ενώ η θέση [2] βρίσκεται στο σημείο τοποθέτησης του οργάνου DustTrak κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης κατά την τροφοδοσία σε παρτίδες. Η χρονική στιγμή  $t=0$  αντιστοιχεί στο άνοιγμα της κεντρικής θύρας του θαλάμου καύσης, η οποία παραμένει ανοιχτή για 180 sec. Στο δεύτερο διάγραμμα παριστάνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση, όταν η κεντρική θύρα του θαλάμου καύσης είναι ανοιχτή. Το σημείο  $x=0$  αντιστοιχεί στη θέση [2] του Σχήματος 5.66.



Σχήμα 5.74 – Περιοχή μετρήσεων θερμοκρασίας



Σχήμα 5.75 – Μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο



Σχήμα 5.76 – Μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης και σχολιασμού των αποτελεσμάτων που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5 με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για τον προσδιορισμό της πηγής ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης και τον καθορισμό των συνθηκών εργασίας του προσωπικού. Η μελέτη των μετρήσεων επιβεβαίωσε τις οπτικές παρατηρήσεις του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης και τα σχόλια των εργαζομένων και κατέδειξε ως κύρια πηγή ρύπανσης την διεργασία εισαγωγής των καλαθιών, με τα υπό επεξεργασία μεταλλικά εξαρτήματα, στο θάλαμο καύσης κατά την τροφοδοσία σε παρτίδες. Οι αυξημένες εκπομπές σωματιδίων κατά τη διάρκεια της προαναφερθείσας διεργασίας προκαλούν υψηλή συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης στην περιοχή πάνω από το θάλαμο καύσης, αλλά δεν επηρεάζουν τη συγκέντρωση της σωματιδιακής ύλης στο κύριο χώρο εργασίας. Το κύριο συστατικό στοιχείο της σωματιδιακής ύλης, όπως προκύπτει από την χημική ανάλυση, είναι ο άνθρακας ενώ το μέγεθος των σωματιδίων κυμαίνεται στην περιοχή ορισμού των  $PM_{10}$ .

## 6.2 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης, όπου πραγματοποιήθηκε το κύριο μέρος των πειραματικών μετρήσεων, υπήρχαν εμφανή στοιχεία της ύπαρξης σημαντικών ποσοτήτων σωματιδιακής ύλης με φυσικές ιδιότητες παραπλήσιες του κάρβουνου σε λεπτό διαμερισμό (μαύρο χρώμα, έντονη βαφή σε κάθε επιφάνεια που εναποτίθεται). Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης των σωματιδίων με τη χρήση του DustTrak Aerosol Monitor – Model 8520 περιορίζονται σε σωματίδια μεγέθους από 0,1 μm έως 10 μm. Η ανάλυση δείγματος της σωματιδιακής ύλης με τη μέθοδο Scanning Electron Microscopy (SEM) απέδειξε την ύπαρξη σωματιδίων με μέγεθος που κυμαίνεται στην περιοχή ορισμού των PM<sub>10</sub>. Οι φωτογραφίες που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5 εστιάζουν οπτικά σε τάξεις μεγέθους από 2 μm έως 100 μm και σε όλες διακρίνονται σε μεγάλο ποσοστό σωματίδια με μέγεθος μεταξύ 0,1 μm και 10 μm. Στις οπτικές αναλύσεις εμφανίζονται σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 10 μm. Όμως, ο αριθμός τους είναι περιορισμένος, ενώ επιπλέον είναι δυνατόν να έχουν προκύψει από συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων κατά την συλλογή ή μεταφορά του δείγματος. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι οι μετρήσεις της συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> με τη χρήση του συγκεκριμένου οργάνου αποτυπώνουν την πραγματική εικόνα της σωματιδιακής ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3, η ελληνική εργατική νομοθεσία, που στηρίζεται αποκλειστικά στα ευρωπαϊκά και αμερικανικά πρότυπα, δεν περιλαμβάνει οριακή τιμή έκθεσης σε σωματιδιακή ύλη. Αντ' αυτού, περιλαμβάνει οριακές τιμές έκθεσης σε σκόνη συγκεκριμένων στοιχείων. Με τη μέθοδο Energy Dispersive x-ray Spectroscopy (EDS) προκύπτει η ποιοτική ανάλυση του δείγματος της σωματιδιακής ύλης. Το κύριο στοιχείο είναι ο άνθρακας, ενώ επιπλέον περιέχονται σε μικρότερα ποσοστά Si, Al, Fe, Cu, Mg, O, Ca, K και Au. Η μέθοδος απαιτεί επιχρύσωση της επιφάνειας των σωματιδίων γι' αυτό εμφανίζεται ο χρυσός στα αντίστοιχα διαγράμματα. Η οριακή τιμή έκθεσης σε σκόνη άνθρακα, σύμφωνα με την εργατική νομοθεσία, είναι 2000 μg/m<sup>3</sup> – 50 φορές μεγαλύτερη από την οριακή τιμή της συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> στην ατμόσφαιρα. Η άμμος που περιέχεται στο θάλαμο καύσης της ρευστομηχανικής κλίνης και η υδράσβεστος που χρησιμοποιείται στο σύστημα ελέγχου των καυσαερίων δικαιολογεί την παρουσία Si και Ca στο υπό ανάλυση δείγμα. Η παρουσία των μεταλλικών στοιχείων πιθανότατα οφείλεται σε θραύσματα των μεταλλικών εξαρτημάτων.

## 6.3 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ

Από την ανάλυση των γραφικών παραστάσεων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης σε συνάρτηση με το χρόνο για τις διαφορετικές θέσεις μέτρησης μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής στοιχεία:

- Η συγκέντρωση των σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο της εγκατάστασης κυμαίνεται από  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  έως  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και είναι μικρότερη από την οριακή τιμή των  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση (Σχήμα 5.17 – 5.19).
- Η συγκέντρωση των σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης την περίοδο των εργασιών συντήρησης, κατά την οποία η εγκατάσταση δεν λειτουργούσε, κυμαίνεται από  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  έως  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , με στιγμιαίες συγκεντρώσεις που φθάνουν έως τα  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Σχήμα 5.20 – 5.21).
- Η συγκέντρωση των σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης κατά την νυχτερινή παύση λειτουργίας κυμαίνεται από  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  έως  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , αλλά εμφανίζει σημαντικά υψηλότερες στιγμιαίες τιμές που φθάνουν έως τα  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Σχήμα 5.22 – 5.23).

### 6.3.1 Εσωτερικός χώρος της εγκατάστασης

Οι ενδεικτικές μετρήσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης επιβεβαίωσε τις οπτικές παρατηρήσεις (Σχήμα 5.24). Συγκεκριμένα:

- Η συγκέντρωση στο χώρο εργασίας και στην περιοχή που είναι τοποθετημένες οι εγκαταστάσεις αμμοβολής κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές τιμές που δεν ξεπερνούν τα  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Η συγκέντρωση των σωματιδίων στην περιοχή διαλογής των μεταλλικών εξαρτημάτων είναι υψηλότερη και στιγμιαία φθάνει έως τα  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ιδιαίτερα κατά την διαλογή των επεξεργασμένων εξαρτημάτων.
- Η συγκέντρωση των σωματιδίων στην περιοχή του θαλάμου καύσης κατά τη διάρκεια επεξεργασίας των εξαρτημάτων κυμαίνεται σε φυσιολογικά επίπεδα. Αντίθετα, κατά την εξαγωγή και κυρίως την εισαγωγή των μεταλλικών καλαθιών αυξάνεται σημαντικά και φθάνει έως τα  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $1600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα.

### 6.3.2 Συνεχές σύστημα τροφοδοσίας

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στο συνεχές σύστημα τροφοδοσίας πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή πάνω από το θάλαμο καύσης και

συγκεκριμένα στις θυρίδες εισαγωγής των μεταλλικών εξαρτημάτων. Το σύστημα επεξεργάζεται μόνο πύρους και διόπτρες M48. Από την ανάλυση των γραφικών παραστάσεων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης σε συνάρτηση με το χρόνο μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής στοιχεία (Σχήμα 5.25 – 5.29):

- Οι τιμές της σωματιδιακής συγκέντρωσης μεταβάλλονται έντονα με τυχαίο, μη επαναλαμβανόμενο τρόπο και κυμαίνονται από  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  έως  $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Εκτός από στιγμιαίες υψηλές συγκεντρώσεις εμφανίζονται, επιπλέον, χρονικά διαστήματα με υψηλές τιμές συγκέντρωσης που κυμαίνονται από  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  έως  $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Στο μεγαλύτερο ποσοστό των μετρήσεων οι τιμές της συγκέντρωσης περιορίζονται κάτω από τα  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 6.3.3 Σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στο σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή πάνω από το θάλαμο καύσης και συγκεκριμένα στην κεντρική θύρα εισαγωγής των μεταλλικών εξαρτημάτων. Το σύστημα επεξεργάζεται πύρους και διόπτρες M48, M60, Λεωνίδας και πέλματα M113 Γ.Τ (Γερμανικού Τύπου). Από την ανάλυση των γραφικών παραστάσεων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης σε συνάρτηση με το χρόνο μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής στοιχεία (Σχήμα 5.30 – 5.66):

- Ανεξάρτητα από τον τύπο του υπό επεξεργασία μεταλλικού εξαρτήματος, οι τιμές της σωματιδιακής συγκέντρωσης:
  - ✦ Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα και δεν ξεπερνούν τα  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
  - ✦ Κατά την διαδικασία εξαγωγής των μεταλλικών καλαθιών, σε ορισμένες περιπτώσεις, αυξάνονται σημαντικά.
  - ✦ Κατά την διαδικασία εισαγωγής των μεταλλικών καλαθιών, μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος που κυμαίνεται από 10 min έως 16 min, αυξάνονται σε υπερβολικό βαθμό.
- Στην επεξεργασία των εξαρτημάτων M48 εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις κατά την διάρκεια εξαγωγής του μεταλλικού καλαθιού και μετά την πάροδο 15 min από την διαδικασία εισαγωγής (Σχήμα 5.30).
- Στην επεξεργασία των εξαρτημάτων M60 εμφανίζονται (Σχήμα 5.31 – 5.40):
  - ✦ Κατά την διάρκεια εξαγωγής του μεταλλικού καλαθιού, σε ορισμένες περιπτώσεις, υψηλές συγκεντρώσεις που φθάνουν τα  $1250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

- ✦ Κατά την διαδικασία εισαγωγής των μεταλλικών καλαθιών, μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος περίπου 15 min, υπερβολικά αυξημένες συγκεντρώσεις που σε ορισμένες περιπτώσεις φθάνουν τα 4000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Στην επεξεργασία των εξαρτημάτων M113 Γ.Τ εμφανίζονται (Σχήμα 5.41 – 5.47):
  - ✦ Κατά την διάρκεια εξαγωγής του μεταλλικού καλαθιού φυσιολογικές τιμές συγκεντρώσεων.
  - ✦ Κατά την διαδικασία εισαγωγής των μεταλλικών καλαθιών, μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος περίπου 15 min, σχετικά αυξημένες συγκεντρώσεις.
- Στην επεξεργασία των εξαρτημάτων Λεωνίδας εμφανίζονται (Σχήμα 5.48 – 5.66):
  - ✦ Κατά την διάρκεια εξαγωγής του μεταλλικού καλαθιού τιμές συγκεντρώσεων που στις περισσότερες περιπτώσεις θεωρούνται φυσιολογικές.
  - ✦ Κατά την διαδικασία εισαγωγής των μεταλλικών καλαθιών, μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος περίπου 14 min, υπερβολικά αυξημένες συγκεντρώσεις που σε ορισμένες περιπτώσεις φθάνουν τα 9000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### 6.3.4 Χώρος εργασίας

Από την ανάλυση των γραφικών παραστάσεων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης σε συνάρτηση με το χρόνο στο χώρο εργασίας μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής στοιχεία (Σχήμα 5.67 – 5.73):

- Οι τιμές της συγκέντρωσης των σωματιδίων κυμαίνονται σε απόλυτα φυσιολογικά όρια, με ανώτερη κατά μέσο όρο τιμή τα 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Μόνο στιγμιαίες διακυμάνσεις ξεπερνούν την προαναφερθείσα τιμή.
- Οι τιμές της συγκέντρωσης των σωματιδίων μεταβάλλονται με τυχαίο, μη επαναλαμβανόμενο τρόπο, τόσο στο συνεχές όσο και στο σύστημα τροφοδοσίας σε παρτίδες.
- Δεν υπάρχει ουσιαστική συσχέτιση μεταξύ των εκπομπών σωματιδιακής ύλης κατά την εισαγωγή και εξαγωγή των μεταλλικών καλαθιών με την διακύμανση της σωματιδιακής συγκέντρωσης στο χώρο εργασίας.

## 6.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η θερμοκρασία του χώρου μπροστά από το θάλαμο καύσης αυξάνεται σημαντικά κατά το άνοιγμα της κεντρικής θύρας, φθάνει σε ελάχιστο χρόνο τους 150 °C και βαθμιαία μειώνεται καθώς η κεντρική θύρα κλείνει. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία του σημείου τοποθέτησης του οργάνου μέτρησης της σωματιδιακής συγκέντρωσης εμφανίζει παρόμοιο προφίλ, με χρονική υστέρηση εξαιτίας της απόστασης (1,7 m) από την πηγή θερμότητας. Η μέγιστη θερμοκρασία του σημείου είναι 60 °C. Η θερμοκρασιακή κατανομή στα ενδιάμεσα σημεία είναι ομαλή και κυμαίνεται μεταξύ των προαναφερθέντων τιμών (Σχήμα 5.75 – 5.76).

## 6.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 6.5.1 Πηγή ρύπανσης

Από τις μετρήσεις της σωματιδιακής συγκέντρωσης στον εξωτερικό χώρο της εγκατάστασης αποκλείστηκε το ενδεχόμενο η σωματιδιακή ρύπανση να οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες – π.χ υψηλές εκπομπές σωματιδίων από την καμινάδα που μεταφέρονται στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης διαμέσου των ανοιχτών πόρτων του κλειστού μεταλλικού στεγάστρου. Επιπλέον, από τις ενδεικτικές μετρήσεις στον εσωτερικό χώρο θεωρήθηκε ως κύρια πηγή ρύπανσης η περιοχή του θαλάμου καύσης. Συγκεκριμένα, όπως απεικονίζεται στις γραφικές παραστάσεις της θερμοκρασίας, τη στιγμή που ανοίγει η κεντρική θύρα του θαλάμου καύσης δημιουργούνται, εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς, σημαντικά ανωστικά ρεύματα τα οποία είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά σωματιδίων από το θάλαμο καύσης στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης. Η ποσότητα των μεταφερόμενων σωματιδίων εξαρτάται από την επιτελούμενη διαδικασία.

#### 6.5.1.1 Εισαγωγή – τροφοδοσία σε παρτίδες

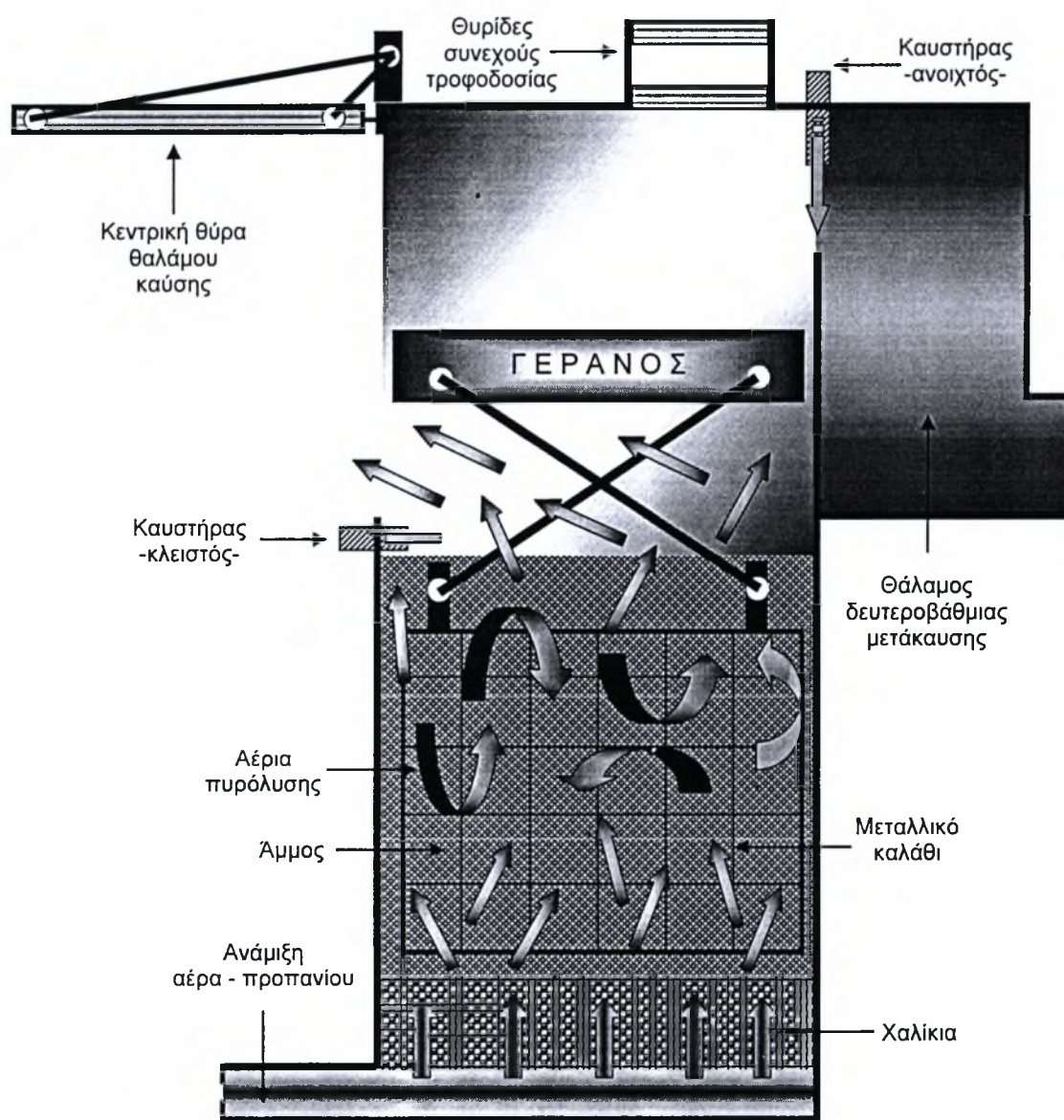
Η διαδικασία της εισαγωγής του μεταλλικού καλαθιού με τα υπό επεξεργασία εξαρτήματα στο θάλαμο καύσης αποτελεί την κύρια πηγή ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του θαλάμου καύσης, κατά την εισαγωγή του μεταλλικού καλαθιού από το γερανό στην ρευστοποιημένη άμμο είναι 450 °C με αποτέλεσμα να αρχίζει άμεσα η διεργασία πυρόλυσης των εξωτερικών στρωμάτων του ελαστικού και επομένως η παραγωγή σωματιδίων. Ενώ,



κατά την επεξεργασία των μεταλλικών εξαρτημάτων τα αέρια της πυρόλυσης καίγονται στο θάλαμο πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας μετάκαυσης, κατά την εισαγωγή του μεταλλικού καλαθίου στη ρευστοποιημένη άμμο τα αέρια της πυρόλυσης εξέρχονται του θαλάμου καύσης εξαιτίας του λανθασμένου σχεδιασμού στα εξής σημεία:

- Διαστάσεις και μορφή του γερανού.
- Η κεντρική θύρα του θαλάμου καύσης παραμένει ανοιχτή.
- Συνεχής ρευστοποίηση της άμμου.

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής του μεταλλικού καλαθίου στο θάλαμο καύσης και οι επιτελούμενες διεργασίες.



Σχήμα 6.1 – Εισαγωγή του μεταλλικού καλαθίου στο θάλαμο καύσης

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1, η απαέρωση των οργανικών ουσιών του ελαστικού των μεταλλικών εξαρτημάτων, κατά την εισαγωγή του μεταλλικού καλαθιού στην υψηλής θερμοκρασίας ρευστοποιημένη άμμο, πραγματοποιείται άμεσα. Τα αέρια της πυρόλυσης, εξαιτίας της συνεχής ρευστοποίησης της άμμου, ανέρχονται στην επιφάνεια της κλίνης. Ο γερανός παρεμποδίζει την ροή των καυσαερίων προς το θάλαμο πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας μετάκαυσης ενώ επιπλέον ο καυστήρας στην επιφάνεια της κλίνης είναι κλειστός. Στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την τοποθέτηση του μεταλλικού καλαθιού και την έξοδο του γερανού από το θάλαμο καύσης, η κεντρική θύρα παραμένει ανοιχτή αποτελώντας το μέσο εκτόνωσης των καυσαερίων. Ο συνδυασμός των παραπάνω στοιχείων συντελεί στη σωματιδιακή ρύπανση του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης.

#### 6.5.1.2 Εξαγωγή – τροφοδοσία σε παρτίδες

Η διαδικασία της εξαγωγής του μεταλλικού καλαθιού με τα επεξεργασμένα εξαρτήματα από το θάλαμο καύσης αποτελεί δευτερεύουσα πηγή ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης. Τα επιμέρους στοιχεία της διαδικασίας, δηλαδή η υψηλή θερμοκρασία του θαλάμου καύσης, η θέση του γερανού, η ανοιχτή κεντρική θύρα και η συνεχής ρευστοποίηση, παραμένουν όπως και στην περίπτωση της εισαγωγής του μεταλλικού καλαθιού. Η εξαγωγή του καλαθιού πραγματοποιείται στο τέλος της επεξεργασίας των μεταλλικών εξαρτημάτων με αποτέλεσμα η ποσότητα της σωματιδιακής ύλης που περιέχεται στο θάλαμο καύσης να είναι περιορισμένη. Όμως, εξαιτίας της συνεχής ρευστοποίησης, σωματίδια που είναι εγκλωβισμένα στη μάζα της άμμου απελευθερώνονται κατά την διαδικασία ανύψωσης του καλαθιού και εξέρχονται από το θάλαμο καύσης στον χώρο της εγκατάστασης.

#### 6.5.1.3 Εισαγωγή – συνεχής τροφοδοσία

Η διαδικασία της εισαγωγής των μεταλλικών εξαρτημάτων στο θάλαμο καύσης στο σύστημα συνεχούς τροφοδοσίας αποτελεί δευτερεύουσα πηγή ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης. Οι διπλές θυρίδες εισαγωγής βρίσκονται στην κορυφή του θαλάμου καύσης. Κατά το άνοιγμα της κατώτερης θυρίδας καυσαέρια εγκλωβίζονται στον ενδιάμεσο χώρο και εκτονώνονται στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης κατά το άνοιγμα της ανώτερης θυρίδας. Όπως αποδεικνύεται από τις αντίστοιχες μετρήσεις, η συνεισφορά του συστήματος συνεχούς τροφοδοσίας στη συνολική ρύπανση δεν είναι σημαντική, αφού οι θυρίδες είναι τοποθετημένες μετά το θάλαμο πρωτοβάθμιας μετάκαυσης ενώ επιπλέον η χρονική διάρκεια που παραμένουν ανοιχτές είναι περίπου 5 sec.

### 6.5.2 Τύπος μεταλλικών εξαρτημάτων

Ανεξάρτητα από τον τύπο του μεταλλικού εξαρτήματος εμφανίζεται αύξηση της σωματιδιακής συγκέντρωσης μετά από χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 10 έως 16 min από την εισαγωγή του μεταλλικού καλαθιού στο θάλαμο καύσης. Η χρονική υστέρηση δεν είναι δυνατόν να εξηγηθεί, όμως εμφανίζεται σε όλες τις μετρήσεις. Παρά την σχετική ομοιομορφία των γραφικών παραστάσεων, οι μέγιστες τιμές της συγκέντρωσης διαφέρουν και αποδεικνύουν την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ του τύπου του εξαρτήματος και της ποσότητας της σωματιδιακής ύλης που παράγεται. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες, μέσες και ελάχιστες τιμές των μέγιστων τιμών της συγκέντρωσης για τα εξαρτήματα M48, M60, M113 Γ.Τ και Λεωνίδα. Η τροφοδοσία των M48 πραγματοποιείται συνήθως με το συνεχές σύστημα και δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

	M48	M60	M113 Γ.Τ	Λεωνίδα
Τύπος	πίροι, διόπτρες	πίροι, διόπτρες	πέλματα	πίροι, διόπτρες
Μέγιστη	2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	34000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Μέση	–	2100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ελάχιστη	–	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Πίνακας 6.1 – Μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή των μέγιστων συγκεντρώσεων

Από τον Πίνακα 6.1 παρατηρούμε ότι η μέση τιμή των μέγιστων συγκεντρώσεων για τα μεταλλικά εξαρτήματα M60 και Λεωνίδα υπερβαίνει το όριο των 2000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  που αποτελεί την οριακή τιμή έκθεσης σε σκόνη άνθρακα. Η μεγαλύτερη σωματιδιακή ρύπανση παράγεται από τα εξαρτήματα τύπου Λεωνίδα ενώ η μικρότερη από τα M113 Γ.Τ εξαιτίας της μορφής τους (πέλματα).

### 6.5.3 Χώρος εργασίας

Παρά τις υπερβολικά υψηλές εκπομπές σωματιδίων κατά την εισαγωγή των μεταλλικών εξαρτημάτων στο θάλαμο καύσης η συγκέντρωση της σωματιδιακής ύλης στο κύριο χώρο εργασίας παραμένει σε απόλυτα φυσιολογικά επίπεδα, ακόμα και σε σχέση με την οριακή τιμή της συγκέντρωσης  $\text{PM}_{10}$  στην ατμόσφαιρα που είναι τα 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Σ' αυτό συμβάλει η λειτουργία των ανεμιστήρων οροφής που είναι τοποθετημένοι πάνω από την περιοχή του θαλάμου καύσης και πιθανότατα

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Από τις οπτικές παρατηρήσεις του χώρου εργασίας και την ανάλυση των αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης είναι φανερό ότι απαιτούνται διορθωτικές ενέργειες πρωτίστως για την διασφάλιση της υγείας των εργαζομένων και την παράταση του χρόνου ζωής των εγκαταστάσεων.

### 7.2 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ

Αν και οι μετρήσεις της σωματιδιακής συγκέντρωσης στον κύριο χώρο εργασίας είναι σε απολύτως φυσιολογικά επίπεδα, η καθημερινή λειτουργία της εγκατάστασης απαιτεί πλήθος εργασιών που δεν περιορίζονται στην συγκεκριμένη περιοχή. Για παράδειγμα η μέγιστη εκπομπή σωματιδιακής ύλης στην περιοχή πάνω από το θάλαμο καύσης κατά την εισαγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων τύπου Λεωνίδα είναι 17 φορές μεγαλύτερη από την οριακή τιμή έκθεσης σε σκόνη άνθρακα (εργατική νομοθεσία) και 850 φορές μεγαλύτερη από την οριακή τιμή συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> στην ατμόσφαιρα (νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος). Με βάση τα

παραπάνω, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση από τους εργαζόμενους ειδικών μασκών κατακράτησης σωματιδίων. Επιπλέον, κρίνεται ωφέλιμη η ανανέωση του αέρα στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης. Έτσι, πρέπει να παραμένουν ανοιχτές συνεχώς οι πόρτες του μεταλλικού στεγάστρου και να μην διακόπτεται η λειτουργία των ανεμιστήρων οροφής. Τέλος, θεωρείται χρήσιμη η περαιτέρω χημική ανάλυση της σωματιδιακής ύλης για τον προσδιορισμό όλων των ουσιών που τη συνιστούν.

### 7.3 ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Η μείωση των εκπομπών σωματιδίων ή ο περιορισμός της σωματιδιακής ρύπανσης σε συγκεκριμένη περιοχή του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης πρέπει να γίνει απαραίτητα σε συνεννόηση με την κατασκευάστρια εταιρεία. Με βάση τα συμπεράσματα για τον τρόπο εμφάνισης της σωματιδιακής ρύπανσης μπορούν να γίνουν οι εξής τροποποιήσεις:

- Κατασκευή νέου γερανού που δεν θα παρεμποδίζει την διαφυγή των καυσαερίων στο θάλαμο μετάκαυσης.
- Τοποθέτηση ελαφριάς μεταλλικής κατασκευής που θα αντικαθιστά αυτόματα τη λειτουργία της βαριάς κεντρικής θύρας του θαλάμου καύσης κατά την εισαγωγή και εξαγωγή του μεταλλικού καλαθιού παρεμποδίζοντας την διαφυγή των καυσαερίων εκτός του θαλάμου καύσης.
- Μείωση της παροχής αέρα των φυσητήρων που είναι τοποθετημένοι στη βάση της ρευστομηχανικής κλίνης κατά την εισαγωγή και εξαγωγή του μεταλλικού καλαθιού.
- Αύξηση της αναρρόφησης των καυσαερίων στο θάλαμο μετάκαυσης κατά την εισαγωγή και εξαγωγή του μεταλλικού καλαθιού μέσω μεταβολής της ταχύτητας του συστήματος ID-fan.
- Άμεση επίλυση των προβλημάτων επικοινωνίας του αυτόματου συστήματος μεταφοράς του μεταλλικού καλαθιού που είχε σαν αποτέλεσμα την δυσλειτουργία του γερανού και την διατήρηση της κεντρικής θύρας του θαλάμου καύσης ανοιχτής για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής του συστήματος συνεχούς τροφοδοσίας στα μεταλλικά εξαρτήματα τύπου M60 και Λεωνίδα.

Τέλος, αν οι παραπάνω τροποποιήσεις δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν για τεχνικούς λόγους που σχετίζονται με τον τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης (μόνο οι κατασκευαστές της εγκατάστασης είναι ικανοί να το κρίνουν) είναι εφικτό η σωματιδιακή ρύπανση να περιοριστεί σε κλειστό χώρο, ώστε να απομακρύνεται με

σύστημα εξαεριστήρων πριν την είσοδο των εργαζομένων σ' αυτόν. Περιμετρικά της εγκατάστασης της ρευστομηχανικής κλίνης υπάρχει μεταλλικό πλέγμα για τη στήριξη των βοηθητικών συστημάτων στο οποίο θα μπορούσε να στηριχθεί μια ελαφριά κατασκευή δημιουργώντας ένα κλειστό χώρο. Παράλληλα με την κατασκευή αυτή θα μπορούσαν να μεταφερθούν οι ανεμιστήρες οροφής σε χαμηλότερο ύψος εξασφαλίζοντας έτσι τον εξαερισμό του χώρου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της πηγής ρύπανσης και ο καθορισμός των συνθηκών εργασίας των εργαζομένων στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης της ρευστομηχανικής κλίνης. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων και των πειραματικών μετρήσεων της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η πηγή της σωματιδιακής ρύπανσης εντοπίζεται αποκλειστικά στην περιοχή του θαλάμου καύσης.
- Η διεργασία της εισαγωγής των μεταλλικών εξαρτημάτων στο θάλαμο καύσης, κατά την τροφοδοσία σε παρτίδες, αποτελεί την κύρια πηγή ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης.
- Η διεργασία της εξαγωγής των μεταλλικών εξαρτημάτων από το θάλαμο καύσης αποτελεί δευτερεύουσα πηγή ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης.
- Η διεργασία της εισαγωγής των μεταλλικών εξαρτημάτων στο θάλαμο καύσης, κατά την συνεχή τροφοδοσία, αποτελεί δευτερεύουσα πηγή ρύπανσης του εσωτερικού χώρου της εγκατάστασης με μικρή συνεισφορά στη συνολική ρύπανση.
- Υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του τύπου του μεταλλικού εξαρτήματος που επεξεργάζεται και της ποσότητας της σωματιδιακής ύλης που παράγεται.

- Η μεγαλύτερη σωματιδιακή ρύπανση παράγεται από τα εξαρτήματα τύπου Λεωνίδα (πίροι και διόπτρες), ενώ η μικρότερη από τα M113 Γ.Τ (πέλματα).
- Η συγκέντρωση της σωματιδιακής ύλης στον κύριο χώρο εργασίας κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα.
- Το κύριο συστατικό στοιχείο της σωματιδιακής ύλης, όπως προκύπτει από τη χημική ανάλυση, είναι ο άνθρακας.
- Το μέγεθος του μεγαλύτερου ποσοστού των σωματιδίων κυμαίνεται στην περιοχή ορισμού των  $PM_{10}$ .



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Afshari, A., and Gunnarsen L., Review of the sources of fine and ultra fine particles in indoor air, Danish Building Research Institute, Dr. Neegaards Vej 15, 2970 Hørsholm, Denmark, 2000.
2. Cooper, D., and Alley, C., Έλεγχος Αέρας Ρύπανσης, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
3. Crowe, C., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y., Multiphase Flows with Droplets and Particles, CRC Press, 1998.
4. Denn, M., Process Fluid Mechanics, Prentice Hall, Inc., 1980.
5. Ergun, S., Fluid Flow through Packed Columns, Chem. Eng. Prog., 1952.
6. Gunter, K., and Sutherland, J., An experimental investigation in to the effect of process conditions on the mass concentration of cutting fluid mist in turning, Journal of cleaner production, Vol. 7, pg. 341-350, 1999.
7. Fourth External Review Draft of Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume I, Environmental Protection Agency, 2003.
8. Fourth External Review Draft of Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume II, Environmental Protection Agency, 2003.
9. Friedlander, S. K., The characterization of aerosols distributed with respect to size and chemical composition, J. Aerosol Sci, 1970.
10. Κουιμιτζή, Θ., και Μάτη, Κ., Αρχές Τεχνολογίας Αντιρρύπανσης, Εκδόσεις Ζήτη, 1987.
11. McCabe, W., Smith, J., and Harriot, P., Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής, 6<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2002.
12. Masters, G., Introduction to Environmental Engineering and Science, Prentice Hall, Inc., 1991.
13. de Nevers, N., Air Pollution Control Engineering, McGraw – Hill, 1995.
14. Παπαϊωάννου, Α., Μηχανική των Ρευστών, Τόμος II, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Κοράλι, 2002.
15. Papanastasiou, T., Applied Fluid Mechanics, Prentice Hall, Inc., 1994.
16. Pell, M., and Dunson, J., Gas-Solid Operations and Equipment, Section 17, Perry's Chemical Engineers Handbook, McGraw – Hill, 1999.
17. Romero, J., and Johanson, L., Factors Affecting Fluidized Bed Quality, CEP Symp. Series, 1962.

18. Schwela, D., Morawska, L., and Kotzias, D., Guidelines for concentration exposure response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies, WHO and JRC, 2000.
19. Vesilind, A., Peirce, J., and Weiner, R., Environmental Pollution and Control, 3<sup>rd</sup> Edition, Butterworth-Heinemann, 1990.
20. Whan, R., Materials Characterization, Volume 10, ASM Handbook, ASM International, 1986.
21. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH): <http://www.acgih.org>
22. Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας: <http://www.elinyae.gr/>
23. Environmental Protection Agency (EPA): <http://epa.gov/>
24. European Union (EU): <http://europa.eu.int/>
25. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS): <http://www.epa.gov/ttn/naaqs/>
26. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): <http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>
27. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) of the U.S. Department of Labour (USDOL): <http://www.osha.gov/>
28. World Health Organization (WHO): <http://www.who.int/en/>
29. Υπουργείο Απασχόλησης και Κοινωνικής Προστασίας: <http://www.osh.gr/>



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074012

