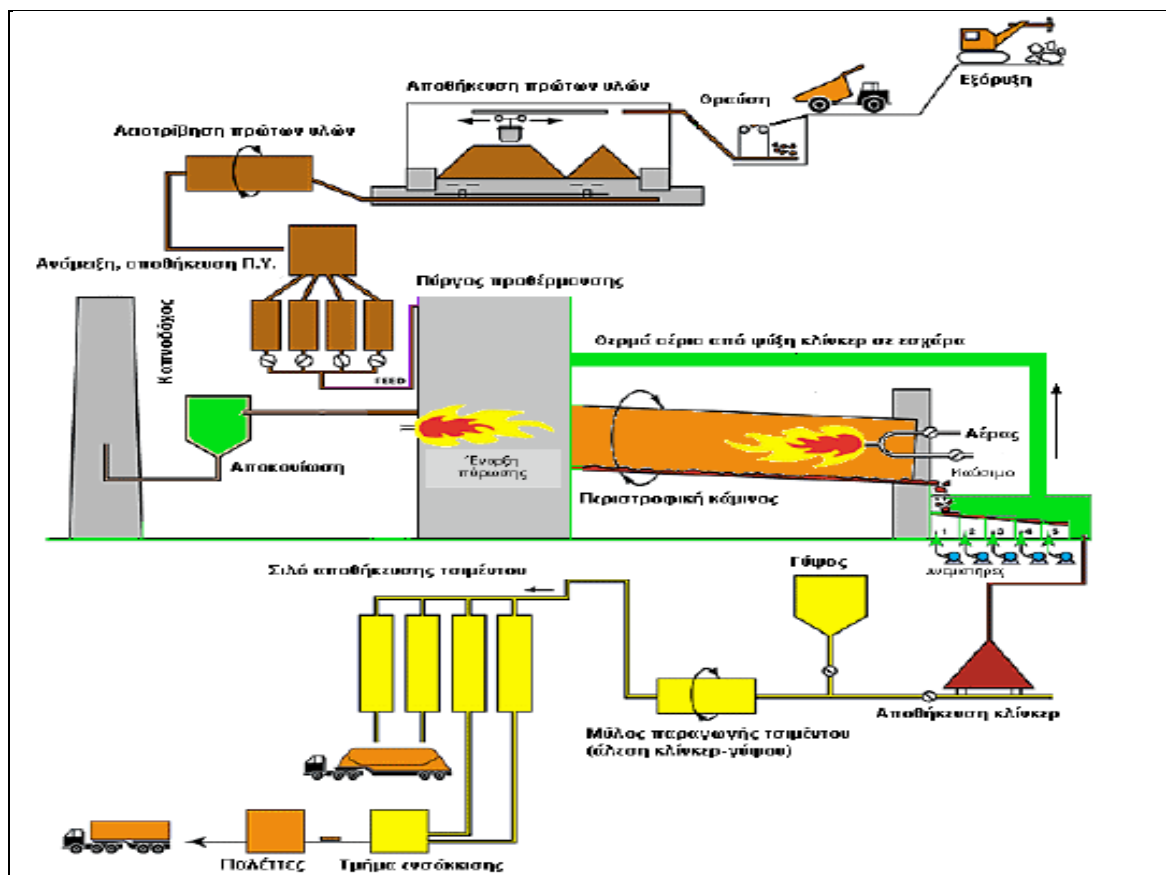


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συστήματα Αποκονίωσης στη Βιομηχανία
Παραγωγής Τσιμέντου



ΠΟΥΛΑΚΙΑΔΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α.Μ. 6073
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δρ. ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΡΑΣ

ΠΑΤΡΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ *Συστήματα Αποκονίωσης στη Βιομηχανία Παραγωγής Τσιμέντου*

Πουλακίδας Κωνσταντίνος Α.Μ 6073

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ





Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1 Εισαγωγή στην παραγωγή τσιμέντου.....	11
1.1 Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμέντου.....	11
1.2 Προσδιορισμός της σύνθεσης του φορτίου.....	14
1.3 Οι Περιτροφικές Κάμινοι.....	14
1.3.1 Μέθοδοι Παραγωγής.....	15
1.3.2 Η ψύξη του κλίνκερ.....	22
1.3.3 Η άλεση του κλίνκερ.....	24
2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ.....	27
2.1 Ορισμός Αποκονίωσης – Είδη Αποκονιωτών.....	28
2.2 Μηχανικοί συλλέκτες - αποκονιωτές.....	29
3 ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΕΣ.....	31
3.1 Κονιοθάλαμοι- Βαρυτικοί Συλλέκτες.....	31
3.2 Συλλέκτες εκτροπής με ανακυκλοφορία.....	32
3.3 Κυκλώνες.....	33
3.3.1 Αρχή Λειτουργίας Κυκλώνα.....	34
3.4 Κυκλώνες υψηλής απόδοσης.....	35
3.5 Βασικά Χαρακτηριστικά κυκλώνων.....	36
3.6 Πολυκυκλώνες.....	37
3.7 Πύργοι Υγρής Μεθόδου.....	38
4 ΦΙΛΤΡΑΝΣΗ.....	39
4.1 Μηχανισμοί Φίλτρανσης.....	39
4.2 Φίλτρα υφαντών μέσων (διήθηση).....	40
4.2.1 Μέθοδοι καθαρισμού του φίλτρου.....	40
4.3 Φίλτρα υφαντών μέσων (διήθηση) αναπνευστήρων.....	41
4.3.1 Φίλτρα υφαντών μέσων από ίνες υάλου (διήθηση).....	42
4.3.2 Φίλτρα με στρώμα κοκκώδους υλικού.....	42
4.4 Μηχανισμοί Διήθησης.....	42
4.4.1 Μηχανισμός διήθησης – Πρόσκρουση (ή ενσφήνωση – <i>impaction</i>).....	43
4.4.2 Μηχανισμός διήθησης – Ανάσχεση (<i>interception</i>).....	44
4.4.3 Μηχανισμός διήθησης – Διάχυση (<i>diffusion</i>).....	44
4.4.4 Άλλοι Μηχανισμοί διήθησης – Συνολική απόδοση Φίλτρου.....	45
5 ΣΑΚΟΦΙΛΤΡΑ.....	47
5.1 Χαρακτηρισμός -Είδη Σακόφιλτρων.....	49
5.2 Είδη Υφάσματος – «πλεγμένο ύφασμα».....	50
5.2.1 Πιληματοποιημένο φίλτρο (<i>Felted filter</i>).....	52
5.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Σακόφιλτρων.....	54
5.4 Συνθήκες Λειτουργίας.....	55
5.5 Θεωρία Πτώσης Πίεσης – Μοντέλο Αντίστασης Φίλτρου.....	57
5.6 Επιλογή τύπου φίλτρου.....	60
5.7 Σακόφιλτρα δόνησης με αέρα υπό πίεση.....	60
5.7.1 Σακόφιλτρα με ηχητική δόνηση (<i>shaker</i>).....	63
5.7.2 Σακόφιλτρα με μηχανική δόνηση (<i>shaker</i>).....	63
5.8 Σακόφιλτρα με ρεύμα αντίθετης ροής και μηχανική δόνηση.....	64
5.8.1 Αριθμός διαμερισμάτων (<i>compartments</i>).....	66
5.8.2 Σχεδιαστική διαδικασία για σακόφιλτρα.....	67
6 ΠΗΓΕΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	71
6.1 Σωματιδιακοί Ρύποι.....	73
6.2 Στατικές Πηγές.....	74



6.2.1	<i>Αιωρούμενα Σωματίδια.</i>	74
6.2.2	<i>Τεχνολογία για την προστασία από τα αιωρούμενα σωματίδια.</i>	76
6.3	Ελληνική Τσιμεντοβιομηχανία.	76
6.4	Εκπομπές ΤΙΤΑΝ.	79
6.5	Δυνατότητες μείωσης των εκπομπών ΤΙΤΑΝ.	81
7	Αναφορές.	82

Εικόνα 1: Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα υλικά και τελικό προϊόν κατά την διαδικασία παραγωγής τσιμέντου. [1]	11
Εικόνα 2: Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων για την παραγωγή 1kg τσιμέντου. [1]	12
Εικόνα 3: Αναλογία πρώτων υλών για την παραγωγή κοινού τύπου τσιμέντου [3]	13
Εικόνα 4: Σφαιρίδια μεγέθους 15-25mm κλίνκερ τσιμέντου. [3]	13
Εικόνα 5: Απλοποιημένη απεικόνιση περιστροφικής καμίνου.[1]	16
Εικόνα 6: Διεργασίες στη διάταξη της περιστροφικής καμίνου κατά την παραγωγή κλίνκερ. [1]	16
Εικόνα 7: Συμβατικό κύκλωμα λειοτρίβισης (άλεσης) για την παραγωγή τσιμέντου. [1]	16
Εικόνα 8: Σχέση Μεθόδου παραγωγής κλίνκερ ως προς το μήκος της περιστροφικής καμίνου – Κατανομή των ζωνών κατεργασίας εντός της καμίνου [4]	17
Εικόνα 9: Διάταξη ξηρής μεθόδου παραγωγής κλίνκερ με προθέρμανση της τροφοδοσίας και πύρωση του ασβεστόλιθου (Preheater/Precalciner). [1]	17
Εικόνα 10: Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου. [1]	18
Εικόνα 11: Θερμοκρασιακή Κατανομή ως προς το χρόνο παραμονής του υλικού σε κάθε περιοχή, κατά την ξηρή μέθοδο παραγωγής κλίνκερ. [1]	19
Εικόνα 12: Επικαθίσεις χλωριούχων ενώσεων αλκαλίων στο σύστημα preheater/precalciner [1]	20
Εικόνα 13: Ξηρή μέθοδος παραγωγής κλίνκερ με προθέρμανση τροφοδοσίας (preheater) – Κατανομή θερμοκρασιών ως προς το χρόνο κατεργασίας του υλικού. [4]	21
Εικόνα 14: Διάταξη ημι-ξηρής μεθόδου (semi-dry) παραγωγής τσιμέντου [4]	21
Εικόνα 15: Διάταξη ψύξης του κλίνκερ στην έξοδο της καμίνου.[4]	22
Εικόνα 16: Τρισδιάστατη απεικόνιση της διάταξης ψύξης του κλίνκερ. [4]	23
Εικόνα 17: Το συμβατικό κύκλωμα άλεσης κλίνκερ και πρόσθετων (γύψου, σκωρίας κλπ).[1]	24
Εικόνα 18: Περιγραφή τμημάτων μύλου άλεσης του κλίνκερ. [5]	25
Εικόνα 19: Διάταξη προκαταρκτικής άλεσης (pregrinding) του κλίνκερ με κυλινδροπρέσσα (Roller press) και τελική άλεση σε σφαιρόμυλο (FLSmidth).	26
Εικόνα 20: Διάταξη ημιτελικής άλεσης (semi – finish grinding) του κλίνκερ με κυλινδροπρέσσα (Roller press) και τελική άλεση σε σφαιρόμυλο (FLSmidth).	26
Εικόνα 21: Κατηγορίες αποκονιωτών [1]	28
Εικόνα 22: Ολοκληρωμένο σύστημα αποκονίωσης εργοστασίου [7].	30
Εικόνα 23: Σχήμα κονιοθάλαμου (σκόνη που κατακάθισε) [8].	31
Εικόνα 24: Βαρυτικός συλλέκτης σωματιδιακής ύλης [8].	32
Εικόνα 25: Συλλέκτης εκτροπής με ανακυκλοφορία [8].	33
Εικόνα 26: Κυκλοφορία αερίων μέσα σε Κυκλώνα [6,7].	34
Εικόνα 27: Κυκλώνες υψηλής απόδοσης [1].	35
Εικόνα 28: Απεικόνιση τυπικού κυκλώνα κατακράτησης σωματιδιακής ύλης και πολυκυκλώνα [6,7].	37
Εικόνα 29: Σύστημα αποκονίωσης με πολυκυκλώνα [6,7].	38
Εικόνα 30: Σύστημα αποκονίωσης με πύργους υγρής μεθόδου [7].	38
Εικόνα 31: Μηχανισμός Φίλτρασης αέρα [6,7].	39
Εικόνα 32: Λειτουργία φιλτραρίσματος διαμέσου πορώδους μέσου (κέικ σκόνης) [6,7].	40
Εικόνα 33: Φτωχό φιλτράρισμα του σκονερού αερίου χωρίς πορώδες [6,7].	40
Εικόνα 34: Συστήματα αποκονίωσης – Σακκόφιλτρα διαφόρων τύπων [6]	41
Εικόνα 35: Μηχανισμός της Πρόσκρουσης (impaction).[6,7]	43
Εικόνα 36: Μηχανισμός Ανάσχεσης (interception) [6,7].	44
Εικόνα 37: Μηχανισμός Διάχυσης (diffusion) [6,7].	45
Εικόνα 38: Απόδοση φίλτρου ως συνάρτηση του μεγέθους του σωματιδίου [6].	45
Εικόνα 39: Απόδοση φίλτρου ως συνάρτηση του συνδυασμού μηχανισμών απόθεσης σωματιδίων [11].	46
Εικόνα 40: Σακκόφιλτρα με τίνιγμα [7]	48
Εικόνα 41: Σακκόφιλτρα με παλμικά ακροφύσια [7]	48
Εικόνα 42: Ίνες Σακκόφιλτρου - Μέτρηση Δρ. [7]	49
Εικόνα 43: Σακκόφιλτρα (α) Θετικής και (β) Αρνητικής Πίεσης. [7]	49
Εικόνα 44: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης σακκόφιλτρου θετικής πίεσης. [7]	50
Εικόνα 45: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης σακκόφιλτρου αρνητικής πίεσης [7].	50
Εικόνα 47: Σχηματική αναπαράσταση των τμημάτων που απαρτίζουν ένα σακκόφιλτρο. [6,7]	51
Εικόνα 48: Παγίδευση σκόνης σε "πλεγμένο ύφασμα" – Μικροσκοπικά και τεράστια συστήματα [6,7].	52



Εικόνα 49: Συστοιχία σάκων (σακόφιλτρα) [6,7].	52
Εικόνα 50: Διηθητικά μέσα (μικροσκοπικά ή μεγάλου μεγέθους) [7].	53
Εικόνα 51: Διαδικασία φίλτρασης από πιηματοποιημένο φίλτρο [7].	53
Εικόνα 52: Τύποι φίλτρων ανάλογα με τα στηρίγματα [7].	53
Εικόνα 53: Σημεία μέτρησης διαφοράς - πτώσης πίεσης. [6,7]	57
Εικόνα 54: Διαδικασία εισδοχής ακάθαρτου αέρα μέσα από το πορώδες [6,7].	58
Εικόνα 55: Εμπειρικός προσδιορισμός συντελεστών K_e , K_s , ως προς την υπολειμματική σκόνη [7].	59
Εικόνα 56: (α) Αντίσταση του φίλτρου S , σε σχέση με τη μάζα που συλλέγεται σε ένα απλό σακόφιλτρο, (β) Συνολική πτώση πίεσης σε ένα σακόφιλτρο πολλαπλών διαμερισμάτων [7].	60
Εικόνα 57: Σακόφιλτρα με μηχανική δόνηση.	61
Εικόνα 58: Σακόφιλτρο δόνησης με αέρα υπό πίεση.	62
Εικόνα 59: Σακόφιλτρα με ηχητική δόνηση (shaker) [7].	63
Εικόνα 60: Πρόσδεση του σάκου στη συσκευή δόνησης [6, 7].	64
Εικόνα 61: Τυπικό σακόφιλτρο με δόνηση όπου με το βέλος δίνεται η θέση του κινητήρα τινάγματος [7].	64
Εικόνα 62: Σακόφιλτρα με πεπιεσμένο αέρα [8].	66
Εικόνα 63: Πτώση πίεσης όλων των διαμερισμάτων συναρτήσει των χρόνων t_r , t_c . [7].	67
Εικόνα 64: Σακόφιλτρα με ρεύμα αέρα αντίθετης ροής (reverse flow) [7].	68
Εικόνα 65: Διαδικασία καθαρισμού σακόφιλτρου με ρεύμα αέρα αντίθετης ροής (reverse flow) [7].	68
Εικόνα 66: Ολοκληρωμένο σύστημα καθαρισμού σακόφιλτρου σε διάταξη ροής αερίου αντίθετης ροής [7].	69
Εικόνα 67: Κατανομή ελληνικών εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου [1, 16]	77
Εικόνα 68: Παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα περίοδος 1997 – 2006. [1, 16]	78
Εικόνα 69: Εξέλιξη των πωλήσεων του παραγόμενου τσιμέντου στην Ελλάδα [1, 16].	78
Εικόνα 70: Ειδικές εκπομπές σκόνης [16].	79
Εικόνα 71: Ειδικές εκπομπές οξειδίων του Θείου [16].	80
Εικόνα 72: Ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου [16].	80
Εικόνα 73: Διάγραμμα παραγωγής CO_2 . [16]	80



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην εφαρμογή συστημάτων αποκονίωσης στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου με έμφαση στα σακόφιλτρα.

Αφορμή για την παρούσα πτυχιακή εργασία αποτέλεσε η πρακτική άσκηση που εκπονήθηκε την αμέσως προηγούμενη περίοδο από την έναρξη της πτυχιακής μου εργασίας στις εγκαταστάσεις της εταιρίας ΤΙΤΑΝ στο Δρέπανο Αχαΐας. Η αποκονίωση αποτελεί πολύ σημαντικό τμήμα της παραγωγικής διαδικασίας με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος.

Πιο συγκεκριμένα η αποκονίωση είναι το τεχνολογικό κομμάτι που ασχολείται με τη συγκράτηση της σκόνης που ενυπάρχει στα αέρια τα οποία δημιουργούνται στις διάφορες διεργασίες στη βιομηχανία. Η αποκονίωση έχει μεγάλη σημασία, γίνεται για περιβαλλοντικούς λόγους (απαλλαγή του περιβάλλοντος από τη σκόνη), λειτουργικούς και οικονομικούς. Ειδικά στην Τσιμεντοβιομηχανία ως διαδικασία εμφανίζεται στο σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας, ξεκινώντας από τη διαδικασία εξόρυξης και καταλήγοντας σε αυτήν της συσκευασίας του τσιμέντου σε σάκους.

Στην Τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποιούνται σχεδόν όλες οι κατηγορίες αποκονιωτών μηχανικών και ηλεκτρικών (κονιοθάλαμοι, κυκλώνες, πολυκυκλώνες, πύργοι υγρής μεθόδου, σακκόφιλτρα καθώς και ηλεκτροστατικά φίλτρα). Υπάρχουν αυστηροί ευρωπαϊκοί αλλά και διεθνείς κανονισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος που αναγκάζουν την Τσιμεντοβιομηχανία να συμβαδίζει και να ακολουθεί πιστά.

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση της αρχής λειτουργίας των σακόφιλτρων ως τύπο αποκονιωτή καθώς και η μελέτη της εφαρμογής στην παραγωγική διαδικασία που ακολουθεί η Τσιμεντοβιομηχανία.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Επιβλέποντα Δρ. Διονύσιο Παναγιωτάρα, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αλλά και συνολικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής
(Ονοματεπώνυμο)

.....
Υπογραφή



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των συστημάτων αποκονίωσης στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου. Η εργασία αναλύεται ως ακολούθως:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην παραγωγική διαδικασία μιας τσιμεντοβιομηχανίας αναφέροντας τις πρώτες ύλες, που συνθέτουν το τελικό προϊόν του τσιμέντου. Επίσης γίνεται περιγραφή των μεθόδων παραγωγής και επεξεργασίας του μίγματος που οδηγεί στην παραγωγή του τσιμέντου γνωστότερου ως κλίνκερ.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται τα συστήματα αποκονίωσης συνοπτικά και κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Δίνεται καταρχήν ο ορισμός της έννοιας «αποκονίωση και στη συνέχεια καταγράφονται τα είδη αποκονιωτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζονται οι μηχανικοί αποκονιωτές και τα είδη συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους και δίνονται τα χαρακτηριστικά τους γνωρίσματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της φίλτρανσης και οι μηχανισμοί της διήθησης ως αναπόσπαστο τμήμα της διαδικασίας της αποκονίωσης. Αναφέρονται οι τύποι φίλτρων που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία. Αναλύονται ενδελεχώς επίσης όλοι οι μηχανισμοί διήθησης (πρόσκρουση, ανάσχεση, διάχυση), ο τρόπος εφαρμογής και τα αποτελέσματα που επιφέρουν.

Ανάμεσα στις διατάξεις αποκονίωσης η πιο κοινά χρησιμοποιούμενη είναι τα σακόφιλτρα τα οποία αναλύονται στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας. Δίνονται τα είδη των σακόφίλτρων καθώς και τα είδη υφασμάτων που χρησιμοποιούνται συνήθως με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά αναφορικά με το πορώδες μέσο που δημιουργούν. Επίσης καταγράφονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σακόφίλτρων. Αναπτύσσεται αναλυτικά η θεωρία πτώσης πίεσης κατά τη διέλευση του αερίου μέσα από τα σακόφιλτρα κατά το μοντέλο αντίστασης φίλτρου.



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τσιμεντοβιομηχανία και η παραγωγή σκυροδέματος προκαλούν πέραν των γνωστών αέριων ρύπων θερμοκηπίου και άλλου είδους εκπομπές στην ατμόσφαιρα όπως διαφόρων ειδών σκόνης που μπορεί να προέρχονται η από την περιστροφική κάμινο, από την παραγωγή και ανάμιξη των πρώτων υλών, από την άλεση του κλίνκερ, από τις διαδικασίες ενσάκκισης και φόρτωσης του τσιμέντου κ.λπ. Ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης αυτής της ρύπανσης είναι η δέσμευση, η συλλογή και ανακύκλωση της σκόνης στις διεργασίες παραγωγής του τσιμέντου. Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται σήμερα αποδοτικά με χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων, μηχανικών διατάξεων συλλογής, σακκόφιλτρων, κάλυψης των μεταφερόμενων υλικών κ.λπ. Η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου πρέπει να υπακούει στις αυστηρές προδιαγραφές εκπομπών αερίων και σκόνης στην ατμόσφαιρα.

Η σωματιδιακή ύλη παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία στην κατανομή μεγέθους, το σχήμα, το ειδικό βάρος, τη χημική σύσταση, την πυκνότητα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τη συνοχή κα. Όλες αυτές οι ιδιότητες, μαζί με την αναμενόμενη ποσότητα του απόβλητου αερίου προς επεξεργασία, καθορίζουν την επιλογή του εξοπλισμού απομάκρυνσης σωματιδιακών ρύπων.

Με τον όρο σωματιδιακοί ρύποι περιγράφονται τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, είναι ένας ευρύς όρος που καλύπτει όλες τις ουσίες στην ατμόσφαιρα που δεν είναι αέρια. Τα σωματίδια είναι συνδυασμοί πολλών μορίων, μερικές φορές παρόμοιων και άλλες διαφορετικών μεταξύ τους. Περιλαμβάνουν σκόνη, σωματίδια καπνού, ιόντα, συμπλέγματα μορίων κτλ. Μερικά από αυτά τα σωματίδια λειτουργούν σαν πυρήνες στους οποίους συμπυκνώνονται ατμοί. Μερικά σωματίδια αντιδρούν χημικά με αέρια της ατμόσφαιρας ή ατμούς και σχηματίζουν διάφορες συνθέσεις.

Οι εκπομπές σκόνης είναι το αντικείμενο που απασχολεί ιδιαίτερα περισσότερο από περιβαλλοντικής άποψης τη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου. Αυτές οι εκπομπές διακρίνονται σε σημειακές εκπομπές σκόνης (ελεγχόμενες) και διάχυτες (μη ελεγχόμενες).

Οι κύριες πηγές σημειακών εκπομπών σκόνης είναι οι κάμινοι, οι μύλοι της φαρίνας, τα ψυγεία κλίνκερ, καθώς και οι μύλοι τσιμέντου. Σε όλες αυτές τις διαδικασίες, μεγάλοι όγκοι αερίων ρέουν μέσα από κονιοποιημένα υλικά. Ο σχεδιασμός και η αξιοπιστία των σύγχρονων ηλεκτροστατικών φίλτρων και των σακκόφιλτρων εξασφαλίζουν τη μείωση της σκόνης που ελευθερώνεται σε χαμηλά επιτρεπτά επίπεδα.



Οι εκπομπές σκόνης έχουν μειωθεί κατά 90% τα τελευταία 20 χρόνια και οι διαθέσιμες τεχνικές δείχνουν πως η εκπομπή σκόνης από μία σύγχρονη εγκατάσταση είναι πολύ χαμηλή έως ασήμαντη. Η χρήση δευτερογενών καυσίμων δεν επηρεάζει το ποσό της σκόνης που ελευθερώνεται από την κάμινο, επειδή η εκπομπή σκόνης σχετίζεται με την αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων αποκονίωσης.

Οι διάχυτες εκπομπές σκόνης δημιουργούνται από την αποθήκευση και τη διακίνηση των πρώτων υλών του κλίνκερ και των καυσίμων, καθώς και από την κυκλοφορία των οχημάτων μεταφοράς υλικών. Οι διάχυτες εκπομπές ενισχύονται τοπικά και από τη σκόνη της διεργασίας η οποία μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του αέρα σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από αυτήν της εγκατάστασης. Οι εκπομπές σκόνης είναι ανεπιθύμητες και για οικονομικούς λόγους, γιατί η αποφυγή τους συντελεί στην παραγωγή περισσότερου προϊόντος. Γι' αυτό το λόγο δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ελαχιστοποίηση αυτών των εκπομπών.

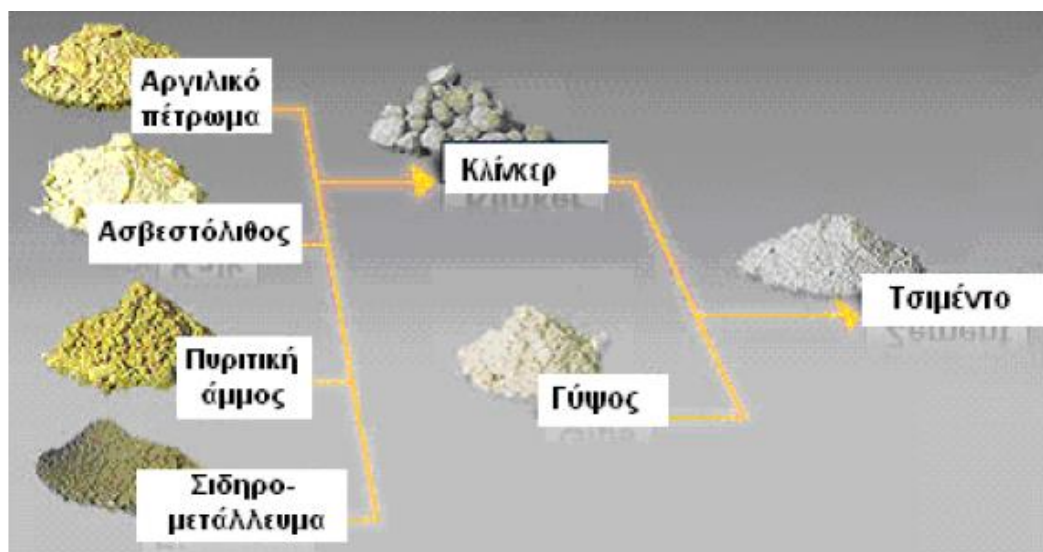
Σήμερα, όλες σχεδόν οι μονάδες ήδη διαθέτουν τεχνολογίες που χαρακτηρίζονται ως βέλτιστες. Εφαρμόζονται, γενικά, όλες οι τεχνικές απορρύπανσης (αποκονίωσης) που συνεπάγονται την ελάττωση, τόσο των σταθερών (από εγκαταστάσεις), όσο και των διάχυτων εκπομπών σκόνης. Ειδικότερα για την αποκονίωση των σταθερών εκπομπών χρησιμοποιούνται τα σακόφιλτρα σε πλήθος εγκαταστάσεων όπως: στις εγκαταστάσεις θραύσης υλικών, στις εγκαταστάσεις ομογενοποίησης και αποθήκευσης φαρίνας στις βοηθητικές εγκαταστάσεις μύλων τσιμέντου, στις εγκαταστάσεις άλεσης τσιμέντου, στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης, συσκευασίας και διακίνησης τσιμέντου, στις εγκαταστάσεις άλεσης στερεών καυσίμων. (Νουσιοπούλου 2010).

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι τα συστήματα αποκονίωσης στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου με έμφαση στα σακόφιλτρα που σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελούν την πιο κοινή αλλά ταυτόχρονα και από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους συγκράτησης της σκόνης που διαφορετικά θα συνέτεινε στη ατμοσφαιρική ρύπανση.



1 Εισαγωγή στην παραγωγή τσιμέντου.

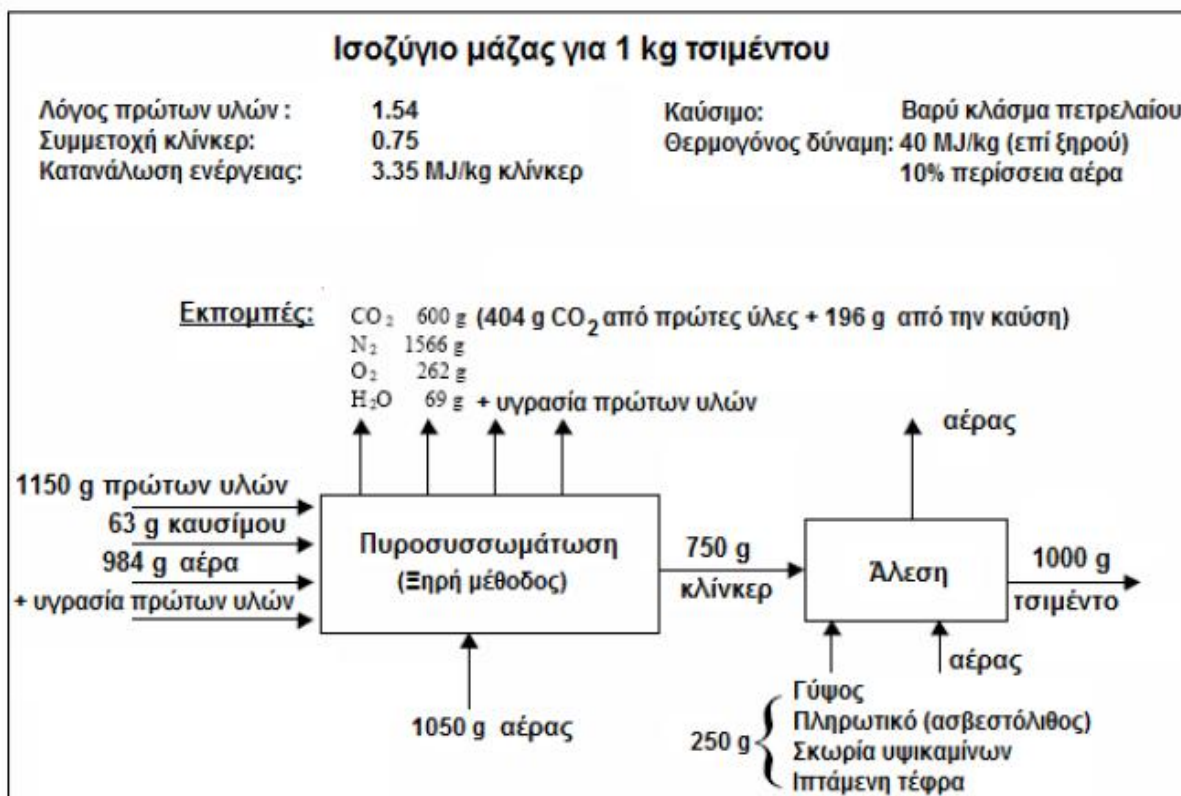
Το σκυρόδεμα είναι σήμερα το συνηθέστερο δομικό υλικό για τις κατασκευές κτιρίων και έργων κοινής ωφέλειας. Το τσιμέντο σε ανάμειξη με το νερό (τσιμεντόπαστα) είναι το συνδετικό υλικό, που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του σκυροδέματος. Υπάρχουν πολλών ειδών (τύποι) τσιμέντων, με συνηθέστερο αυτό που καλείται κοινό τσιμέντο Portland (OPC, Ordinary Portland Cement). Το κοινό τσιμέντο είναι ένα γκρίζο λεπτομερές υλικό, που προκύπτει από τη λειοτριβήση του κλίνκερ τσιμέντου. Ο λόγος τιμής (αξίας) προς βάρος είναι πολύ μικρός για το τσιμέντο γεγονός που το κάνει να είναι πολύ ακριβό για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Επίσης, επειδή οι πρώτες ύλες (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης) για την παραγωγή του τσιμέντου είναι ακόμη χαμηλότερης αξίας, για την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των πρώτων υλών οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου χωροθετούνται πολύ κοντά στις πηγές πρώτων υλών (ιδιαίτερα κοντά στο λατομείο ασβεστολιθικού πετρώματος). Η μεγαλύτερη ποσότητα του παραγόμενου τσιμέντου, για τους παραπάνω λόγους, πρέπει να διατίθεται σε περιοχές και μονάδες παραγωγής σκυροδέματος σχετικά κοντά στα εργοστάσια παραγωγής του. [1]



Εικόνα 1: Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα υλικά και τελικό προϊόν κατά την διαδικασία παραγωγής τσιμέντου. [1]

1.1 Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμέντου.

Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα, που εξορύσσονται επιφανειακά κοντά στη μονάδα παραγωγής του τσιμέντου. Επειδή, ποσοστό περίπου 80% από τους 1.50-1.65 τόνους πρώτων υλών, που απαιτούνται για την παραγωγή 1 τόνου κλίνκερ, είναι ασβεστολιθικό υλικό, είναι προφανής η αναγκαιότητα γειτνίασης της θέσης εξόρυξης ασβεστολιθικών πετρωμάτων και της μονάδας παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου. Ενδεικτικό ισοζύγιο πρώτων υλών και οι πρώτες ύλες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τσιμέντου, δίνονται στην Εικόνα 2 και στον Πίνακα 1.1. [1]



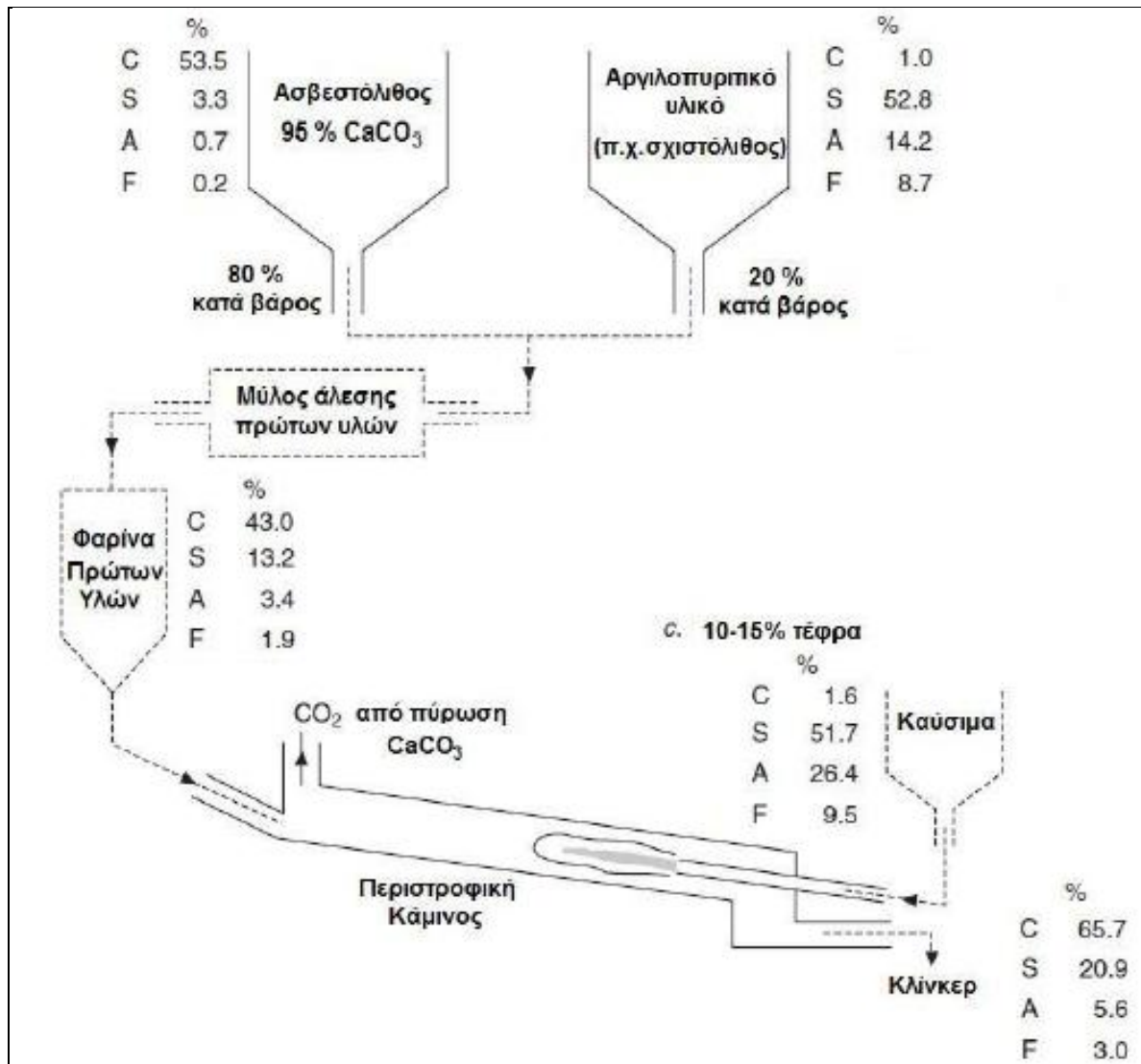
Εικόνα 2: Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων για την παραγωγή 1kg τσιμέντου. [1]

Πίνακας 1.1 Ενδεικτική χημική σύσταση των πρώτων υλών για την παραγωγή τσιμέντου.[2]

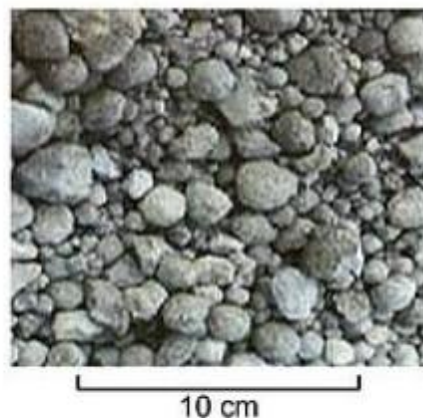
Χημική ένωση	Στόχος, % κ.β. σύνθεση ξηρών πρώτων υλών παραγωγής κλίνκερ	Πρώτες ύλες (ξηρό υλικό), %			Κατά βάρος % περιεκτικότητα του παραγόμενου κλίνκερ (χωρίς ενσωμάτωση της τέφρας του καυσίμου)
		1 Ασβεστόλιθος	2 Αργιλοπυριτικό υλικό	3 Χαλαζιακή άμμος	
SiO ₂	14.35	4.83	65.0	91.58	21.8*
Al ₂ O ₃	4.04	1.85	24.0	2.83	6.1*
Fe ₂ O ₃	0.92	0.64	2.5	2.53	1.4*
CaO	43.55	50.5	4.0	0.92	65.2*
Ελεύθερη άσβεστος (CaO)	-	-	-	-	1.0*
Ποσοστιαία (κατά βάρος) % συμμετοχή πρώτων υλών		85.02	13.61	1.37	*Τιμές για χρήση στις εξισώσεις Bogue

Αναγωγή % στο υπόλοιπο 65.78% του υλικού μετά την κλινκεροποίηση (34.22% CO₂ αντιστοιχεί σε 43.55% CaO)

Το μίγμα των πρώτων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης, κ.α.) αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία και λειοτριβούνται. Το παραγόμενο μίγμα, που λέγεται «φαρίνα» υφίσταται πυρομεταλλουργική κατεργασία μέσα σε περιστροφική κάμινο (rotary kiln). Στην περιστροφική κάμινο, οι αναμεμυγμένες πρώτες ύλες, με χρήση καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή και εναλλακτικά καύσιμα), θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (Εικ. 3). Έτσι, με φυσικοχημικές διεργασίες, μετατρέπονται σε ένα υλικό γκριζοπράσινου χρώματος μορφής σφαιριδίων διαμέτρου 10-25 mm, το οποίο ονομάζεται κλίνκερ τσιμέντου (Εικ. 4).



Εικόνα 3: Αναλογία πρώτων υλών για την παραγωγή κοινού τύπου τσιμέντου [3]



Εικόνα 4: Σφαιρίδια μεγέθους 15-25mm κλίνκερ τσιμέντου. [3]



1.2 Προσδιορισμός της σύνθεσης του φορτίου.

Οι ποσότητες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτώνται από τις χημικές και ορυκτολογικές τους ιδιότητες και από τις ιδιότητες (απαιτήσεις) του κλίνκερ που θα παραχθεί. Μετά τον προσδιορισμό της κατάλληλης σύνθεσης του φορτίου, οι πρώτες ύλες (για ξηρή μέθοδο παραγωγής τσιμέντου) αναμειγνύονται κατάλληλα και ομογενοποιούνται για την παραγωγή ενός ομοιόμορφου μίγματος (φαρίνα) που θα υποστεί ελάττωση μεγέθους (λειτουργία). Στην Εικόνα 3 δίνονται επίσης αναλογίες δεδομένων πρώτων υλών, μέση σύσταση της τροφοδοσίας και προϊόντων παραγωγής κλίνκερ κοινού τσιμέντου, όπου (S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃ και C = CaO). Η καλή ανάμειξη εξασφαλίζει ομοιόμορφη κατανομή των πρώτων υλών στην τροφοδοσία του κυκλώματος θραύσης και λειτουργία και οδηγεί στην παραγωγή κλίνκερ ομοιόμορφης ποιότητας. Οι αναλογίες των πρώτων υλών καθορίζονται με τη βοήθεια δεικτών ποιότητας κλίνκερ και συγκεκριμένα του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο LSF (Lime saturation factor), του πυριτικού δείκτη SR (Silica ratio) και του αργλικού δείκτη AR (Alumina ratio). Οι παραπάνω δείκτες υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις: [1]

- Δείκτης κορεσμού σε άσβεστο (LSF - Lime Saturation Factor):

$$LSF = \frac{1.0(\%CaO) - 0.7(\%SO_3)}{2.8(\%SiO_2) + 1.2(\%Al_2O_3) + 0.65(\%Fe_2O_3)}$$

- Πυριτικός Δείκτης (SR – Silica ratio):

$$SR = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

- Αργλικός Δείκτης (AR – Alumina ratio):

$$AR = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3}$$

1.3 Οι Περιστροφικές Κάμινοι.

Οι περιστροφικές κάμινοι είναι ογκώδεις, κυλινδρικού σχήματος, κεκλιμένες κατασκευές, διαμέτρου 3.5-4.5m και μήκους έως 200 m, επενδεδυμένες εσωτερικά με πυρίμαχη επένδυση (πυρίμαχα τούβλα), μέσα στις οποίες τροφοδοτείται η «φαρίνα». Οι διάφοροι τύποι περιστροφικών καμίνων βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Το μήκος των περιστροφικών καμίνων εξαρτάται από τη μέθοδο κατεργασίας (ξηρή, υγρή, ημι-ξηρή, ημι-υγρή κλπ.) των πρώτων υλών (φαρίνα) και τις πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις, όσον αφορά στην προθέρμανση της φαρίνας και στις διεργασίες πύρωσης του ασβεστολίθου. Κυμαίνεται επίσης κατά περίπτωση από 50-200m, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής. Η ταχύτητα περιστροφής της καμίνου κυμαίνεται από 1-4 στροφές το λεπτό (rpm). Η περιστροφική κάμινο είναι ελαφρώς κεκλιμένη προς την έξοδό της (άκρο αποκένωσης του κλίνκερ), για να ρέει (μετακινείται) το υλικό και να αποκενώνεται από το κατώτερο άκρο το προϊόν της δηλ. το κλίνκερ, (Εικ. 5). Ο χρόνος παραμονής του υλικού μέσα στην κάμινο μπορεί να φτάσει, από



περίπου 20min για καμίους του τύπου προθέρμανσης-προπύρωσης (preheater-precaciner) της φαρίνας μέχρι 2 ώρες για καμίους κατεργασίας «υγρής» φαρίνας (wet kilns). Στις μεθόδους preheater-precaciner, η φαρίνα παραμένει μέσα στον πύργο προθέρμανσης-προπύρωσης από 20-90 s. Οι διάφορες φάσεις (στάδια) κατεργασίας για την παραγωγή κλίνκερ στη διάταξη της καμίου είναι οι εξής (Εικ. 6):

1. Εξάτμιση του ελεύθερου (μη συνδεδεμένου) νερού,
2. Απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού (συνδεδεμένο νερό) κυρίως από τα αργιλικά πετρώματα (πρώτες ύλες),
3. Διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου (CaCO_3),
4. Σχηματισμός των φάσεων του κλίνκερ τσιμέντου
 - ενώσεις πυριτικού ασβεστίου (C_2S (1), $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ και C_3S , $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$),
 - αργιλικού ασβεστίου (C_3A , $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)
 - αργιλοσιδηρούχου ασβεστίου (C_4AF , $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$),
5. Ψύξη του κλίνκερ (clinker).

Στη συνέχεια, για την παραγωγή του κοινού τύπου τσιμέντου (OPC, ordinary Portland cement), ακολουθούνται οι παρακάτω διεργασίες (Εικόνα 7) :

- Ανάμειξη του κλίνκερ (95%) με γύψο (~ 5%) και
- Λεπτομερής λειοτρίβηση (άλεση) => παραγωγή τσιμέντου.

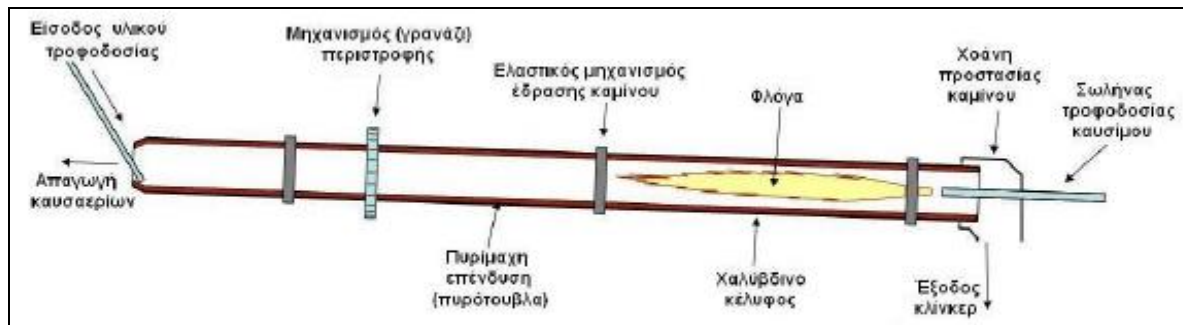
1.3.1 Μέθοδοι Παραγωγής.

Οι διάφορες μέθοδοι και διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν με την πάροδο του χρόνου για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου φαίνονται στην Εικ. 8. Σήμερα, για λόγους μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας και του χρόνου παραμονής του υλικού, η κύρια μέθοδος παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου είναι η ξηρή μέθοδος με προθέρμανση της φαρίνας και μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου (Preheater-precaciner). Πιο αναλυτικά η διαδικασία φαίνεται στην Εικ. 9.

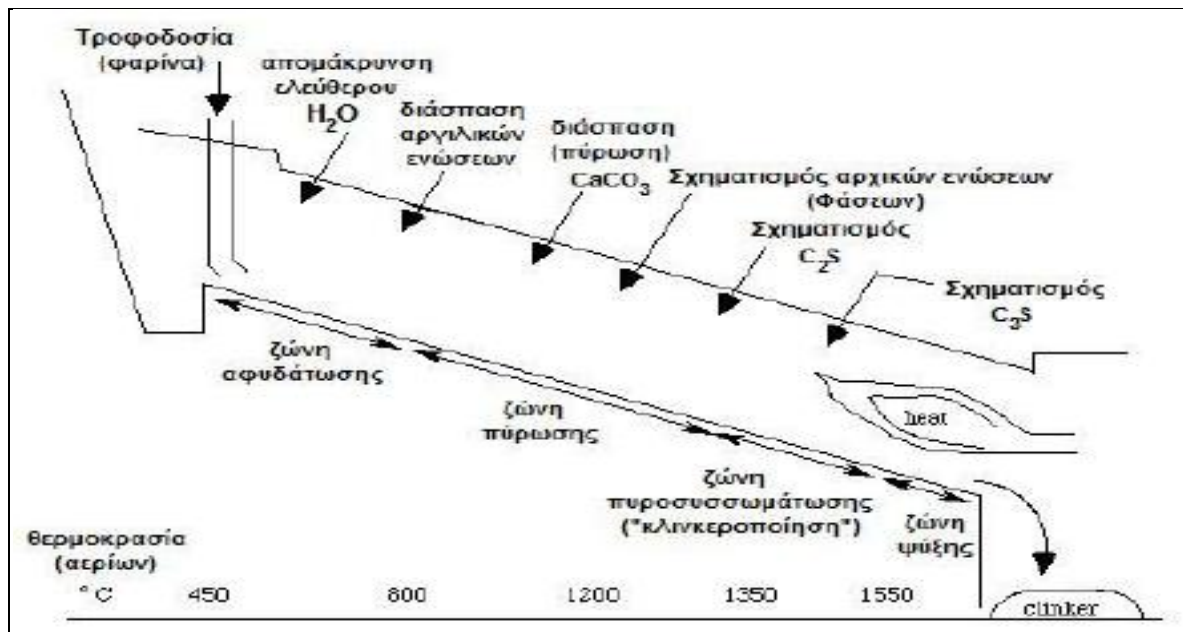
Στα διάφορα στάδια της ξηρής αυτής κατεργασίας γίνονται οι παρακάτω διεργασίες:

- A.** Προθέρμανση της τροφοδοσίας (φαρίνα) και μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου στον πύργο προθέρμανσης και πύρωσης από τα ανερχόμενα θερμά αέρια της καμίου και από τα αέρια ψύξης του κλίνκερ ($900-1000^\circ\text{C}$),
- B.** Σχηματισμός ενδιάμεσων φάσεων από την αντίδραση των πρώτων υλών μεταξύ τους μέσα στην κάμινο ($1000-1200^\circ\text{C}$),
- C.** Πυροσυσσωμάτωση και σχηματισμός σφαιριδίων κλίνκερ ($1200-1450^\circ\text{C}$) μέσα στην κάμινο και κατόπιν ψύξη του κλίνκερ

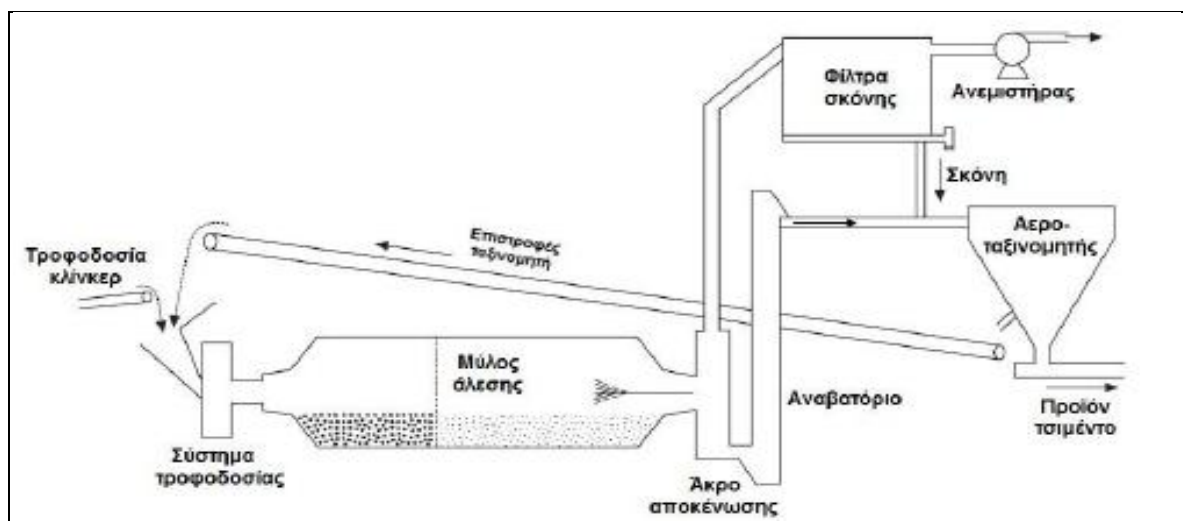
Το αναλυτικό διάγραμμα ροής των διεργασιών παραγωγής τσιμέντου παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.



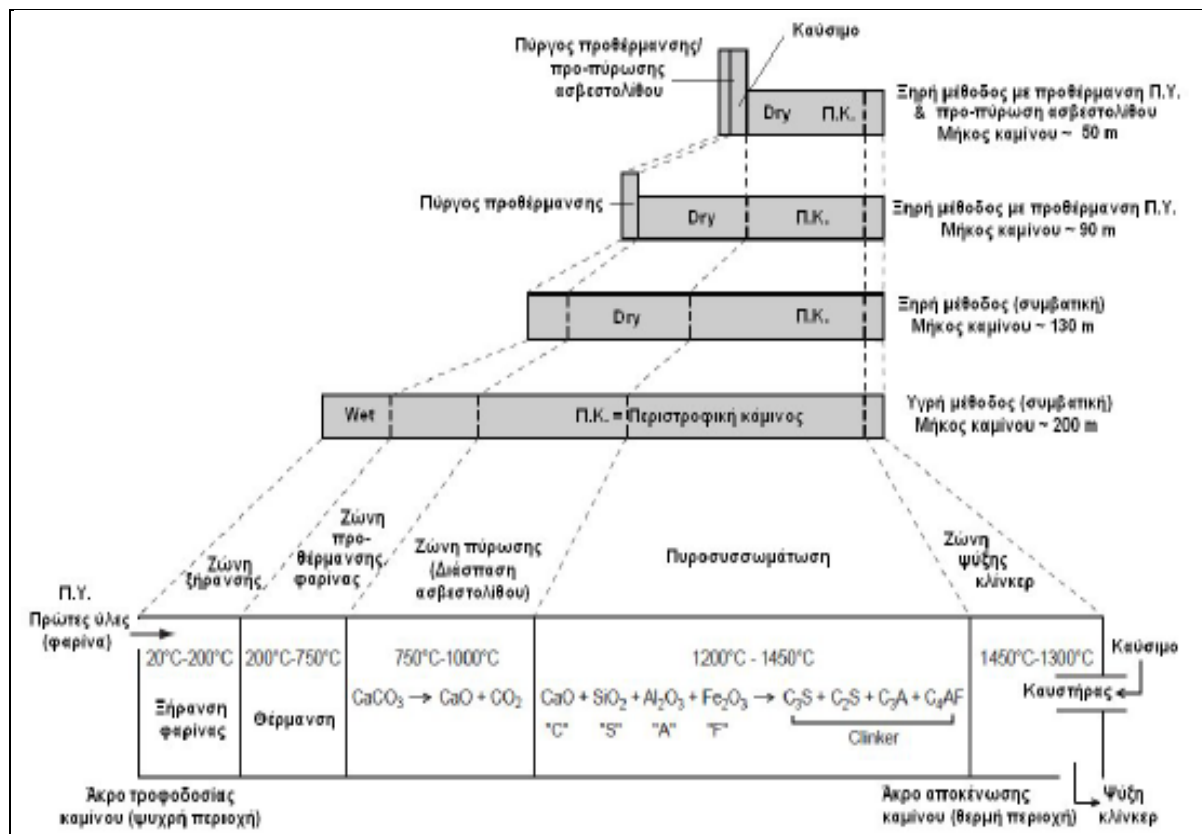
Εικόνα 5: Απλοποιημένη απεικόνιση περιστροφικής καμίνου.[1]



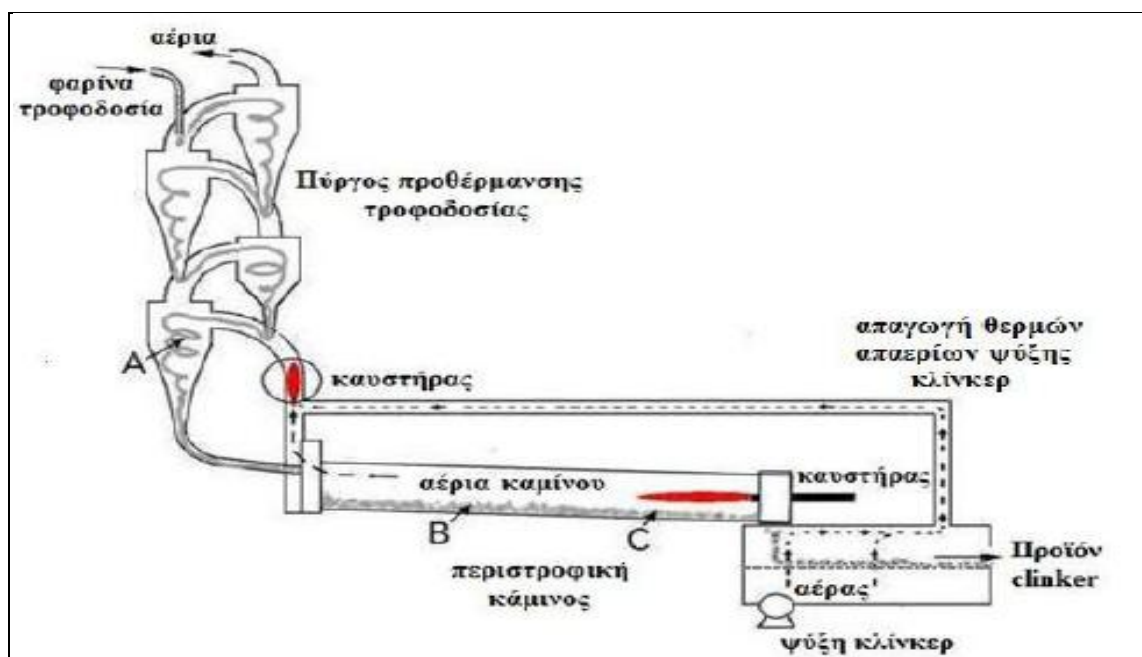
Εικόνα 6: Διεργασίες στη διάταξη της περιστροφικής καμίνου κατά την παραγωγή κλίνκερ. [1]



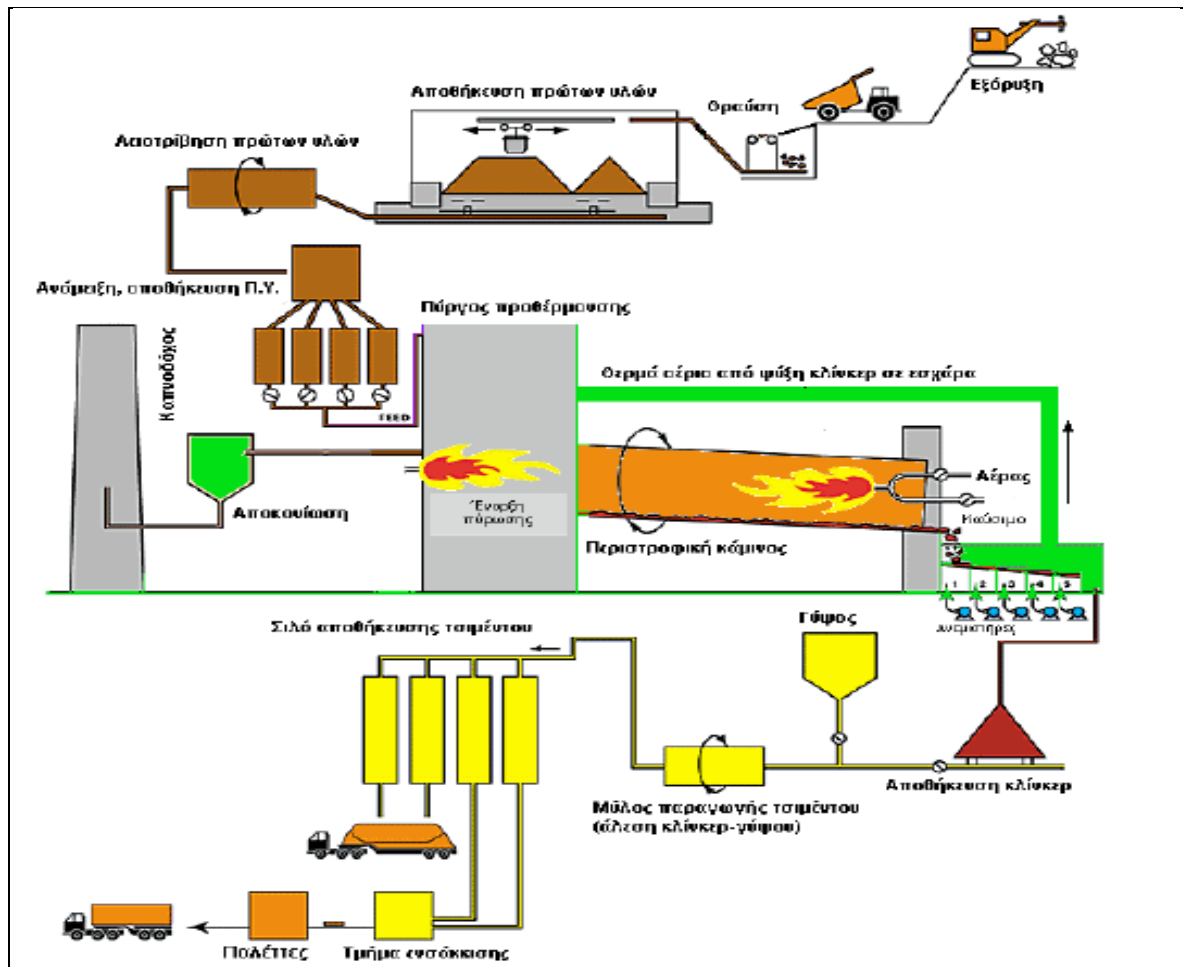
Εικόνα 7: Συμβατικό κύκλωμα λειοτρίβισης (άλεσης) για την παραγωγή τσιμέντου. [1]



Εικόνα 8: Σχέση Μεθόδου παραγωγής κλίνκερ ως προς το μήκος της περιστροφικής καμίνου – Κατανομή των ζωνών κατεργασίας εντός της καμίνου [4].



Εικόνα 9: Διάταξη ξηρής μεθόδου παραγωγής κλίνκερ με προθέρμανση της τροφοδοσίας και πύρωση του ασβεστόλιθου (Preheater/Precalciker). [1]



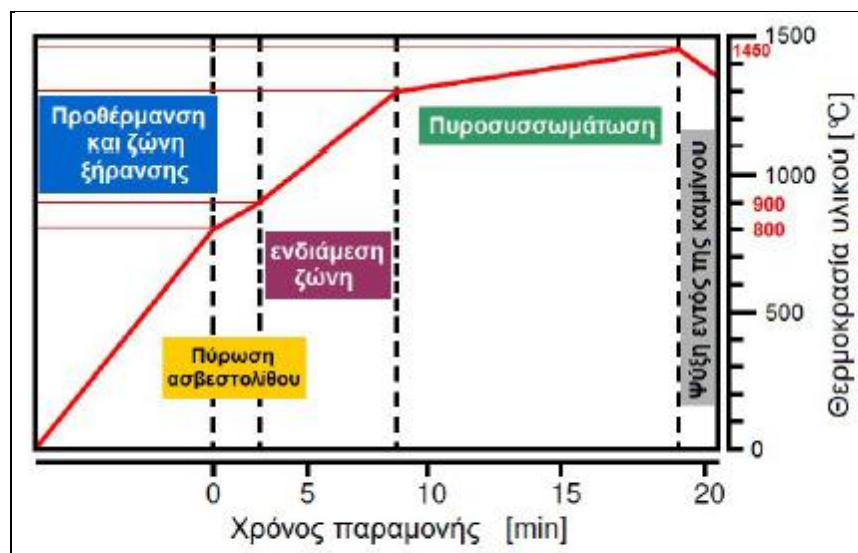
Εικόνα 10: Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου. [1]

Στις καμίνους αυτού του τύπου (preheater-precalsiner), η ξήρανση, η απομάκρυνση του συνδεδεμένου νερού στις πρώτες ύλες, η προθέρμανση στη θερμοκρασία πύρωσης και η μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστόλιθου γίνονται εκτός της περιστροφικής καμίνου στον πύργο προθέρμανσης και προ-πύρωσης (preheater/precalsiner). Εξαρτάται από τον τύπο αυτών καμίνων (preheater ή precalsiner) το ποσοστό % της διεργασίας πύρωσης (διάσπαση) του ασβεστόλιθου που ολοκληρώνεται εκτός της καμίνου. Στις καμίνους τύπου preheater 30-40% της πύρωσης γίνεται εκτός της καμίνου, ενώ στις καμίνους τύπου precalsiner 90-95%, αντιστοίχως. Αυτό τελικά καθορίζει και το μήκος που καταλαμβάνει η ζώνη πύρωσης και η ζώνη πυροσυσσωμάτωσης εντός της καμίνου, το οποίο διαμορφώνεται σε 60% και 35%, αντιστοίχως (Peray, 1986). Στις περιπτώσεις αυτές, είναι απαραίτητο, μέρος (50-65%) του απαιτούμενου καυσίμου της διεργασίας να εισαχθεί στην περιοχή του προασβεστοποιητή του πύργου προθέρμανσης/πύρωσης της τροφοδοσίας με αντίστοιχη μείωση της ποσότητας του εισαγόμενου καυσίμου στην έξοδο της καμίνου. [1, 5]

Το καύσιμο, που εισάγεται στον precalsiner, καίγεται με τη βοήθεια των θερμών αερίων που προέρχονται από την κάμινο ή από την ψύξη του κλίνκερ σε θερμοκρασίες χαμηλότερες και η διεργασία της καύσης έχει μεγάλη απόδοση. Το ομογενοποιημένο υλικό (φαρίνα) κινείται κατά αντιπαράλληλη με τα ανερχόμενα θερμά αέρια και παραμένει λίγα μόνο δευτερόλεπτα (20-90s) στη θερμότερη περιοχή (θερμοκρασία 850-900°C) του precalsiner, η δε διάσπαση του ασβεστόλιθου ολοκληρώνεται σε ποσοστό 90-95% πριν την εισαγωγή της φαρίνας στην περιστροφική κάμινο. Η τέφρα από το καύσιμο ενσωματώνεται ικανοποιητικά



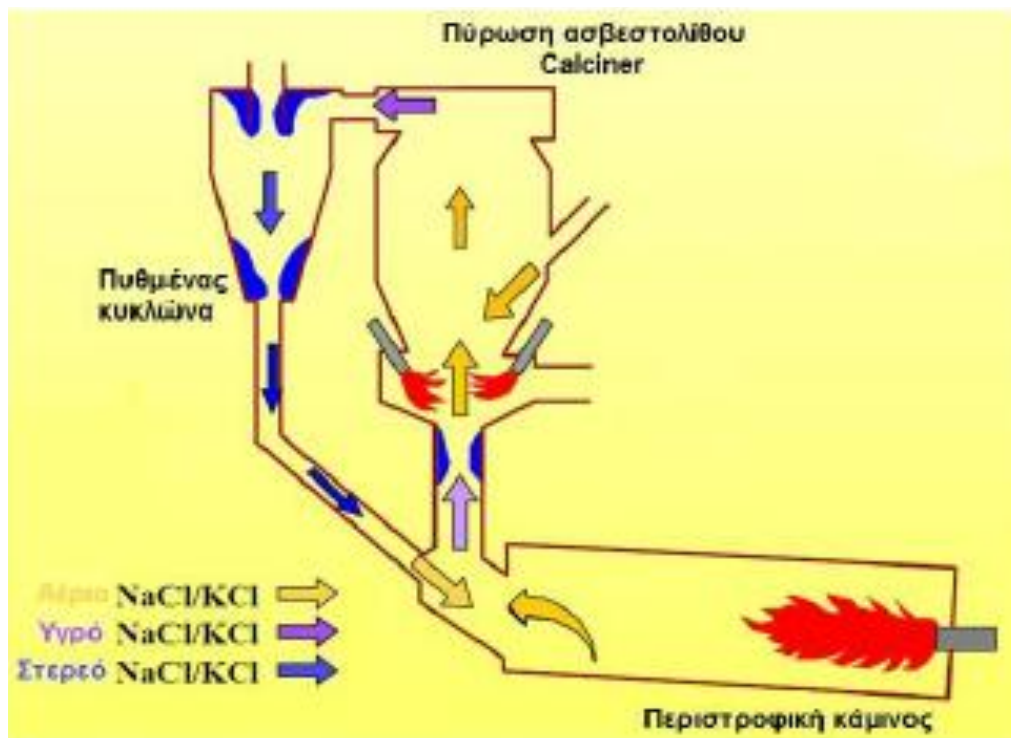
στη φάρινα της τροφοδοσίας και τελικώς στο κλίνκερ. Στις διατάξεις αυτές διοχετεύεται μικρότερη ποσότητα καυσίμων/θερμότητας στην έξοδο της καμίνου, οπότε η προ-διάσπαση (precalcination) του ασβεστολίθου στον πύργο επιτρέπει την ταχύτερη διέλευση του υλικού μέσα από το κυρίως τμήμα της περιστροφικής καμίνου. Έτσι, επιτυγχάνεται μείωση του μήκους και της διαμέτρου της καμίνου όπως επίσης και του χρόνου παραμονής-κατεργασίας του υλικού, μείωση του κόστους επένδυσης και προκαλείται επιμήκυνση του χρόνου ζωής της πυρίμαχης επένδυσης (πυρίμαχα τούβλα). Στην Εικόνα 11 δίνεται η κατανομή του χρόνου και η διακύμανση των θερμοκρασιών στις διάφορες ζώνες εντός της καμίνου.



Εικόνα 11: Θερμοκρασιακή Κατανομή ως προς το χρόνο παραμονής του υλικού σε κάθε περιοχή, κατά την ξηρή μέθοδο παραγωγής κλίνκερ. [1]

Στις καμίνους αυτού του τύπου (preheater-precaciner) επίσης, οι επικαθήσεις-εμφράξεις, που συμβαίνουν από τη μεταφορά (μέσω των θερμών αερίων), την υγραποίηση και τη βαθμιαία στερεοποίηση των πτητικών ενώσεων (κυρίως χλωριούχων ενώσεων αλκαλίων) στις ψυχρότερες περιοχές, δηλαδή στις εσωτερικές επιφάνειες του preheater και precaciner, μειώνονται αντιστοίχως (Εικόνα 13). Επίσης, οι ποσότητες των αερίων NO_x, που παράγονται, είναι μικρότερες λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας καύσης του καυσίμου, ενώ στη διάταξη precaciner είναι δυνατή η καύση καυσίμων υποδεέστερης θερμογόνου δύναμης. Στην Εικόνα 14 δίνεται διάγραμμα ξηρής μεθόδου παραγωγής κλίνκερ μόνο με προθέρμανση (preheating) της φάρινας. Από το σχήμα διαπιστώνονται οι διαφοροποιήσεις ως προς την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή της κατεργασίας φάρινας με ταυτόχρονη προθέρμανση - πύρωση (Preheater/Precaciner) του ασβεστολίθου. Προκύπτει σημαντική μείωση του χρόνου παραμονής της φάρινας στην κάμινο από περίπου 40-45 min σε 20 min μόνο.

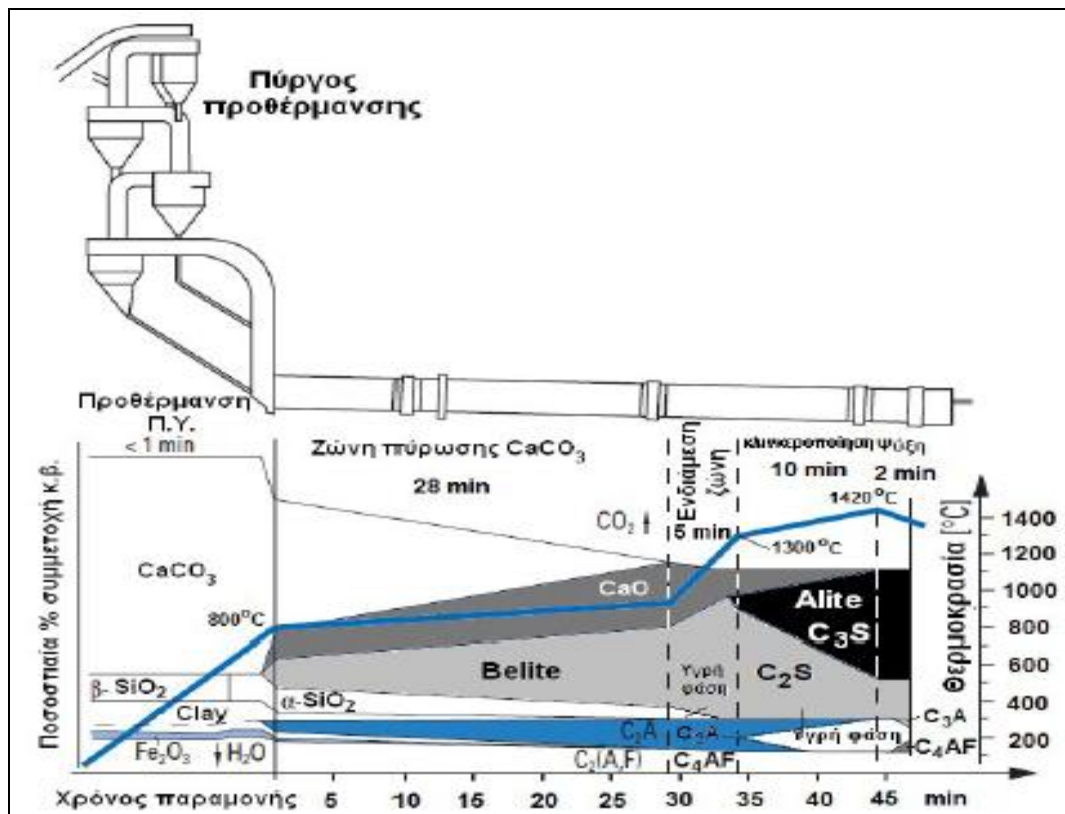
Τελικά, η χρήση σύγχρονων διατάξεων προθέρμανσης/πύρωσης έχει συμβάλει στη μείωση του συνολικού μήκους της όλης διάταξης και ο λόγος μήκος/διάμετρο έχει γίνει εφικτό να κυμαίνεται σήμερα από 14:1 έως και 11:1 με προφανείς θετικές επιπτώσεις στο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης.



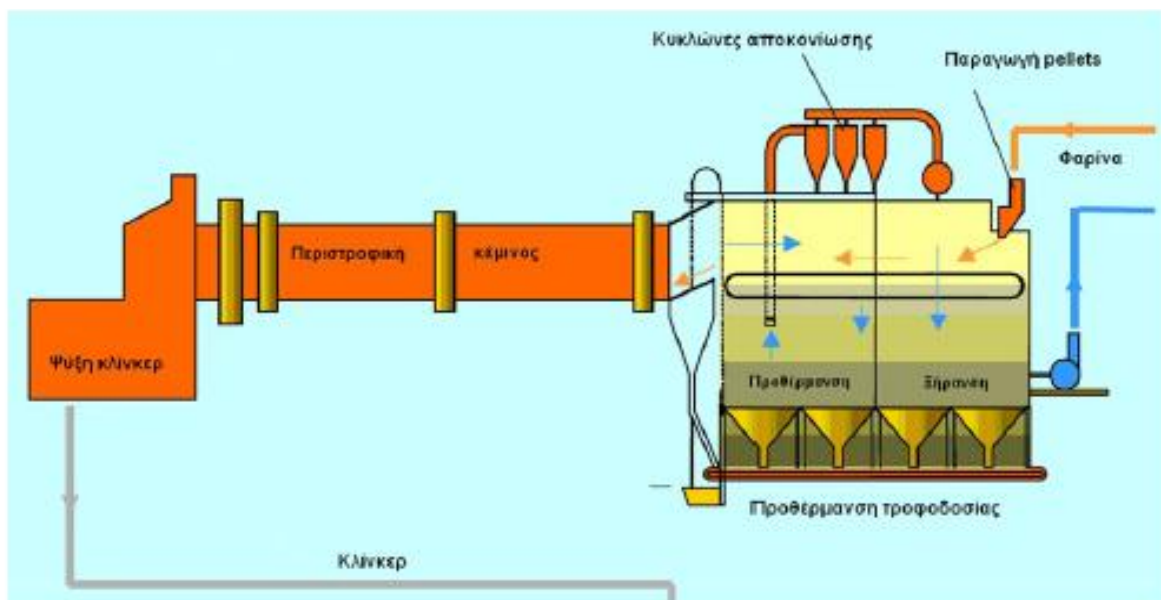
Εικόνα 12: Επικαθίσεις χλωριούχων ενώσεων αλκαλίων στο σύστημα preheater/precalciner [1].

Άλλη μέθοδος παραγωγής είναι η γερμανική ημι-ξηρή (**semi-dry**) ή ημι-υγρή (**semiwet**) μέθοδος **Lepol** (Εικόνα15), όπου εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν πρώτες ύλες με μεγάλο ποσοστό αρχικής υγρασίας, οι λειοτριβημένες εν υγρώ πρώτες ύλες μετατρέπονται πρώτα σε πολφό, κατόπιν υποβάλλονται σε πύκνωση και διήθηση και τα στερεά της διήθησης (**filter cake**) εισάγονται στην περιστροφική κάμινο ή σε άλλες περιπτώσεις υπό μορφή συσφαιρωμάτων (**pellets**), οπότε η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως ημι-ξηρή/ημι-υγρή μέθοδος παραγωγής. Τα συσφαιρώματα προθερμαίνονται σε διάταξη τύπου εσχάρας (**grate preheater**) με τη βοήθεια των αερίων εξαγωγής της περιστροφικής καμίνου και κατόπιν αυτά εισάγονται στην περιστροφική κάμινο.

Είναι προφανές ότι στην κάμινο τύπου Lepol η ξήρανση, η απομάκρυνση του συνδεδεμένου νερού στις πρώτες ύλες, η προθέρμανση στη θερμοκρασία πύρωσης και η μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου γίνονται εκτός της περιστροφικής καμίνου. Μέσα στην περιστροφική κάμινο ολοκληρώνεται η πύρωση του ασβεστόλιθου και επιτελούνται οι αντιδράσεις μετατροπής των πρώτων υλών σε κλίνκερ. Τα παραπάνω δεδομένα επηρεάζουν σημαντικά το μήκος της καμίνου που καταλαμβάνει κάθε ζώνη (Εικόνα 9). Στις καμίνους αυτής της αρχής λειτουργίας, η ζώνη πύρωσης καταλαμβάνει το 55% του μήκους της, ενώ η ζώνη πυροσυσσωμάτωσης το υπόλοιπο 45%. Οι φυσικοχημικές - ορυκτολογικές διεργασίες και μετατροπές, που λαμβάνουν χώρα μέσα στην περιστροφική κάμινο κατά τη διαδικασία προθέρμανσης, πύρωσης και έμψησης της φαρίνας, είναι πολύ σημαντικές και αφορούν σε ξηρή μέθοδο κατεργασίας με προθέρμανση και πύρωση του ασβεστολίθου εντός του πύργου προθέρμανσης (**preheater/precalciner**).



Εικόνα 13: Ξηρή μέθοδος παραγωγής κλίνκερ με προθέρμανση τροφοδοσίας (preheater) – Κατανομή θερμοκρασιών ως προς το χρόνο κατεργασίας του υλικού. [4]



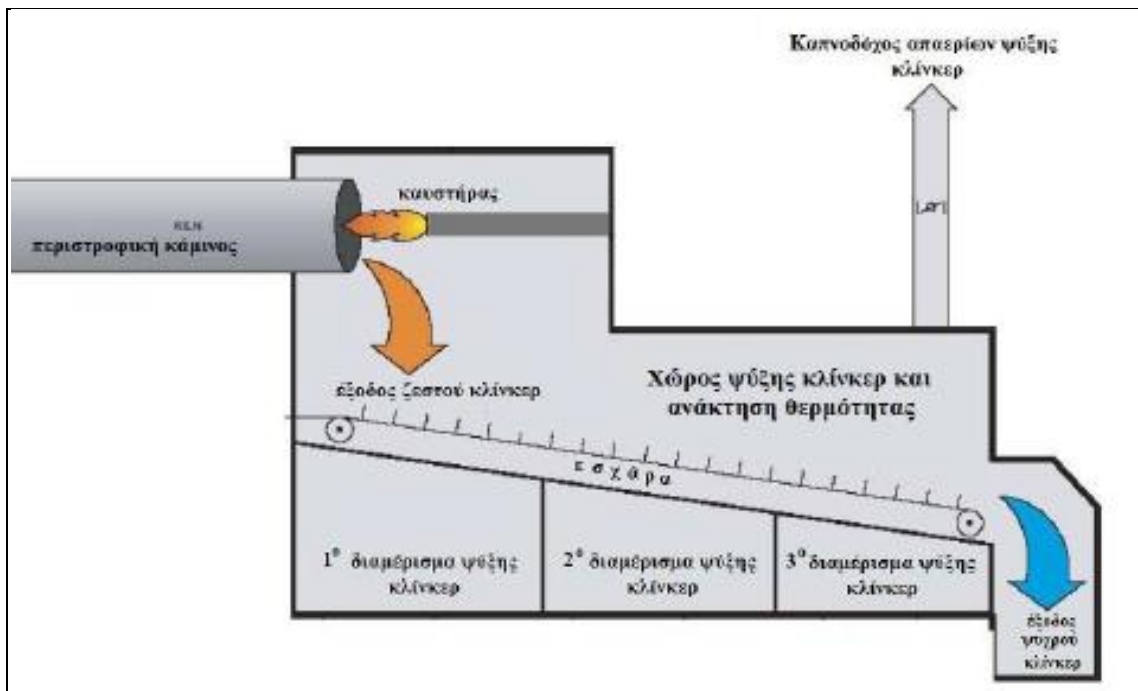
Εικόνα 14: Διάταξη ημι-ξηρής μεθόδου (semi-dry) παραγωγής τσιμέντου [4].



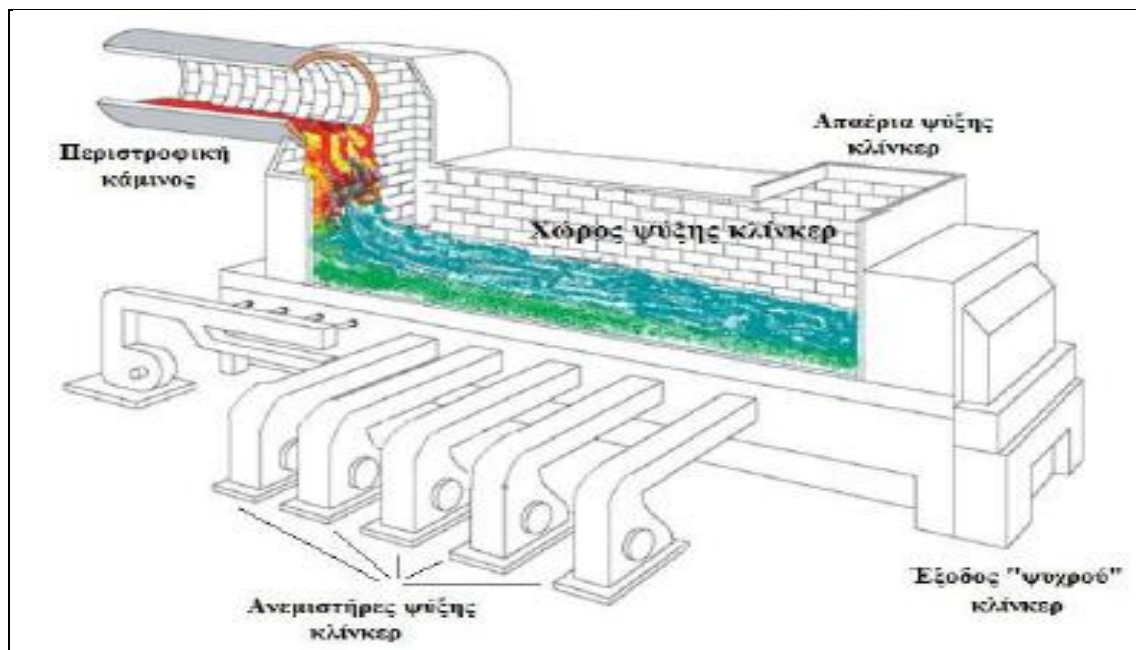
1.3.2 Η ψύξη του κλίνκερ.

Έχει διαπιστωθεί ότι ουσιαστικό ρόλο στην ποιότητα του κλίνκερ και στις ιδιότητες του παραγόμενου τσιμέντου παίζουν οι διεργασίες ψύξης του εξερχόμενου από την κάμινο κλίνκερ. Σημαντικό επίσης οικονομικό όφελος προσφέρει η αξιοποίηση ποσοστού 35% περίπου της απαγόμενης από το κλίνκερ θερμότητας, μέσω του αέρα ψύξης. Η θερμότητα που ανακτάται αξιοποιείται για την προθέρμανση της τροφοδοσίας των πρώτων υλών και για την έναυση του καυσίμου στον ασβεστοποιητή, συμβάλλοντας στην ενεργειακή βελτιστοποίηση της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ.

Οι κύριοι τύποι ψυκτών κλίνκερ είναι τύπου κινούμενης εσχάρας, περιστροφικού ή πλανητικού τύπου. Το κλίνκερ που εξέρχεται από την περιστροφική κάμινο, διέρχεται, με τη βοήθεια κινούμενης διάτρητης εσχάρας, από θάλαμο και ψύχεται με τη βοήθεια αέρα που εμφυσάται από ανεμιστήρες (Εικόνες 15, 16). Με τη βοήθεια του αέρα ψύξης, μέρος της θερμότητας που περιέχει απάγεται από το κλίνκερ και θερμαίνει τον αέρα ψύξης, του οποίου μέρος ανακυκλώνεται και οδηγείται στον πύργο προθέρμανσης για αξιοποίηση της θερμότητάς του. Όπως προαναφέρθηκε, οι ιδιότητες του παραγόμενου κλίνκερ εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την ταχύτητα δηλαδή από το ρυθμό ψύξης του κλίνκερ.



Εικόνα 15: Διάταξη ψύξης του κλίνκερ στην έξοδο της καμίνου.[4]



Εικόνα 16: Τρισδιάστατη απεικόνιση της διάταξης ψύξης του κλίνκερ. [4]

Έχει διαπιστωθεί ότι ταχεία ψύξη του κλίνκερ παράγει μικρούς κρυστάλλους αλίτη, επειδή δεν προλαβαίνουν, λόγω της αυξημένης ταχύτητας, να αναπτυχθούν σε μέγεθος. Επίσης, ο ρυθμός ψύξης έχει σημαντική επίδραση στην κατανομή, στο είδος και την «υγεία» των φάσεων του κλίνκερ, στα ποσοστά ασβέστου (CaO) και μαγνησίας (MgO), που δεσμεύονται στην υγρή φάση ή παραμένουν υπό μορφή ελεύθερης ασβέστου (CaO_{free}) και περίκλαστου (MgO) στο κλίνκερ και ως εκ τούτου εμφανίζονται αργότερα μετά την άλεση στο τσιμέντο.

Είναι γνωστό επίσης ότι, σε υψηλές θερμοκρασίες κλινκεροποίησης ($>1500^\circ\text{C}$), η μαγνησία (MgO) συγκεντρώνεται στην υγρή φάση μαζί με τις αλουμινούχες (C_3A) και φερριτικές (C_4AF) φάσεις. Σε συνθήκες λοιπόν ταχείας ψύξης, το MgO δεν προλαβαίνει να κρυσταλλωθεί και να αποβληθεί από το διάλυμα της υγρής φάσης και ενσωματώνεται σε αυτό. Έτσι, μικρή μόνο ποσότητα κρυστάλλων υπό μορφή περίκλαστου (MgO) εμφανίζεται στο κλίνκερ. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες αργής ψύξης του κλίνκερ, λαμβάνει χώρα σχεδόν ολοκληρωτική κρυστάλλωση των φάσεων C_3A και C_4AF σε μορφή χονδρών κόκκων, η οποία ακολουθείται από κρυστάλλωση και του MgO σε μορφή περίκλαστου. Στην περίπτωση αυτή, μόνο περίπου το 1.5% κ.β. της περιεχόμενης ποσότητας μαγνησίας παραμένει στο στερεοποιημένο διάλυμα, ενώ το υπόλοιπο κρυσταλλώνεται σε μορφή περίκλαστου στο κλίνκερ και κατά συνέπεια εμφανίζεται και στο παραγόμενο τσιμέντο, όπου και προκαλεί τα ανεπιθύμητα φαινόμενα διόγκωσης κατά την ενυδάτωση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες στο σκυρόδεμα, όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Αυτό εξηγεί και την απαίτηση για περιεκτικότητα MgO στη φαρίνα μικρότερη από 6%, επειδή σε συνήθεις θερμοκρασίες κλινκεροποίησης $<1450^\circ\text{C}$, η υπάρχουσα μαγνησία στην τροφοδοσία, λόγω υψηλού σημείου τήξης, δεν οδηγείται στην υγρή φάση, οπότε και εμφανίζεται υπό μορφή μικρών κρυστάλλων περίκλαστου στο κλίνκερ, ανεξάρτητα από την ταχύτητα ψύξης του κλίνκερ.

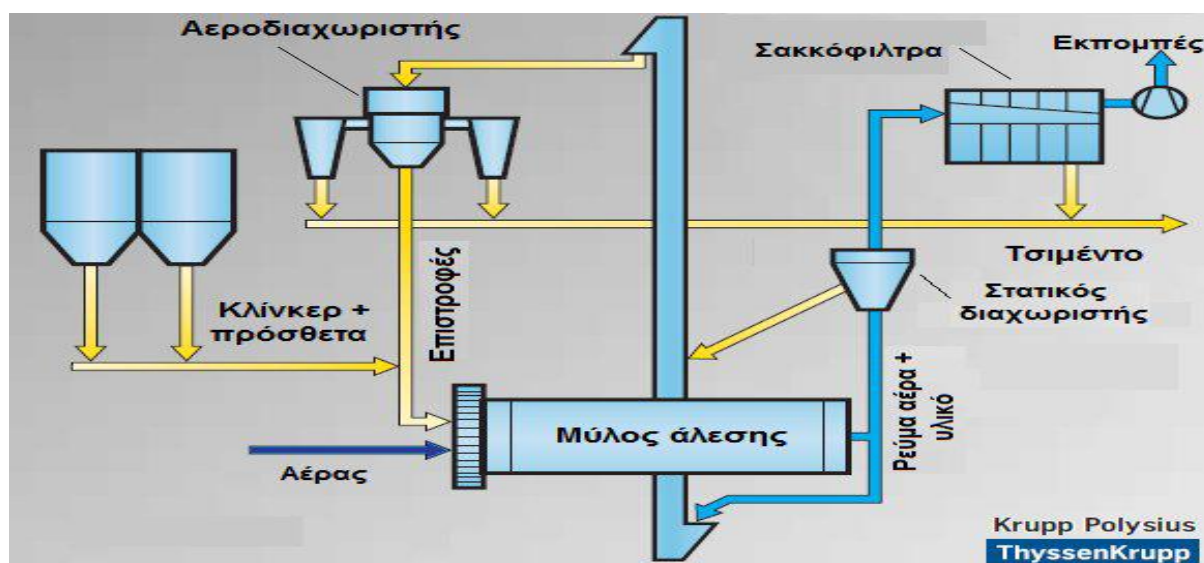


1.3.3 Η άλεση του κλίνκερ.

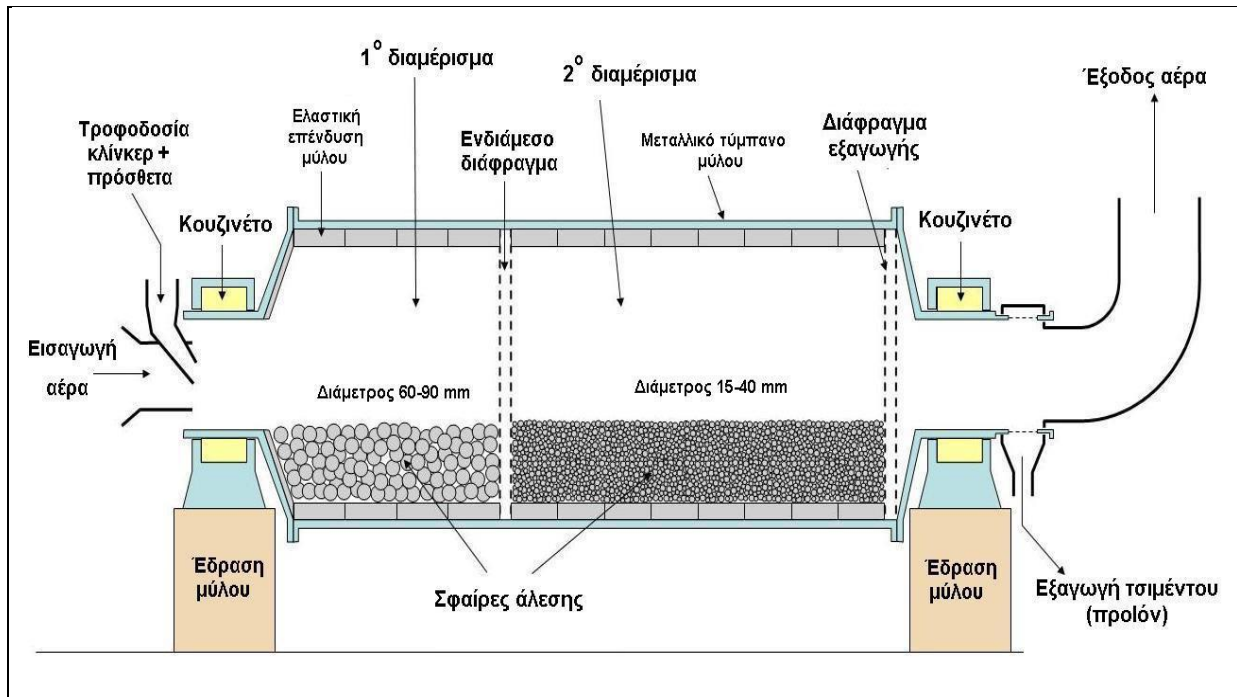
Οι ιδιότητες του τσιμέντου, όσο και η συμπεριφορά κατά τη χρήση του στην παραγωγή σκυροδέματος, εξαρτώνται, εκτός των άλλων σημαντικά και από τη λεπτότητά του δηλαδή από την κοκκομετρική του ανάλυση. Η λεπτότητα του τσιμέντου εκφράζεται από την τιμή του δείκτη Blaine, που δίνεται σε μονάδες cm^2/g ή m^2/kg και κυμαίνεται από 2800-6000 cm^2/g , ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται. Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται στην παραγωγή τσιμέντου κυμαίνεται από 100-110 kWh/tonne τσιμέντου. Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, το 63.7% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στην παραγωγή τσιμέντου αφορά στις διεργασίες θραύσης, λειοτρίβησης και ξήρανσης των πρώτων υλών και επίσης στην άλεση του κλίνκερ και της γύψου. Επίσης είναι γνωστό ότι η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τη λειοτρίβηση και την άλεση έχει σχέση με το μέγεθος της τροφοδοσίας (διαστάσεις των τεμαχίων κλίνκερ), με το μέγεθος του προϊόντος, με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού (σκληρότητα, δείκτης έργου, πυκνότητα), τα χαρακτηριστικά του μύλου (διαστάσεις, σχέση μήκους προς διάμετρο) και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του (συντελεστής πλήρωσης, σύνθεση του φορτίου). Είναι επίσης γνωστό ότι η ειδική επιφάνεια του τσιμέντου (λεπτότητα) εξαρτάται από το μέγεθος των τεμαχίων του προϊόντος.

Για την άλεση των πρώτων υλών, του κλίνκερ και των πρόσθετων (γύψου, σκωρίας υψικαμίνων, ποζολάνης, ιπτάμενης τέφρας κλπ.), χρησιμοποιούνται σφαιρόμυλοι λειοτρίβησης (άλεσης), κατακόρυφοι μύλοι κυλίνδρων μεγάλης απόδοσης ή συνδυασμοί κυλινδρόπρεσσας και σφαιρόμυλων για τη μείωση του κόστους, την αύξηση της δυναμικότητας της διάταξης και την αύξηση της λεπτότητας του προϊόντος. Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας διαπιστώνεται η ευρύτατη εφαρμογή που έχουν βρεί οι κατακόρυφοι μύλοι στην αρχική άλεση των πρώτων υλών (παραγωγή φαρίνας) και των σκωριών, ενώ οι συμβατικοί σφαιρόμυλοι διατηρούν ακόμη κυρίαρχη θέση στην άλεση του κλίνκερ για παραγωγή τσιμέντου.

Μια πιο ενδελεχής μελέτη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας μονάδας τσιμεντοβιομηχανίας θεωρείται εκτός του σκοπού της παρούσας εργασίας οπότε και δεν γίνεται μεγαλύτερη εμβάθυνση επί του συγκεκριμένου αντικείμενου. Θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο όμως μιας επόμενης εργασίας επί της παραγωγικής διαδικασίας μιας μονάδας τσιμεντοβιομηχανίας.



Εικόνα 17: Το συμβατικό κύκλωμα άλεσης κλίνκερ και πρόσθετων (γύψου, σκωρίας κλπ).[1]



Εικόνα 18: Περιγραφή τμημάτων μύλου άλεσης του κλίνκερ. [5]

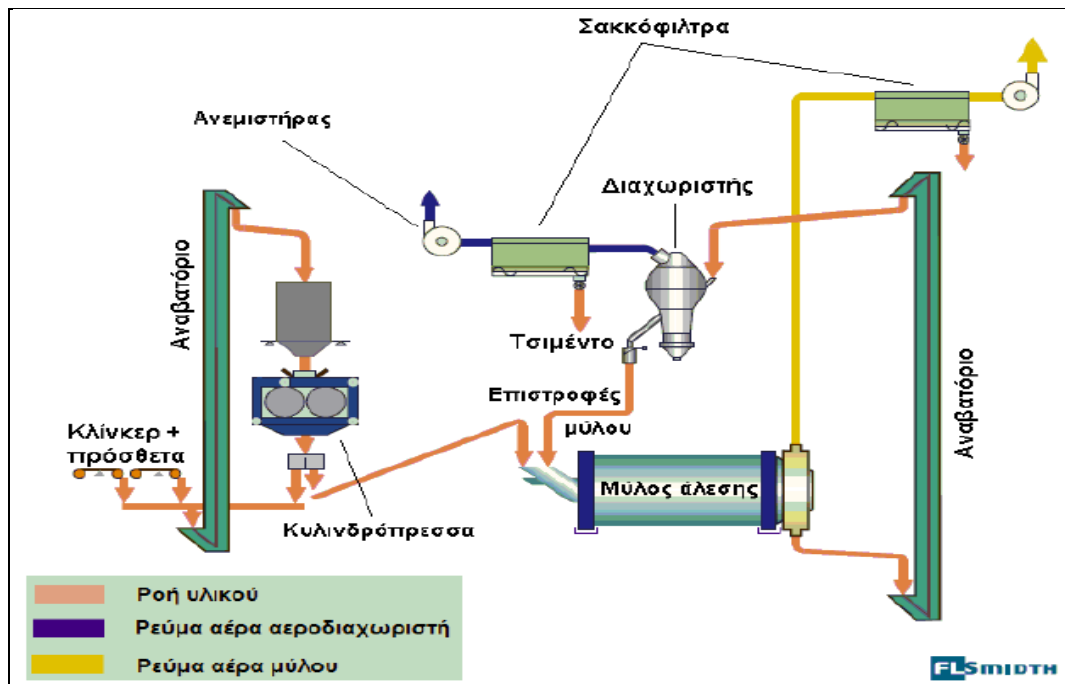
Το κύκλωμα άλεσης αποτελείται από το μύλο άλεσης, που είναι σφαιρόμυλος δύο ή περισσότερων διαμερισμάτων στον οποίο διεξάγεται η άλεση. Κάθε διαμέρισμα έχει σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων, οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος των συσφαιρωμάτων κλίνκερ με τα οποία τροφοδοτείται ο μύλος. Οι σφαίρες του πρώτου διαμερίσματος έχουν διαμέτρους που κυμαίνονται από 60-90 mm, ενώ του δεύτερου από 15-40 mm. Στο δεύτερο διαμέρισμα, ανάλογα με το επιθυμητό μέγεθος προϊόντος (λεπτότητα Blaine), μπορεί να προστεθούν και σφαίρες διαμέτρου μέχρι 5 mm, όταν απαιτείται μεγάλη λεπτότητα προϊόντος. Η διάταξη συμπληρώνεται με στατικούς διαχωριστές και αεροδιαχωριστές για ταξινόμηση και έλεγχο του μεγέθους του προϊόντος και με σακκόφιλτρα ή ηλεκτροστατικούς διαχωριστές για τον περιορισμό των στερεών εκπομπών (λεπτομερών τεμαχιδίων) στην ατμόσφαιρα. Στο μύλο διοχετεύεται ρεύμα αέρα που απάγει την υγρασία για αποφυγή της συσσωμάτωσης και της πρώιμης ενυδάτωσης του λεπτομερούς υλικού (τσιμέντο).

Όπως προαναφέρθηκε, με στόχο τη μείωση του κόστους άλεσης (που επηρεάζει σημαντικά το κόστος παραγωγής του τσιμέντου), την αύξηση της δυναμικότητας και τον καλύτερο έλεγχο του προϊόντος από πλευράς κατανομής μεγεθών τεμαχίων, χρησιμοποιούνται σήμερα, συνδυασμοί διαφορετικών μηχανημάτων ελάττωσης μεγέθους και άλεσης του κλίνκερ για παραγωγή τσιμέντου.

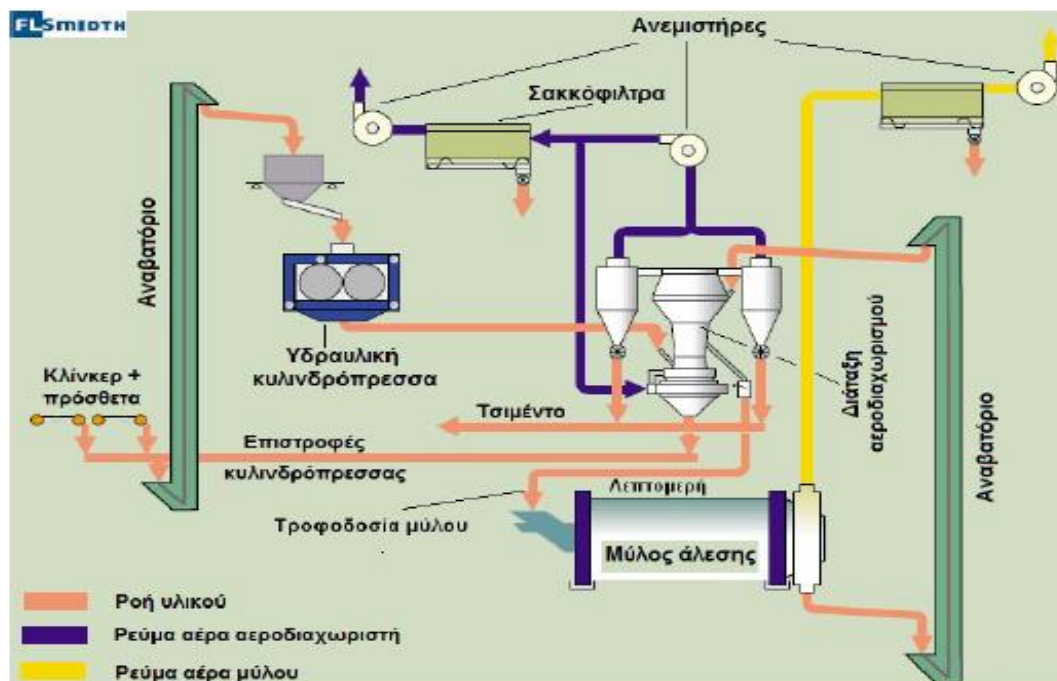
Τα εναλλακτικά μηχανήματα που χρησιμοποιούνται είναι κυλινδρόπρεσες για την αρχική ελάττωση μεγέθους (πρώτο στάδιο ελάττωσης) σε συνδυασμό με σφαιρόμυλους για την τελική άλεση ή αποκλειστικά κατακόρυφοι μύλοι άλεσης (Vertical roller mills). Στη διάταξη προκαταρκτικής άλεσης (pregrinding) του κλίνκερ με κυλινδρόπρεσσα (Roller press), η αρχική τροφοδοσία (κλίνκερ και πρόσθετα) υφίστανται χονδρομερή άλεση στην κυλινδρόπρεσσα και η τελική άλεση προς παραγωγή τσιμέντου γίνεται σε συμβατικό κλειστό κύκλωμα σφαιρόμυλου-ταξινόμητη (Εικ.19). Στη διάταξη ημιτελικής άλεσης (semi-finish grinding), η κυλινδρόπρεσσα λειτουργεί σε κλειστό κύκλωμα με σύστημα ταξινόμησης και «απο-συσσωμάτωσης» τεμαχιδίων. Τα πιο χονδρά τεμάχια από το διαχωρισμό οδηγούνται για τελική άλεση, στην επιθυμητή λεπτότητα, σε σφαιρόμυλο μονού διαμερίσματος, ο οποίος τελικώς



λειτουργεί σε κλειστό κύκλωμα με διαχωριστή μεγάλης απόδοσης δύο σταδίων (Εικ.20) προκαταρκτικής άλεσης (pregrinding) του κλίνκερ με κυλινδροπρέσσα (Roller press) και τελική άλεση σε σφαιρόμυλο (FLSmidth).



Εικόνα 19: Διάταξη προκαταρκτικής άλεσης (pregrinding) του κλίνκερ με κυλινδροπρέσσα (Roller press) και τελική άλεση σε σφαιρόμυλο (FLSmidth).



Εικόνα 20: Διάταξη ημιτελικής άλεσης (semi – finish grinding) του κλίνκερ με κυλινδροπρέσσα (Roller press) και τελική άλεση σε σφαιρόμυλο (FLSmidth).



2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ

Γενικά, στη τσιμεντοβιομηχανία από την εξόρυξη μέχρι και την εξαγωγή του τσιμέντου το προϊόν δέχεται μεταβολές και μεταφέρεται σε μορφή σκόνης. Η δημιουργία σκόνης είναι αναπόφευκτη σε όλες τις διαδικασίες της παραγωγής τσιμέντου. Για να εμποδιστεί η διαφυγή της σκόνης στο περιβάλλον λειτουργούν οι διάφορες εγκαταστάσεις της τσιμεντοβιομηχανίας σε υποπίεση, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα τη διακίνηση μεγάλων ποσοτήτων αέρα ή και άλλων αερίων. Όλες αυτές οι ποσότητες αέρα ή αερίων καθαρίζονται με διατάξεις αποκονιώσεως. Κύριος σκοπός του καθαρισμού του αέρα πριν αυτός βγει στην ατμόσφαιρα είναι:

- το ότι η σκόνη επιστρέφει στην παραγωγική διαδικασία για πάρα πέρα χρήση και
- το ότι στις περισσότερες χώρες τα επιτρεπτά όρια των εκπομπών σκόνης στην ατμόσφαιρα είναι αυστηρά.

Από τα πλέον απαραίτητα στοιχεία για τη μελέτη μιας εγκατάστασης αποκονίωσης είναι η παρεχόμενη σκόνη του αέρα αλλά και η απαιτούμενη ποσότητα του αέρα. Αυτά τα στοιχεία αποκτούνται σε σημαντικό βαθμό από την εμπειρία στη τσιμεντοβιομηχανία. Η ποσότητα σκόνης που δημιουργείται στις διάφορες διαδικασίες δίνεται στον Ευρωπαϊκό χώρο σε g/Nm^3 αέρα. Η ποσότητα αέρα ή αερίων που πρέπει να απορροφηθούν από τις διάφορες πηγές ρύπανσης για να αποκονιωθούν δίνεται σε m^3/min .

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκφράσεως των προδιαγραφών για την προστασία του περιβάλλοντος. Ο πλέον διαδεδομένος είναι αυτός που εκφράζεται σε mg/Nm^3 των εκπεμπομένων αερίων. Για την Ελλάδα σύμφωνα με το τελευταίο Π. Δ. 1180 της 6/ 10/1981 τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών είναι $150 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ για τις παλαιές εγκαταστάσεις και $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ για τις νέες (μετά την ισχύ του παραπάνω Π.Δ). Επίσης πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι επειδή σε μία τσιμεντοβιομηχανία η κυριότερη πηγή ρύπανσης είναι ο περιστροφικός κλίβανος, απαιτεί και την περισσότερη επιτήρηση για εφαρμογή των προδιαγραφών. Σε αντίθεση λοιπόν με τις άλλες εκπομπές (μύλων, θραυστήρων, κλπ.) οι εκπομπές των περιστροφικών κλιβάνων ελέγχονται με όργανα συνεχούς μετρήσεως περιεκτικότητας σε σκόνη των καυσαερίων επί 24ώρου βάσεως και συγχρόνως καταγράφονται για να υπάρχουν στο αρχείο κάθε βιομηχανίας. Στη τσιμεντοβιομηχανία παρατηρούνται κυρίως τα ακόλουθα είδη σκόνης. Με εξαίρεση τη σκόνη του κλιβάνου όλες οι υπόλοιπες σκόνες που αναφέρονται παρακάτω έχουν την ίδια χημική σύσταση με αυτή του αρχικού υλικού:

- σκόνη πρώτων υλών (π.χ. σκόνη από ασβεστόλιθο, μάργες, αργιλόχωμα, σκουριά,
- σκόνη φαρίνας,
- σκόνη άνθρακα,
- σκόνη κλιβάνου,
- σκόνη κλίνκερ,
- σκόνη γύψου,
- σκόνη τσιμέντου.



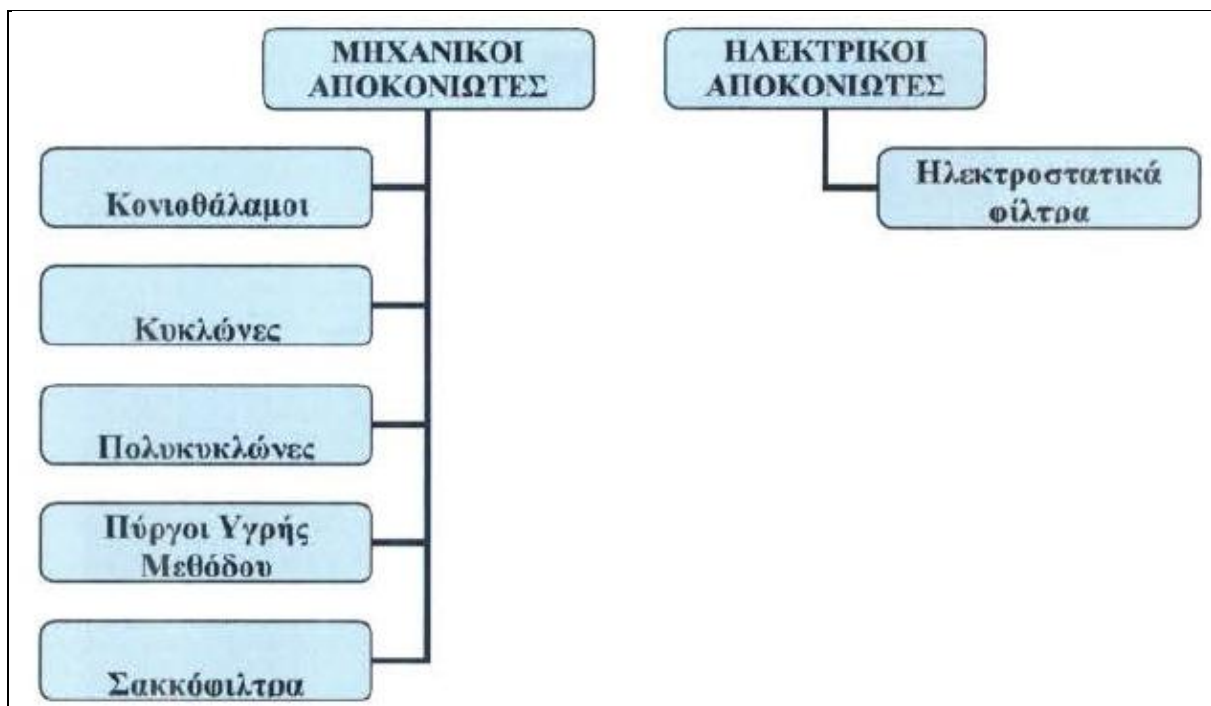
2.1 Ορισμός Αποκονίωσης – Είδη Αποκονιωτών.

Η διαδικασία της αποκονίωσης είναι εκείνο το κεφάλαιο της τεχνολογίας που ασχολείται με τη συγκράτηση της σκόνης, που υπάρχει στα αέρια, που δημιουργούνται στις διάφορες διεργασίες στη βιομηχανία γενικότερα και στη τσιμεντοβιομηχανία ειδικότερα. Η διαδικασία της αποκονίωσης έχει διπλή κυρίως σκοπιμότητα και γίνεται:

- για λόγους περιβαλλοντικούς (δηλαδή, γίνεται για την απαλλαγή του περιβάλλοντος από τη σκόνη) και
- για λειτουργικούς και οικονομικούς λόγους.

Τα διάφορα μέσα που χρησιμοποιούνται για την κατακράτηση της σκόνης αποκαλούνται αποκονιωτές. Οι αποκονιωτές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες (μηχανικούς – ηλεκτρικούς) όπως φαίνεται στην Εικ.21. Στη τσιμεντοβιομηχανία γενικότερα χρησιμοποιούνται σχεδόν όλες οι κατηγορίες **μηχανικών** και **ηλεκτρικών** αποκονιωτών.

- ✓ στους **μηχανικούς** αποκονιωτές, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην εκμετάλλευση όλων των χαρακτηριστικών της σκόνης (π.χ. το βάρος, το μέγεθος, το σχήμα, η υγροσκοπικότητα, κτλ.). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κωνιοθάλαμοι (θαλαμοί κατακαθίσεως), οι κυκλώνες (φυγοκεντρικοί αποκονιωτές), οι πολυκυκλώνες, οι πύργοι υγρής μεθόδου και τα σακκόφιλτρα,
- ✓ στους **ηλεκτρικούς** αποκονιωτές, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στην ηλεκτρική φόρτιση που μπορεί να δημιουργηθεί πάνω στα σωματίδια της σκόνης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (electrostatic precipitators)



Εικόνα 21: Κατηγορίες αποκονιωτών [1]



Κατά μια διαφορετική κατηγοριοποίηση οι τέσσερις βασικοί τύποι εμπορικά διαθέσιμοι εξοπλισμοί για την απομάκρυνση σωματιδιακής ύλης είναι [5]:

- οι μηχανικοί συλλέκτες,
- οι εκπλυτές, ή υγροί συλλέκτες, ή πλυντρίδες ή απλώς υγρά φίλτρα,
- τα υφασμάτινα φίλτρα ή σακόφιλτρα,
- οι ηλεκτροστατικοί συλλέκτες ή ηλεκτροστατικά φίλτρα.

2.2 Μηχανικοί συλλέκτες - αποκονιωτές.

Η λειτουργία των μηχανικών συλλεκτών βασίζεται στην ιδιότητα του ειδικού βάρους της σωματιδιακής ύλης η οποία στις βιομηχανικές εκπομπές είναι τυπικά μία με δύο χιλιάδες φορές μεγαλύτερο του ειδικού βάρους του αερίου που το εμπεριέχει. Οι μηχανικοί συλλέκτες διαχωρίζουν τη βαριά σωματιδιακή ύλη από το ελαφρύτερο αέριο λόγω της διαφοράς αυτής στο ειδικό βάρος. Οι βασικοί τύποι μηχανικών συλλεκτών που βρίσκονται διαθέσιμοι στο εμπόριο είναι:

1. Οι **βαρυτικοί** συλλέκτες καθίζησης, στους οποίους η καθίζηση επιτυγχάνεται απλά και μόνο λόγω της βαρύτητας (κονιοθάλαμοι),
2. Οι συλλέκτες **εκτροπής** με ανακυκλοφορία, στους οποίους γίνεται εκμετάλλευση της υψηλότερης τιμής φυγόκεντρης δύναμης των βαρύτερων σωματιδίων κατά την εκτροπή της ροής της εκπομπής,
3. Οι **κυκλώνες** υψηλής απόδοσης, οι οποίοι επίσης εκμεταλλεύονται τη φυγόκεντρο δύναμη που δέχονται τα σωματίδια σε μία εκτεταμένη κυκλική διαδρομή στην οποία υποχρεώνεται να διέλθει η εκπομπή.

Οι **μηχανικοί** αποκονιωτές όπως **κυκλώνες** και **κονιοθάλαμοι** παλαιότερα χρησιμοποιούνταν ως κανονικοί αποκονιωτές, σήμερα χρησιμοποιούνται ως προαποκονιωτές ή παίρνουν μέρος στην παραγωγική διαδικασία. Οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται σήμερα κυρίως για λειτουργικούς σκοπούς. Οι κανονισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος έχουν καθιερώσει το **σακκόφιλτρο** στην κατηγορία των μηχανικών αποκονιωτών και τα **ηλεκτρόφιλτρα** στους ηλεκτρικούς αποκονιωτές. Οι αποκονιωτές κρίνονται σύμφωνα με το βαθμό αποδόσεως. Σημαντικό στοιχείο δηλαδή, για την εκλογή του αποκονιωτή είναι η καθαρότητα που πρέπει να έχει ο αέρας όταν βγαίνει από τον συγκεκριμένο τύπο αποκονιωτή.

Η σχέση σε βάρος σκόνης, που κράτησε ο αποκονιωτής με το βάρος σκόνης που μπαίνει στον αποκονιωτή αποκαλείται «βαθμός απόδοσης» ή «βαθμός κατακράτησης» του αποκονιωτή και εκφράζεται με τη σχέση :

$$\text{«Βαθμός απόδοσης»}(\%) = \frac{\text{Βάρος σκόνης κατακράτησης}}{\text{Βάρος σκόνης εισόδου}}$$

Για παράδειγμα, εάν από τα 100 gr σκόνης που εισέρχονται στον αποκονιωτή κατακρατούνται τα 95gr τότε ο βαθμός αποδόσεως του αποκονιωτή είναι 95%. Η πτώση (αντίσταση ή απώλεια) πίεσεως των αποκονιωτών μετράται σε mm στήλης ύδατος (mm H₂O). Στα επόμενα, θα γίνει ανάλυση του κάθε τύπου αποκονιωτή χωριστά με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. .



Εικόνα 22: Ολοκληρωμένο σύστημα αποκονίωσης εργοστασίου [7].



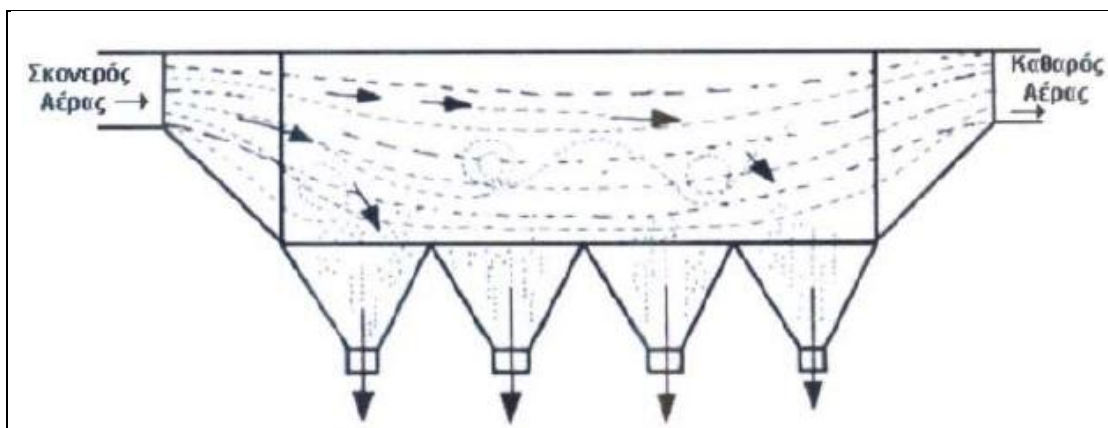
3 ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΕΣ

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι μηχανικοί αποκονιωτές βασίζονται στην εκμετάλλευση όλων των χαρακτηριστικών της σκόνης (π.χ. το βάρος, το μέγεθος, το σχήμα, η υγροσκοπικότητα, κτλ.). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι βαρυτικοί συλλέκτες - κονιοθάλαμοι (θάλαμοι κατακάθισης), οι κυκλώνες (φυγοκεντρικοί αποκονιωτές), οι πολυκυκλώνες, οι πύργοι υγρής μεθόδου και τα σακκόφιλτρα.

3.1 Κονιοθάλαμοι- Βαρυτικοί Συλλέκτες .

Κονιοθάλαμος είναι ένας θάλαμος μεγάλων διαστάσεων, στον οποίο κατακάθεται η σκόνη. Πριν από τον κονιοθάλαμο υπάρχει ένας αγωγός εισόδου μέσα από τον οποίο περνάει ο προς αποκονίωση αέρας. Στον αγωγό εισόδου ο αέρας έχει τέτοια ταχύτητα που είναι ικανή να παρασύρει την σκόνη. Εισερχόμενος ο ακάθαρτος αέρας στον κονιοθάλαμο μειώνει την αρχική του ταχύτητα, με αποτέλεσμα η σκόνη ως βαρύτερη να αποχωρίζεται και να κατακάθεται. Ο τρόπος λειτουργίας των κονιοθαλάμων στηρίζεται στην *αρχή της πτώσεως της ταχύτητας των αερίων*, κατάσταση που επιφέρει την κατακρήμνιση της σκόνης. Με σκοπό την αλλαγή της διεύθυνσης του αερίου που βελτιώνει την κατακρήμνιση των σωματιδίων τοποθετούνται πολλές φορές και εμπόδια.

Η παραπάνω διαδικασία βελτιώνει, σε σημαντικό βαθμό, τον βαθμό αποδόσεως του κονιοθαλάμου. Οι κονιοθάλαμοι είναι λόγω της απλής κατασκευής τους οι πιο φθηνοί αποκονιωτές, αλλά ταυτόχρονα έχουν και τον πιο χαμηλό βαθμό απόδοσης. Σε σημαντικό βαθμό, κατακρατούνται μόνο χονδρόκοκκα σωματίδια. Για κατακράτηση πιο λεπτών σωματιδίων, π.χ. της περιοχής των 20microns, απαιτούνται μεγάλοι κονιοθάλαμοι με ένα μήκος περίπου 35μέτρα. Χρησιμοποιούμενος ο κονιοθάλαμος σε τυπική τσιμεντόσκονη έχει βαθμό αποδόσεως 30-70%. Οι κονιοθάλαμοι χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν στη τσιμεντοβιομηχανία εκτενώς. Σπάνια όμως χρησιμοποιούνται μεμονωμένα, συνήθως χρησιμοποιούνταν παλαιότερα ως ενσωματωμένοι σε άλλα μηχανήματα. Σήμερα χρησιμοποιούνται μόνο για προαποκονίωση πριν από έναν καλύτερο αποκονιωτή όπως για παράδειγμα, σακκόφιλτρα ή ηλεκτροφίλτρα.



Εικόνα 23: Σχήμα κονιοθάλαμου (σκόνη που κατακάθισε) [8].

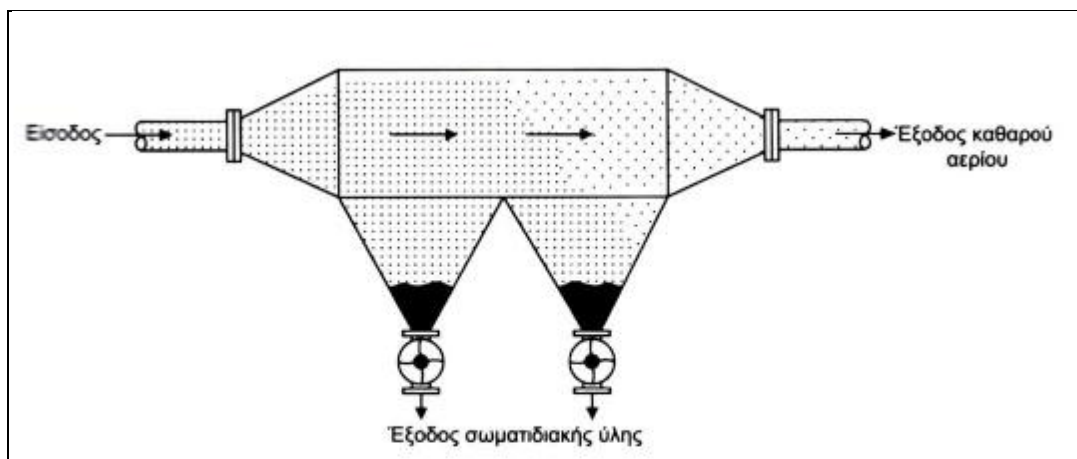


Στον παρακάτω συλλέκτη (Εικ. 24) υποβαθμίζεται η ταχύτητα του αερίου λόγω αύξησης της διαμέτρου από την οποία διέρχεται το ρεύμα της εκπομπής, σε ταχύτητα ευνοϊκή και σε συνδυασμό με τον απαραίτητο χρόνο παραμονής στο θάλαμο, προκαλείται καθίζηση της βαρύτερης (από το αέριο) σωματιδιακής ύλης, απλά και μόνο υπό την επίδραση της βαρύτητας. Η σωματιδιακή ύλη συγκεντρώνεται μέσα σε χοάνες από όπου απομακρύνεται περιοδικά. Οι ταχύτητες καθίζησης κυμαίνονται από 20-200 m/min.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός βαρυτικού συλλέκτη συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Μέγεθος: πολύ μεγάλο,
2. Κόστος εγκατάστασης: χαμηλό,
3. Ενεργειακό κόστος: πολύ χαμηλό,
4. Κόστος συντήρησης: χαμηλό,
5. Απόδοση: πολύ χαμηλή,
6. Αξιοπιστία: εξαιρετική,
7. Απόδοση: αυξημένη σε χαμηλά φορτία, μειωμένη σε υπερβολικά φορτία,

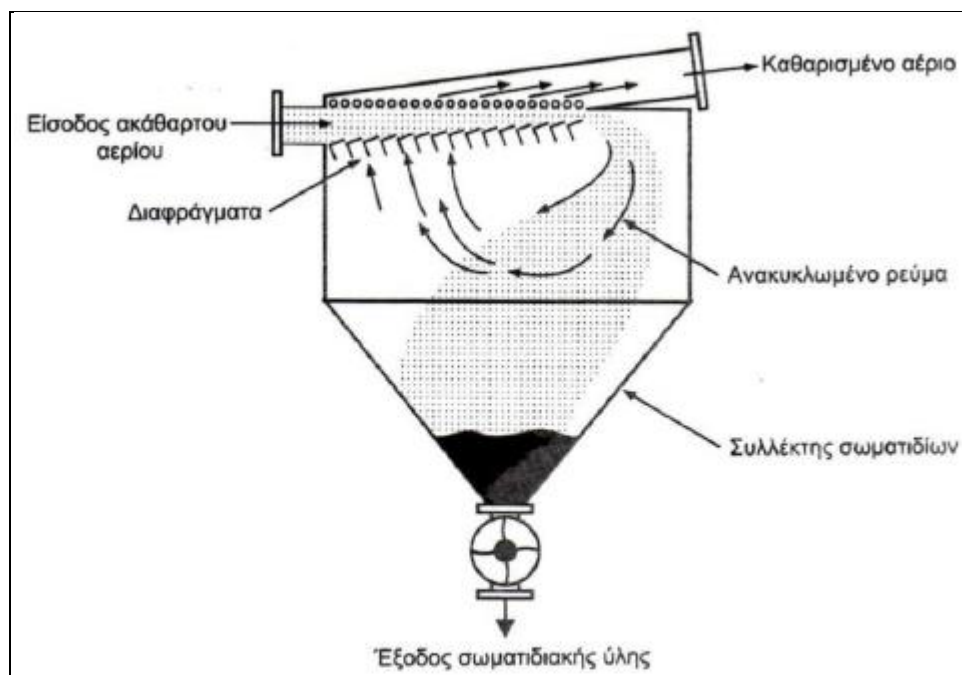
Οι βαρυτικοί συλλέκτες έχουν ως βασικό μειονέκτημα την πολύ χαμηλή του απόδοση σε λεπτόκοκκη και μέτρια σωματιδιακή ύλη, οπότε εάν η κατακράτησή της κρίνεται απαραίτητη, η χρήση του εν λόγω συστήματος είναι απαγορευτική.



Εικόνα 24: Βαρυτικός συλλέκτης σωματιδιακής ύλης [8].

3.2 Συλλέκτες εκτροπής με ανακυκλοφορία.

Στην Εικ.25 απεικονίζεται ένας συλλέκτης εκτροπής, όπου το ρεύμα της εκπομπής για να καθαριστεί από τη σωματιδιακή ύλη εισάγεται με μεγάλη ταχύτητα σε οριζόντιο εκτροπέα αποτελούμενο από οπές που απέχουν περίπου 1.5cm μεταξύ τους. Το εισερχόμενο στον συλλέκτη ακάθαρτο αέριο ρεύμα, για να περάσει ανάμεσα από τις οπές και να φθάσει στο θάλαμο της εξόδου πρέπει να κάνει μία ξαφνική, υψηλής ταχύτητας εκτροπή. Τα αέρια συστατικά του ρεύματος, έχοντας χαμηλό ειδικό βάρος δέχονται μικρότερη φυγόκεντρο δύναμη και εκτρέπονται εύκολα. Αντίθετα, η βαρύτερη σωματιδιακή ύλη, λόγω αδράνειας, δεν μπορεί να ακολουθήσει αυτήν την πορεία και παρεκκλίνει προς το κάτω μέρος του εκτροπέα μέχρι να παγιδευτεί στον υποδοχέα σωματιδιακής ύλης. Στο τέλος καθιζάνει με φθίνουσα ταχύτητα μέσα στη χοάνη του συλλέκτη (όπως σε ένα θάλαμο βαρυτικής καθίζησης).



Εικόνα 25: Συλλέκτης εκτροπής με ανακυκλοφορία [8].

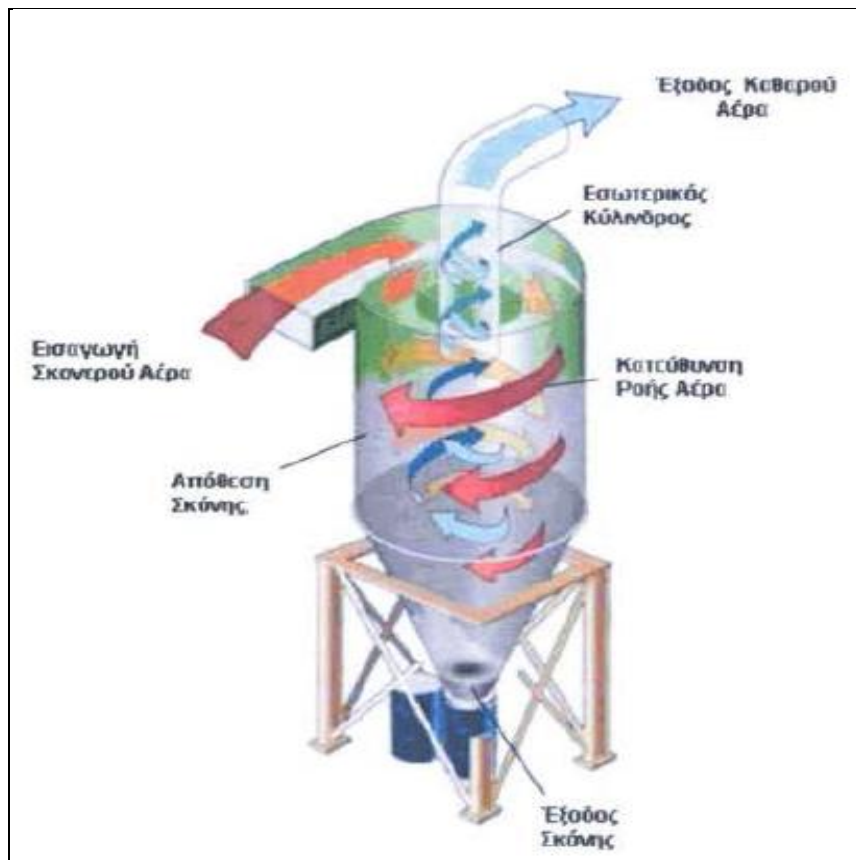
Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συλλέκτη ανακυκλοφορίας συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Μέγεθος: μικρό
2. Κόστος εγκατάστασης: χαμηλό
3. Ενεργειακό κόστος: χαμηλό
4. Κόστος συντήρησης: χαμηλό
5. Απόδοση: χαμηλή
6. Αξιοπιστία: εξαιρετική
7. Απόδοση: μειωμένη σε χαμηλά φορτία που αυξάνεται ελάχιστα σε υπερβολικά φορτία.

Στα μειονεκτήματα του συλλέκτη εκτροπής θα μπορούσε να αναφερθεί το ότι αν και η απόδοση του συγκεκριμένου τύπου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη του βαρυτικού συλλέκτη, αυτό δεν είναι επαρκές ώστε να αντιμετωπίσει λεπτόκοκκο φορτίο σκόνης, εκτός αν χρησιμοποιηθεί ως προ-καθαριστής της εκπομπής και κατόπιν ακολουθήσει ένας αποδοτικότερος συλλέκτης, κάτι που συνηθίζεται στη βιομηχανία.

3.3 Κυκλώνες.

Ένας κυκλώνας αποτελείται βασικά από 2 μέρη: α) από ένα κυλινδρικό τμήμα και β) από ένα κωνικό μέρος. Το αέριο που πρέπει να καθαριστεί μπαίνει εφαπτομενικά στο πάνω μέρος του κυλινδρικού μέρους και κινείται σπειροειδώς στα τοιχώματα του κυκλώνα προς τα κάτω, μέχρι το κάτω μέρος του κωνικού μέρους. Από εκεί το αέριο ακολουθεί το εσωτερικό μέρος του κυκλώνα όπου πάλι σπειροειδώς κινείται προς τα πάνω μέχρι τον σωλήνα εξαγωγής. Η φυγό κεντρος δύναμη επενεργεί έτσι ώστε τα σωματίδια να κάθονται στα τοιχώματα και κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, καθώς και από την επίδραση της εξωτερικής σπειροειδούς κινήσεως των αερίων οδηγούνται προς τα κάτω.



Εικόνα 26: Κυκλοφορία αερίων μέσα σε Κυκλώνα [6,7].

3.3.1 Αρχή Λειτουργίας Κυκλώνα.

Τα περισσότερα σωματίδια πέφτουν σε ένα χώρο από όπου απομακρύνονται με ένα φράκτη ή ένα κοχλία. Η ανερχόμενη σπειροειδής κίνηση των αερίων είναι απαλλαγμένη χονδρόκοκκης σκόνης εκτός μιας μικρής ποσότητας σωματιδίων λεπτής κοκκομετρικής σύστασης. Η εσωτερική δίνη πιάνει μόνο ένα μικρό μέρος της διατομής του κυκλώνα. Γύρω απ'αυτή την εσωτερική δίνη δημιουργείται σε σχήμα κυλίνδρου η ουδέτερη ζώνη. Εάν η ουδέτερη ζώνη είναι ευρεία, τότε ένα μέρος της σκόνης συμπαρασύρεται από τα αέρια. Όσο μεγαλύτερη λοιπόν, είναι η διαδρομή που πρέπει να διανύσει ένα σωματίδιο για να φθάσει στο οριακό στρώμα, τόσο λιγότερα σωματίδια κατακρατούνται στον κυκλώνα. Με λίγα λόγια, ο βαθμός αποδόσεως ενός κυκλώνα είναι αντιστρόφως ανάλογος προς τη διάμετρό του.

Ο βαθμός κατακράτησης της σκόνης του κυκλώνα εξαρτάται, σε σημαντικό βαθμό, από:

- ✓ το μέγεθος της σκόνης: Όσο πιο μεγάλη και πιο βαριά είναι η σκόνη, τόσο αυξάνεται η κατακράτηση,
- ✓ την ταχύτητα εισόδου του αερίου μίγματος στον κυκλώνα: Όσο αυξάνεται η ταχύτητα, αυξάνεται η κατακράτηση,
- ✓ τη διάμετρο του κυκλώνα: Όσο πιο μικρή είναι η διάμετρος του κυκλώνα, τόσο αυξάνεται η κατακράτηση,
- ✓ την περιεκτικότητα της σκόνης στον προς αποκονίωση αέρα: Όσο μεγαλώνει είναι η περιεκτικότητα, τόσο αυξάνεται η κατακράτηση.



Ο «βαθμός κατακράτησης» επηρεάζει την επιλογή του κυκλώνα. Οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται στη τσιμεντοβιομηχανία για την αποκονίωση κλιβάνων, ψυχραντήρων κλίνκερ, θραυστήρων, ξηραντηρίων μύλων, εγκαταστάσεων μεταφοράς, κλπ. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πριν από το σακκόφιλτρο ή το ηλεκτρόφιλτρο για μεγαλύτερη κατακράτηση της σκόνης.

Οι κυκλώνες ανήκουν στους φθηνούς αποκονιωτές. Δεν έχουν κινητά μέρη και μπορούν να επενδυθούν με πυρίμαχο υλικό για να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες μέχρι 975°C. Υπάρχουν διάφορες κατασκευές κυκλώνων, όλες όμως εργάζονται με την ίδια αρχή της συγκράτησης της σκόνης με τη φυγόκεντρο δύναμη.



Εικόνα 27: Κυκλώνες υψηλής απόδοσης [1].

3.4 Κυκλώνες υψηλής απόδοσης.

Είναι φυγόκεντροι συλλέκτες, καθιερωμένοι με την ονομασία κυκλώνες, οι οποίοι διαχωρίζουν τη λεπτόκοκκη (κατά προτίμηση) σωματιδιακή ύλη από μία εκπομπή, μετατρέποντας την ταχύτητα του ρεύματος εισόδου σε μία κατερχόμενη εξωτερική δίνη και μία ανερχόμενη εσωτερική δίνη μεταξύ του άνω και κάτω άκρου ενός κυλίνδρου ο οποίος στο κάτω άκρο του συνεχίζεται με κωνικό τελείωμα (χώρος μέσα στον οποίο διαδραματίζεται η περιγραφείσα ροή). Η ταχέως περιστρεφόμενη καθοδική δίνη εξαναγκάζει τα βαρύτερα σωματίδια, λόγω της αναπτυσσόμενης φυγόκεντρης δύναμης, να συγκεντρώνονται στα τοιχώματα του κυκλώνα και να καθιζάνουν προς τη χοάνη συλλογής, από όπου απομακρύνονται περιοδικά. Η ανοδική εσωτερική δίνη του καθαρισμένου αερίου εγκαταλείπει τον κυκλώνα διαμέσου ενός κυλίνδρου που βρίσκεται στην κορυφή του κυκλώνα.

Η μορφή ροής σε έναν κυκλώνα μπορεί να ποικίλει από σχετικά απλή μέχρι εξαιρετικά περίπλοκη, εξαρτώμενη από πολλές μεταβλητές όπως η γεωμετρία της εισόδου, οι αναλογίες των διαστάσεων των διαφόρων τμημάτων του κυκλώνα και άλλα. Εξαιτίας της σχετικής απλότητας, αξιοπιστίας και υψηλής απόδοσής του, ο κυκλώνας έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα τα τελευταία 100 χρόνια ως βασική συσκευή απομάκρυνσης σωματιδιακής ύλης



από εκροές αέριων ρευμάτων της βιομηχανίας. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση σε κάποια συγκεκριμένη διεργασία υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ εκατοντάδων τύπων συλλεκτών σωματιδιακής ύλης που χρησιμοποιούν τη γενική αρχή λειτουργίας του κυκλώνα. Όμως οι πλέον συνηθισμένοι τύποι που κυκλοφορούν είναι τρεις:

- α) κυκλώνες μικρής διαμέτρου με πτερύγια,
- β) κυκλώνες μεγάλης διαμέτρου με περιελισσόμενη είσοδο,
- γ) κυκλώνες μεγάλης διαμέτρου με περιελισσόμενη είσοδο και εκχυτήρα λεπτόκοκκων σωματιδίων.

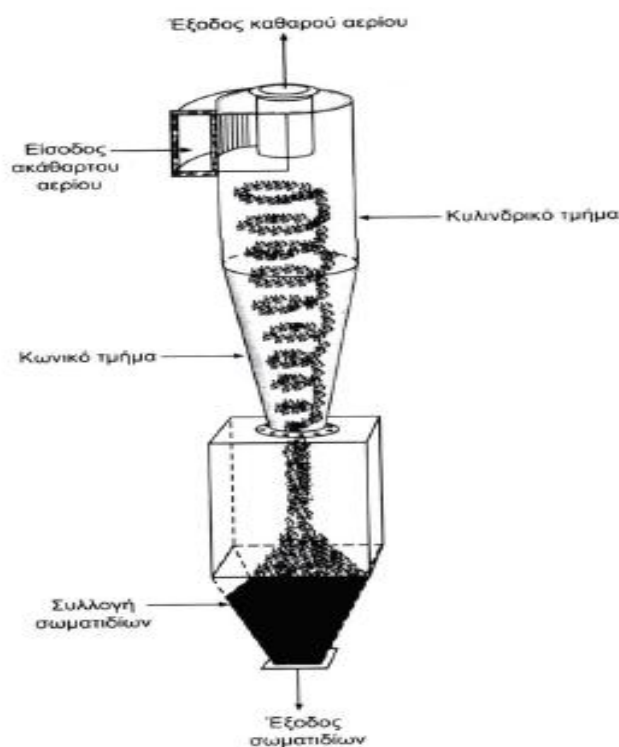
Κάθε ένας από τους παραπάνω τύπους έχει τα δικά του χαρακτηριστικά γνωρίσματα (πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα), είναι διαθέσιμος σε μεγάλο εύρος διαστάσεων και αναλογιών οι οποίες καθορίζουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του και την καταλληλότητα της χρήσης του για δεδομένη εφαρμογή. Στη βιομηχανία είναι πολύ σημαντική η προσεκτική επιλογή, τόσο ως προς τον τύπο όσο και ως προς το μέγεθος, ώστε να μεγιστοποιούνται τα πλεονεκτήματα και να ελαχιστοποιούνται τα μειονεκτήματα κατά τη λειτουργία. Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται παρακάτω είναι κοινά για τους τρεις αναφερθέντες τύπους κυκλώνων, των οποίων η βασική διαφορά συνίσταται στον τρόπο εισόδου του προς καθαρισμό αέριου ρεύματος στον κύλινδρο [8].

3.5 Βασικά Χαρακτηριστικά κυκλώνων.

Οι κυκλώνες παρουσιάζουν πολύ καλή **απόδοση**, που προσεγγίζει το 100%. Η απόδοση αυτών των διατάξεων μειώνεται απότομα από κάποιο μέγεθος σωματιδίων και κάτω, το οποίο ποικίλει ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κυκλώνα (μέγεθος, τύπος, κλπ) και τα χαρακτηριστικά της προς επεξεργασία ροής. Για κάθε τύπο κυκλώνα είναι διαθέσιμα διαγράμματα απόδοσης έναντι του μεγέθους των σωματιδίων που βοηθούν στην επιλογή.

Οι περισσότεροι κυκλώνες λειτουργούν σε ταχύτητες εισόδου 900-1200 m/min. Η απαιτούμενη **ενέργεια**, λόγω πτώσης πίεσης (απώλεια ενέργειας ροής), για τη διακίνηση του αέριου ρεύματος σε αυτές τις ταχύτητες είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας εισόδου. Όταν εισάγεται ατμοσφαιρικός αέρας, η απώλεια είναι μεταξύ 100-150 mm στήλης H₂O. Αυτή η απώλεια εκφράζεται ως διαφορά στατικής πίεσης (πτώση πίεσης) ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο. Σε αέρια υψηλότερων θερμοκρασιών και χαμηλότερης πυκνότητας παρουσιάζονται χαμηλότερες απώλειες.

Ο σχεδιασμός κάθε κυκλώνα γίνεται στα πλαίσια μιας αντιστάθμισης (balance) μεταξύ τριών παραγόντων που είναι η απόδοση, η απώλεια ενέργειας ροής και το μέγεθος. Γενικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι υψηλότερες αποδόσεις απαιτούν υψηλότερες απώλειες ενέργειας ροής (μεγαλύτερη δαπάνη ενέργειας) ή μεγαλύτερο μέγεθος κυκλώνα ή και τα δύο. Επομένως η **δυναμικότητα** ενός κυκλώνα πέρα από τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά του προβλήματος καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό και από την κρίση του μηχανικού.



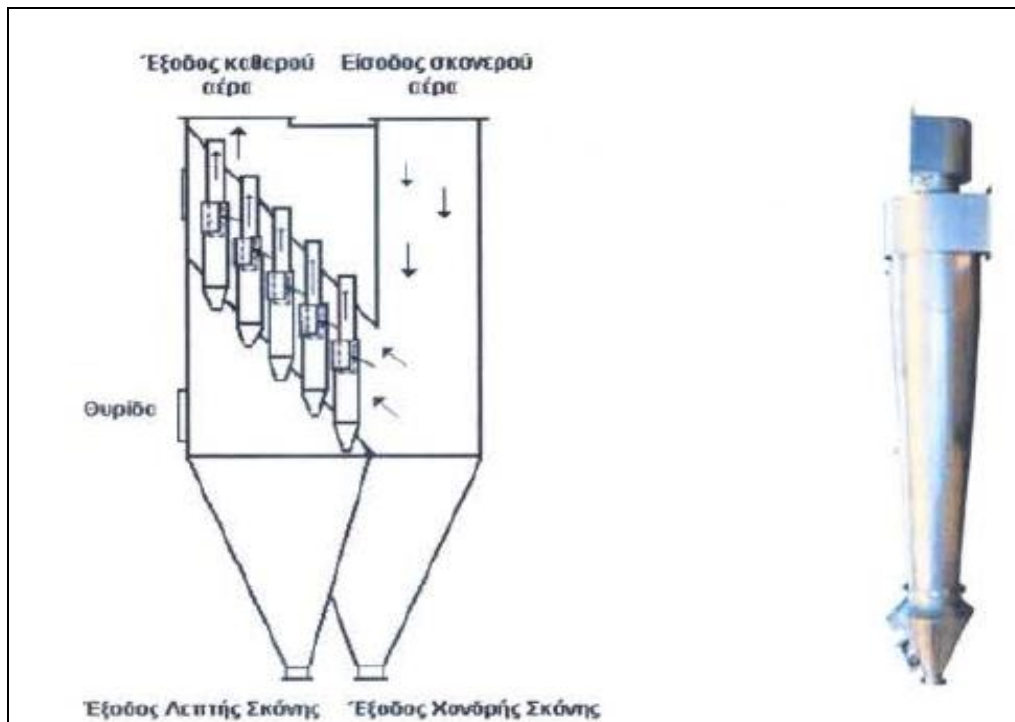
Εικόνα 28: Απεικόνιση τυπικού κυκλώνα κατακράτησης σωματιδιακής ύλης και πολυκυκλώνα [6,7].

3.6 Πολυκυκλώνες.

Η αρχή λειτουργίας του πολυκυκλώνα είναι ακριβώς ίδια μ' αυτήν του κυκλώνα. Η διαφορά είναι ότι, στον πολυκυκλώνα ενυπάρχουν περισσότεροι του ενός όμοιοι κυκλώνες, ώστε το ποσοστό κατακράτησης να είναι μεγαλύτερο από εκείνο του συμβατικού κυκλώνα. Χαρακτηριστικό των κυκλώνων είναι ότι πρέπει να εργάζονται στο μέγιστο των αποδόσεών τους. Μικρή υποφόρτιση σημαίνει ελάττωση του βαθμού κατακράτησης.

Ωστόσο οι κυκλώνες και οι πολυκυκλώνες βασίζονται στη φυγόκεντρο δύναμη που αποκτούν τα σωματίδια της σκόνης κατά την περιστροφή του αερίου μίγματος (αέρα προς αποκονίωση). Αυτοί οι φυγόκεντροι αποκονιωτές χρησιμοποιούνται:

- στην περίπτωση χονδρόκοκκης σκόνης, που δεν ενδιαφέρει η μεγάλη κατακράτηση (π.χ. προθερμαντήρες),
- στις υψηλές θερμοκρασίες αερίων,
- στο διαχωρισμό μεγάλων ποσοτήτων σκόνης (IV βαθμίδα προθερμαντήρων),
- για χονδρόκοκκη σκόνη που μπορεί να δημιουργήσει φθορά σε ανεμιστήρες, σακκόφιλτρα (Σ/Φ), ηλεκτρόφιλτρα (Η/Φ),
- σε πνευματικές μεταφορές, σαν διαχωριστής του μεταφερόμενου υλικού, από τον αέρα.



Εικόνα 29: Σύστημα αποκονίωσης με πολυκυκλώνα [6,7].

Ο βαθμός αποδόσεως των πολυκυκλώνων βρίσκεται στην περιοχή 85-94% για σωματίδια μεγαλύτερα των 15-20mm διαμέτρου με πτώση πίεσεως 130-180mm H₂O. Ένα μειονέκτημα των πολυκυκλώνων είναι το βούλωμα (μπούκωμα) των μικρών σωλήνων.

3.7 Πύργοι Υγρής Μεθόδου.

Αυτή η κατηγορία αποκονιωτών χρησιμοποιείται εκεί που υπάρχει λίγη σκόνη . Το βασικό τους όμως πρόβλημα είναι η διάθεση της λάσπης που παράγεται από τη λειτουργία. Η εγκατάσταση αυτή τις πιο πολλές φορές, κοστίζει ως κατασκευή αλλά και ως λειτουργία, περισσότερο από την αξία του ίδιου του αποκονιωτή. Στη τσιμεντοβιομηχανία ο συγκεκριμένος αποκονιωτής δεν έχει μεγάλες δυνατότητες εφαρμογής.



Εικόνα 30: Σύστημα αποκονίωσης με πύργους υγρής μεθόδου [7].



4 ΦΙΛΤΡΑΝΣΗ.

Στα προηγούμενα αναφέρθηκαν συγκεκριμένοι τύποι μηχανικών αποκονιωτών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία γενικότερα αλλά ειδικότερα και στην τσιμεντοβιομηχανία. Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η διαδικασία της φίλτρανσης και περιγράφονται τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα είδη φίλτρων. Αυτός ο τρόπος παράθεσης του θέματος γίνεται ως εισαγωγή στη λειτουργία των σακόφιλτρων που είναι και πιο ο διαδεδομένος τύπος μηχανικού αποκονιωτή.

Γενικά τα φίλτρα διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

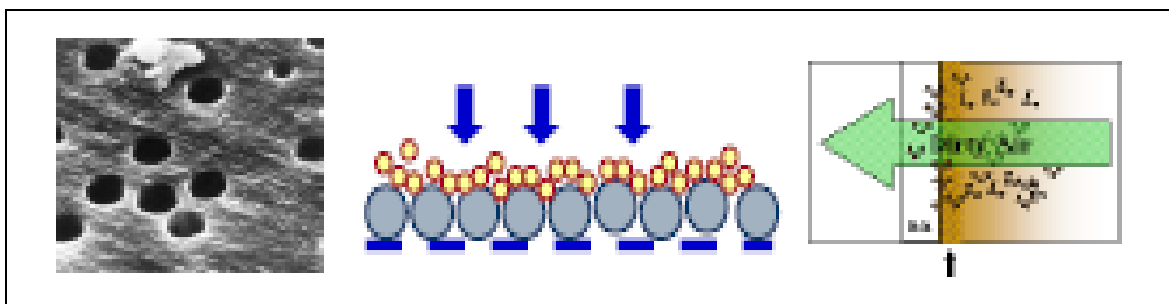
- Τα επιφανειακά (surface) όπως π.χ φίλτρα σήτας, υφασμάτινα φίλτρα,
- Τα βαθιά (depth) όπως π.χ τα φίλτρα άμμου, φίλτρα χαλκιού κλπ.

Τα σακόφιλτρα είναι το πιο διαδεδομένο μέσο αποκονίωσης στη βιομηχανία. Η ονομασία του αποκονιωτή δόθηκε από το σχήμα των φίλτρων. Τα φίλτρα αυτά είναι κατασκευασμένα από υφάσματα ποικίλης ποιότητας και πάχους, ανάλογα με την περίπτωση που θα χρησιμοποιηθούν, ραμμένα σε διάφορα σχήματα (σωληνωτά, τυφλά στο ένα μέρος σαν μαξιλαροθήκες, κλπ.).

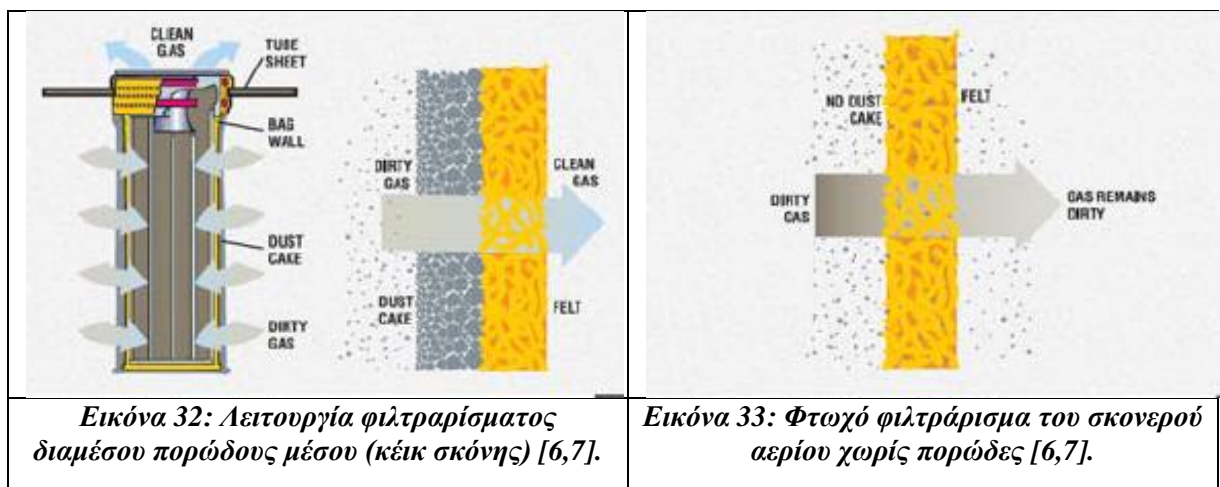
Πριν την ανάλυση του συγκεκριμένου τύπου μηχανικού αποκονιωτή που είναι τα σακόφιλτρα κρίνεται σκόπιμη μια σύντομη περιγραφή των διαφόρων ειδών φίλτρων και η εισαγωγή των τεχνικών που χρησιμοποιούνται αφού και το σακόφιλτρο προκύπτει ως μια παρόμοια τεχνική.

4.1 Μηχανισμοί Φίλτρανσης.

Τα φίλτρα ανάμεσα σε άλλα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της αέριας ρύπανσης. Χαρακτηρίζονται από το μέγεθος οπών που συναρτάται άμεσα με τη διάμετρο σωματιδίων που μπορούν να κατακρατήσουν. Έτσι μπορούν να έχουν οπές μεγέθους έως και 0.1μm ή η απόσταση των ινών να είναι μικρότερη από 0.1μm. Η συλλογή της σκόνης με τα φίλτρα επιτυγχάνεται καθώς τα σωματίδια παγιδεύονται ανάμεσα στις ίνες, οπότε τείνουν να γεφυρώσουν τα ανοίγματα και να τα κάνουν μικρότερα. Έτσι καθώς η ποσότητα των σωματιδίων αυξάνει, το ίδιο το στρώμα που σχηματίζεται λειτουργεί από μόνο του ως φίλτρο και το αρχικό ύφασμα ουσιαστικά στηρίζει το στρώμα αυτό. Τα σωματίδια συλλέγονται στην εμπρόσθια επιφάνεια του αναπτυσσόμενου στρώματος (επιφανειακό φίλτρο). Στις επόμενες εικόνες φαίνεται σχηματικά ο μηχανισμός συλλογής απλοποιημένα.



Εικόνα 31: Μηχανισμός Φίλτρανσης αέρα [6,7].



Εικόνα 32: Λειτουργία φιλτραρίσματος διαμέσου πορώδους μέσου (κέικ σκόνης) [6,7].

Εικόνα 33: Φτωχό φιλτράρισμα του σκονερού αερίου χωρίς πορώδες [6,7].

4.2 Φίλτρα υφαντών μέσων (διήθηση).

Τα χρησιμοποιούμενα υφαντά φίλτρα στη τσιμεντοβιομηχανία είναι συνήθως σακκόφιλτρα (Σ/Φ) με φιλτρόσακκους διαμέτρου μέχρι 200mm και μήκος 10m. Οι φιλτρόσακκοι είναι από ύφασμα που κατασκευάζεται από φυσικές ή συνθετικές ίνες. Τα υφαντά φίλτρα μπορούν να κατακρατήσουν σωματίδια τα οποία είναι μικρότερα από 1μm και εργάζονται με βαθμό αποδόσεως μέχρι 99,95%. Ανάλογα με τις ιδιότητες των **ινών** τα σακκόφιλτρα (Σ/Φ) μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι τη θερμοκρασία των 130°C. Το σκονερό αέριο, διαπερνά ένα πορώδες μέσο, το ύφασμα του φίλτρου και κατακρατά τα σωματίδια στα κενά. Με το γέμισμα των κενών αρχίζει να σχηματίζεται ένα στρώμα σκόνης στην επιφάνεια του φιλτρόπανου που παράγει την μεγαλύτερη εργασία φιλτραρίσματος. Πριν ακόμη σχηματισθεί το στρώμα σκόνης στο φίλτρο που διαρκεί ελάχιστο χρόνο, ο βαθμός αποδόσεως είναι μικρός. Μόλις το στρώμα σκόνης γίνει παχύ, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης, τότε όμως αρχίζει να ανεβαίνει και η αντίσταση πίεσης πράγμα που κάνει απαραίτητο το πλύσιμο (τίναγμα).

Ειδικότερα τα συστήματα υφασμάτων φίλτρων απομακρύνουν τη σκόνη από ένα αέριο ρεύμα μέσω ενός πορώδους υφάσματος και του στρώματος της σκόνης (filter cake) που συσσωρεύεται πάνω σε αυτό. Τα συστήματα αυτά συχνά αναφέρονται και ως «σακκόφιλτρα» (baghouses), επειδή το ύφασμα διαμορφώνεται σε κυλινδρικούς σάκους εγκατεστημένους σε ειδική κατασκευή. Το καθαρό αέριο ρεύμα εξέρχεται από την εξωτερική πλευρά του διηθητικού μέσου, ενώ η σκόνη συλλέγεται από την εσωτερική πλευρά και περιοδικά απομακρύνεται από το ύφασμα. Υπάρχουν πολλά είδη υφασμάτων που χρησιμοποιούνται, διαφορετικοί τρόποι ύφανσης, μεγέθη σάκων και τρόποι διαμόρφωσης των σάκων. Η χρήση σακκόφιλτρων στην τσιμεντοβιομηχανία είναι πολύ διαδεδομένη, ξεκίνησε το 1975 και συνεχώς αυξάνεται σε βάρος των ESP που είναι και πολύ ακριβότερη λύση (ηλεκτροστατικών φίλτρων).

4.2.1 Μέθοδοι καθαρισμού του φίλτρου.

Ανάλογα με τις ιδιότητες της σκόνης και το είδος του πανιού, χρησιμοποιούνται γενικότερα οι παρακάτω μέθοδοι καθαρίσματος του φίλτρου :



- **Ταλάντευση φιλτροσάκκου:** Στην περίπτωση αυτή το πάνω μέρος του φιλτροσάκκου μέσω ενός στελέχους καταλήγει σε ένα ισχυρό περιστροφικό μηχάνημα που αναγκάζει το στρώμα σκόνης να πέσει.
- **Χρήση αέρα σε αντιπαράλληλη ροή:** Η διαφορά πίεσεως δημιουργεί μια χαλαρότητα στον φιλτροσάκκο και πτώση του στρώματος σκόνης.
- **Παλμική πίεση:** Στο διαμέρισμα του σακκόφιλτρου (ΣΦ) που δεν λειτουργεί δίνεται για διάρκεια 300 περίπου χιλιοστών του δευτερολέπτου ένας παλμός πεπιεσμένου αέρα $7\text{kg}/\text{cm}^2$. Ο αέρας που εκτονώνεται ενεργοποιεί ένα κύμα κρούσεως το οποίο δημιουργεί την αποκόλληση του στρώματος σκόνης από το φιλτρόπανο. Για τον παλμικό πεπιεσμένο αέρα χρειάζεται ένας μικρός αεροσυμπιεστής. Η κατανάλωση σε πεπιεσμένο αέρα είναι περίπου $1\text{ Nm}^3/400 - 500\text{m}$ καθαρού αέρα.
- **Καθαρισμός με ηχητικά κύματα:** Αυτή η μέθοδος απαιτεί μια πηγή ήχου για παραγωγή ηχητικών κυμάτων χαμηλής συχνότητας 200 Hz/sec εντάσεως $100-150\text{ db(A)}$, τα οποία μεταδίδονται στο φιλτρόπανο. Τα ηχητικά κύματα συνδυάζονται με αέρα κατά αντιπαράλληλη που δημιουργούν τον διαχωρισμό του στρώματος σκόνης από το φιλτρόπανο. Το φαινόμενο του καθαρισμού γίνεται περιοδικά και επιτυγχάνεται συνήθως με ρύθμιση χρόνου.

Με σκοπό τον καλύτερο καθαρισμό χρησιμοποιούνται επίσης δύο διαφορετικές μέθοδοι καθαρισμού για τον αποκονιωτή. Ο καθαρισμός του διαμερίσματος του σακκόφιλτρου (Σ/Φ) επιτυγχάνεται όταν δε λειτουργεί. Έτσι λοιπόν για την αδιάκοπη αποκονίωση πρέπει ένα Σ/Φ να έχει ένα διαμέρισμα περισσότερο από ότι είναι αναγκαίο για τον αντίστοιχο αέρα.

4.3 Φίλτρα υφαντών μέσων (διήθηση) αναπνευστήρων.

Οι αναπνευστήρες είναι παλιός τρόπος αποκονίωσης που χρησιμοποιείται σε σιλό και συναντάται μόνο σε παλιά εργοστάσια. Δεν είναι τίποτα άλλο παρά φιλτροσάκκοι σαν κι αυτούς των Σ/Φ διαφόρων διαμέτρων συνήθως της τάξεως των 100mm και διαφόρων μηκών από 2.50mm έως και 3000mm. Τοποθετούνται σε διαδοχικές σειρές (για να έχουν κοινό τινάγμα) επάνω από τα σιλό. Ο αέρας εκτονώσεως των σιλό περνάει από τους αναπνευστήρες και βγαίνει καθαρός στον γύρο χώρο. Τα κατακρατηθέντα σωματίδια κατά τη διάρκεια του τινάγματος επιστρέφουν μέσα στο σιλό. Στη συνέχεια αναφέρονται τα συνήθως χρησιμοποιούμενα είδη φίλτρων στη βιομηχανία.



Εικόνα 34: Συστήματα αποκονίωσης – Σακκόφιλτρα διαφόρων τύπων [6]



4.3.1 Φίλτρα υφαντών μέσων από ίνες υάλου (διήθηση)

Τα φίλτρα αυτά είναι Σ/Φ και χρησιμοποιούνται συνήθως για καθαρισμό απαερίων των κλιβάνων. Αυτό είναι δυνατό διότι σε αυτού του είδους τα Σ/Φ οι φιλτρόσακκοι έχουν κατασκευαστεί από ίνες υάλου και αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Φτάνουν μήκος 10m και διάμετρο 300mm. Τα φίλτρα αυτά δεν έχουν πρακτική εφαρμογή στην Ελλάδα όσο στην Αμερική.

4.3.2 Φίλτρα με στρώμα κοκκώδους υλικού

Αυτά τα φίλτρα που ονομάζονται επίσης φίλτρα χαλικιού και τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως για υγρά, τον τελευταίο καιρό βρήκαν εφαρμογή και στα αέρια. Αυτά τα φίλτρα είναι ένας συνδυασμός από κυκλώνα και στρώμα ή στρώματα κοκκώδους υλικού (π.χ. χαλίκι). Ο βαθμός αποδόσεώς τους είναι της τάξεως των 99,9% και μπορεί να μεταβληθεί με την αλλαγή της κοκκομετρίας των στρωμάτων (πιο χονδρό ή πιο λεπτό υλικό). Η πτώση πίεσεως αυτών είναι περίπου στα 150mm H₂O.

4.4 Μηχανισμοί Διήθησης.

Η διήθηση με ύφασμα είναι μια διαδικασία διαχωρισμού κατά την οποία ένα αέριο που περιέχει στερεά περνά μέσα από ένα πορώδες μέσο (ύφασμα) το οποίο κατακρατά τα στερεά. Αυτή η διαδικασία μπορεί να λειτουργεί σε συνεχή ή σε περιοδική βάση, με περιοδική επίσης απομάκρυνση των στερεών από τα φίλτρα.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη υφάσματος, διαφορετικοί τρόποι ύφανσης σε διάφορα μεγέθη σάκων, διαφορετικοί τρόποι διαμόρφωσης των σάκων σε ένα σακόφιλτρο καθώς και διαφορετικοί τρόποι ροής του αέρα μέσα από τους σάκους. Η βασική διαδικασία φιλτραρίσματος μπορεί να διεξαχθεί σε πολλούς διαφορετικούς τύπους υφάσματος, ενώ και οι μέθοδοι απομάκρυνσης του στερεού υλικού από το φίλτρο ποικίλουν.

Οι βασικές διαφορές φιλτραρίσματος σχετίζονται γενικότερα με τα ακόλουθα:

- Τύπος υφάσματος,
- Μηχανισμός καθαρισμού,
- Εξοπλισμός,
- Τρόπος λειτουργίας.

Ο διαχωρισμός της σκόνης επιτυγχάνεται με πέντε κυρίως μηχανισμούς που είναι:

- Πρόσκρουση,
- Ανάσχεση,
- Διάχυση,
- Βαρυτική καθίζηση,
- Ηλεκτροστατική έλξη.

Γενικά η απόδοση ενός φίλτρου δίνεται από τη μαθηματική έκφραση:

$$\begin{cases} n = (N_{in} - N_{out}) / N_{in} \\ n_m = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \end{cases} \quad (4.1)$$

Στις παραπάνω εκφράσεις ο όρος n αναφέρεται στη συλλογή σωματιδίων (πλήθος) ενώ ο όρος n_m αναφέρεται σε συλλογή μάζας (συγκεντρώσεις). Η «επιφανειακή» (φαινομενική) ταχύτητα του αερίου ρεύματος είναι $V = Q / A$ όπου Q είναι η ογκομετρική παροχή και A η



επιφάνεια του φίλτρου, που επίσης λέγεται και λόγος αέρα/υφάσματος (air-to-cloth ratio, A/C). Η πραγματική ταχύτητα είναι

$$V_{act} = V / (1 - a) \quad \text{όπου} \quad a = \frac{\text{όγκος ινών}}{\text{συνολικός όγκος}} = 1 - \text{πορώδες} \quad (4.2)$$

Οι τιμές που λαμβάνει η παράμετρος a είναι στο εύρος (0.001 – 0.2) με τυπική τιμή 0.01. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διείσδυση μειώνεται με το πάχος του στρώματος σύμφωνα με το νόμο

$$P = e^{-\gamma t} \quad (4.3)$$

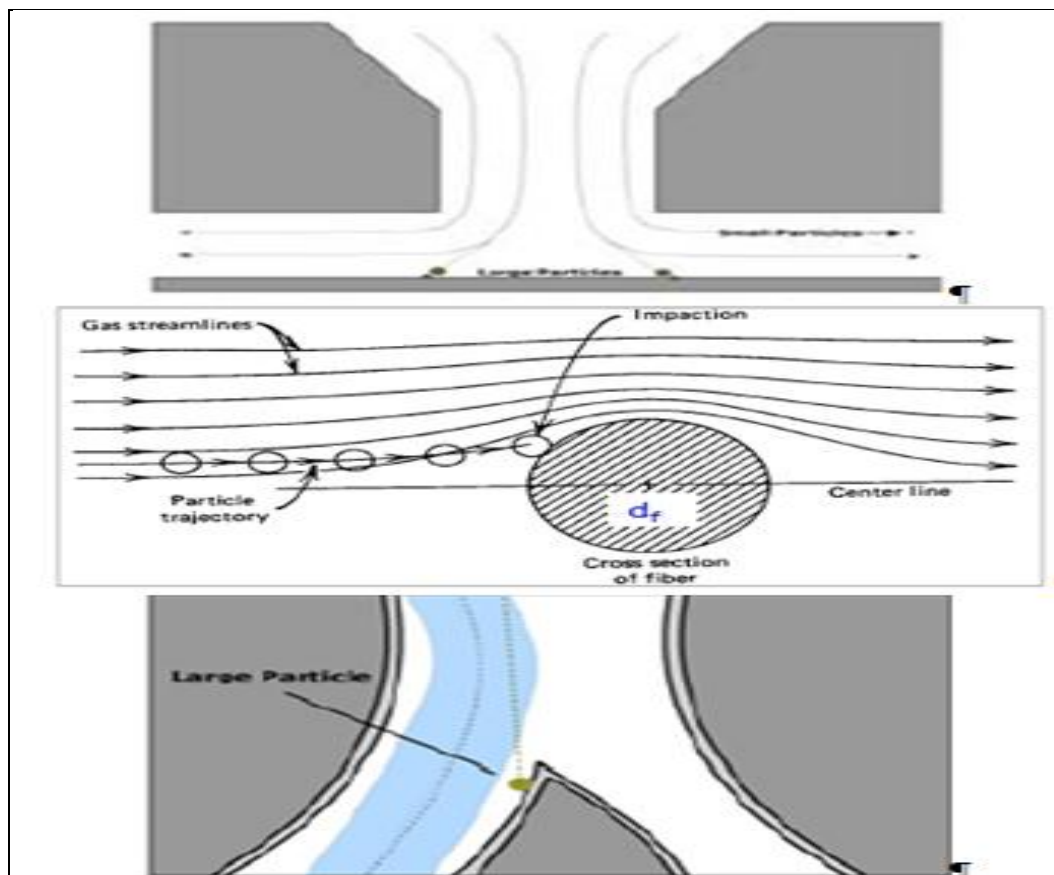
4.4.1 Μηχανισμός διήθησης – Πρόσκρουση (ή ενσφήνωση – *impaction*).

Εάν στη ροή ενός αερίου ρεύματος με σωματίδια παρεμβληθεί ένα αντικείμενο, τα μεγαλύτερα σωματίδια (λόγω αδράνειας) εκτρέπονται από τις ροϊκές γραμμές του αερίου, προσκρούουν στο ακινητοποιημένο αντικείμενο και ενδεχομένως μένουν προσκολλημένα σε αυτό. Ο μηχανισμός της πρόσκρουσης απλοποιημένα δίνεται στην Εικ.28.

Η απόδοση συλλογής n_I δίνεται τότε από τη σχέση:

$$n_I = \frac{St \cdot J}{2Ku^2} \quad \text{όπου} \quad \begin{cases} St = \frac{\tau U_o}{d_f} = \frac{\rho_p d_p^2 C_c U_o}{18\mu d_f} \\ J = (29.6 - 28a^{0.62})R^2 - 27.5R^{2.8} \quad \text{για } R < 0.4 \end{cases} \quad (4.4)$$

όπου $R = d_p / d_f$ (interception parameter) και $J = 2$ για $R > 0.4$ [9]



Εικόνα 35: Μηχανισμός της Πρόσκρουσης (*impaction*).[6,7]



4.4.2 Μηχανισμός διήθησης – Ανάσχεση (interception).

Τα μεσαίου μεγέθους σωματίδια (μη-διαχεόμενα) σωματίδια ακολουθούν την κίνηση των μορίων (δεν προσκρούουν στο αντικείμενο), αλλά είναι δυνατόν να ακουμπήσουν στο αντικείμενο και να συγκρατηθούν από αυτό. Ο μηχανισμός της ανάσχεσης δίνεται απλοποιημένα στην Εκ.18.

Η απόδοση συλλογής n_R δίνεται από τη σχέση:

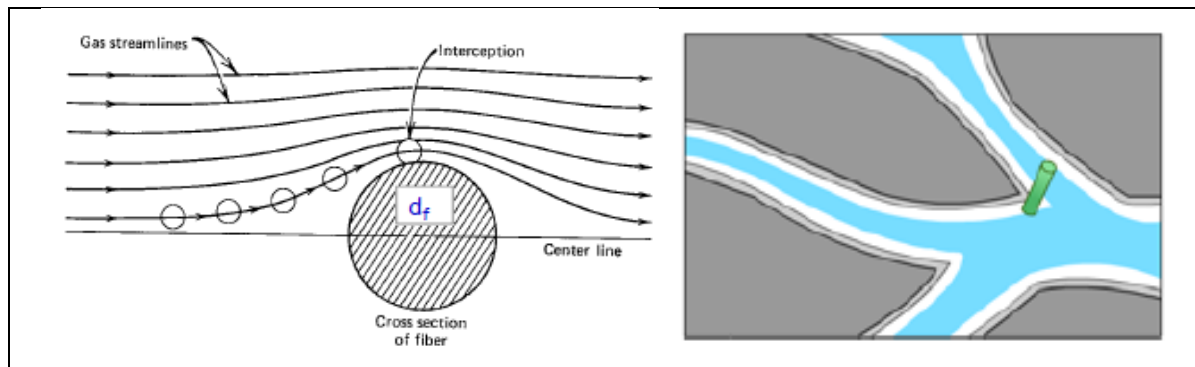
$$n_R = \frac{1+R}{2Ku} \left[2\ln(1+R) - 1 + a + \left(\frac{1}{1+R} \right)^2 \left(1 - \frac{a}{2} \right) - \frac{a}{2} (1+R)^2 \right] \quad (4.5)$$

όπου $R = dp/df$ και

Ku είναι ο αριθμός Kuwabara ($Re < 1$) που δίνεται από την σχέση:

$$Ku = -\frac{\ln \alpha}{2} - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} \quad (4.6)$$

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μηχανισμοί της πρόσκρουσης και της ανάσχεσης είναι υπεύθυνοι για την απομάκρυνση του 99% της μάζας των σωματιδίων. [10]



Εικόνα 36: Μηχανισμός Ανάσχεσης (interception) [6,7].

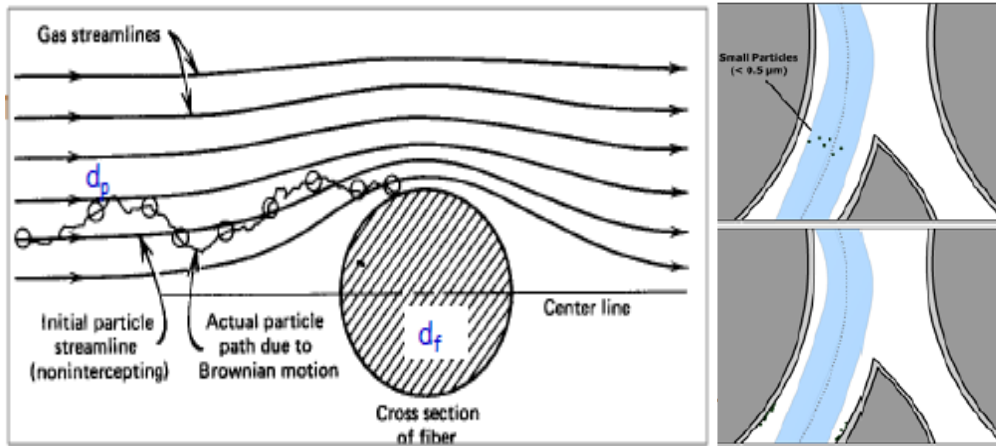
4.4.3 Μηχανισμός διήθησης – Διάχυση (diffusion).

Τα μικρά σωματίδια ($< 0.5 \mu m$) υπόκεινται σε τυχαία κίνηση (κίνηση Brown). Τα σωματίδια μπορούν να έχουν διαφορετική ταχύτητα από το αέριο ρεύμα και σε κάποια χρονική στιγμή να έρθουν σε επαφή με το αντικείμενο και να συλληφθούν (Εκ.30).

Η απόδοση συλλογής n_D δίνεται από :

$$n_D = 2.58 Pe^{-2/3} \quad (4.7)$$

όπου $Pe = \frac{d_f U_o}{D}$ είναι ο αριθμός Peclet και $D = kT / 3\pi\mu d_p$ ο συντελεστής διάχυσης.

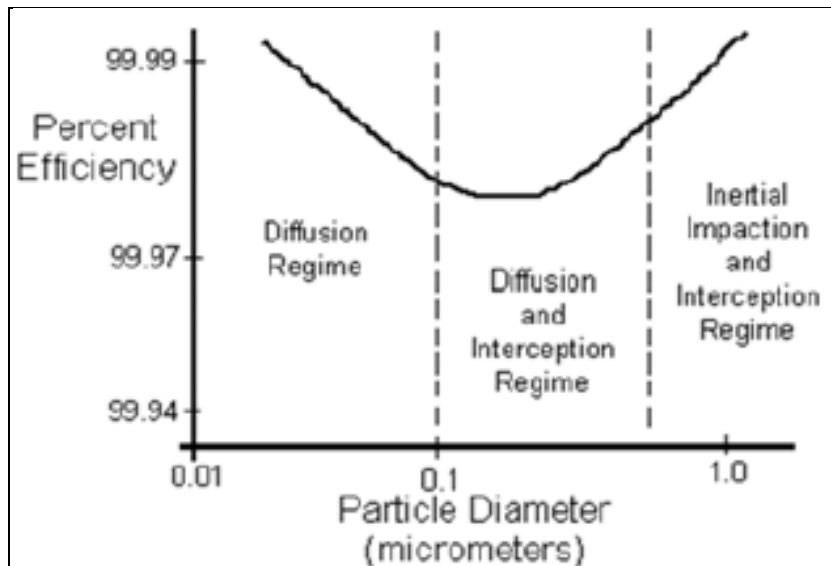


Εικόνα 37: Μηχανισμός Διάχυσης (diffusion) [6,7].

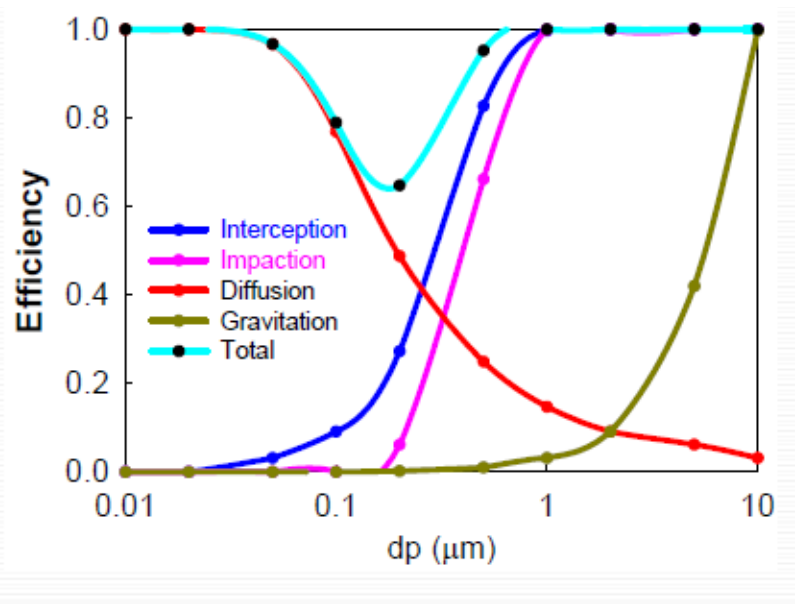
4.4.4 Άλλοι Μηχανισμοί διήθησης – Συνολική απόδοση Φίλτρου.

Άλλοι μηχανισμοί διήθησης είναι η **Βαρυτική καθίζηση**, η **Συσσωμάτωση** και η **Ηλεκτροστατική έλξη**. Ειδικότερα τα σακόφιλτρα παρουσιάζουν μια ελάχιστη απόδοση για σωματίδια 0.05 – 0.5μm, καθώς κανένας μηχανισμός απόθεσης δεν είναι αποτελεσματικός. Επίσης η απόδοση ενός φίλτρου για ανεξάρτητους μηχανισμούς αλλά και για το συνδυασμό τους φαίνεται στις Εικ.31, 32 αντίστοιχα. Η συνολική απόδοση (με την προϋπόθεση ότι οι μηχανισμοί δρουν ανεξάρτητα δίνεται από:

$$n = 1 - (1 - n_{\pi\rho\omicron})(1 - n_{\alpha\nu\alpha})(1 - n_{\delta\iota\alpha})(1 - n_{\beta\alpha\rho})(1 - n_{\eta\lambda\epsilon}) \approx n_{\pi\rho\omicron} + n_{\alpha\nu\alpha} + n_{\delta\iota\alpha} + n_{\beta\alpha\rho} + n_{\eta\lambda\epsilon} \quad (4.8)$$



Εικόνα 38: Απόδοση φίλτρου ως συνάρτηση του μεγέθους του σωματιδίου [6].



Εικόνα 39: Απόδοση φίλτρου ως συνάρτηση του συνδυασμού μηχανισμών απόθεσης σωματιδίων [11].



5 ΣΑΚΟΦΙΛΤΡΑ.

Τα σακόφιλτρα είναι το πιο διαδεδομένο μέσο αποκονίωσης στη βιομηχανία. Η ονομασία του αποκονιωτή δόθηκε από το σχήμα των φίλτρων. Τα φίλτρα αυτά είναι κατασκευασμένα από υφάσματα ποικίλης ποιότητας και πάχους, ανάλογα με την περίπτωση που θα χρησιμοποιηθούν, ραμμένα σε διάφορα σχήματα (σωληνωτά, τυφλά στο ένα μέρος σαν μαξιλαροθήκες, κλπ.).

Η λειτουργία ενός σακόφιλτρου μπορεί να παρομοιαστεί με τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής σκούπας σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα βέβαια. Χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση ξηρών σωματιδίων (σκόνης) από ξηρά ρεύματα αέρα χαμηλών θερμοκρασιών (0 – 275 °C). Αποτελούνται από σάκους διαμέτρου 15 – 30 cm και μήκους πάνω από 10m, οι οποίοι προσαρμόζονται σε θαλάμους. Το αέριο ρεύμα διοχετεύεται μέσα στους σάκους και εξέρχεται απαλλαγμένο από τα σωματίδια. Το ύφασμα των σάκων μπορεί να είναι από τσόχα, βαμβάκι, συνθετική ύλη, υαλοβάμβακα, ανάλογα με το είδος του αερίου ρεύματος και των σωματιδίων που επεξεργάζονται. Δύο τύποι βιομηχανικών σακόφιλτρων απεικονίζονται στις Εικόνες 40, 41. Η χρήση αρκετών ανεξάρτητων θαλάμων επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία των σακόφιλτρων, ακόμα και όταν υπάρχει ανάγκη συντήρησης ορισμένων εξ' αυτών.

Το ύφασμα των σάκων μπορεί να έχει τρύπες διαμέτρου μεγαλύτερες από 100μm, όταν όμως το σακόφιλτρο λειτουργεί σωστά, η απόδοση πλησιάζει το 99% για σωματίδια διαμέτρων μεγαλύτερων από 1μm. Τα σωματίδια μικρού μεγέθους συγκρατούνται από το στρώμα σωματιδίων που δημιουργείται πάνω στο ύφασμα του σάκου και το οποίο λειτουργεί ως μέσο διήθησης. Καθώς αυξάνει το πάχος του σχηματιζόμενου στρώματος, αυξάνει η πτώση πίεσης του σακόφιλτρου και κατά συνέπεια το λειτουργικό κόστος. Από την άλλη πλευρά αν το πάχος αυξηθεί πάρα πολύ, τότε η πίεση στο άνω τμήμα του σάκου θα προκαλέσει την κατάρρευση του στρώματος και η πτώση πίεσης θα αυξηθεί υπερβολικά. Το ίδιο θα συμβεί και στην περίπτωση κατά την οποία οι πόροι του υφάσματος θα γεμίσουν με υγρό. Επομένως γίνεται κατανοητό ότι τα σακόφιλτρα περιορίζονται στη συλλογή ξηρών σωματιδίων και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ειδικά μέτρα πρόληψης της συμπίκνωσης των συστατικών του αερίου ρεύματος.

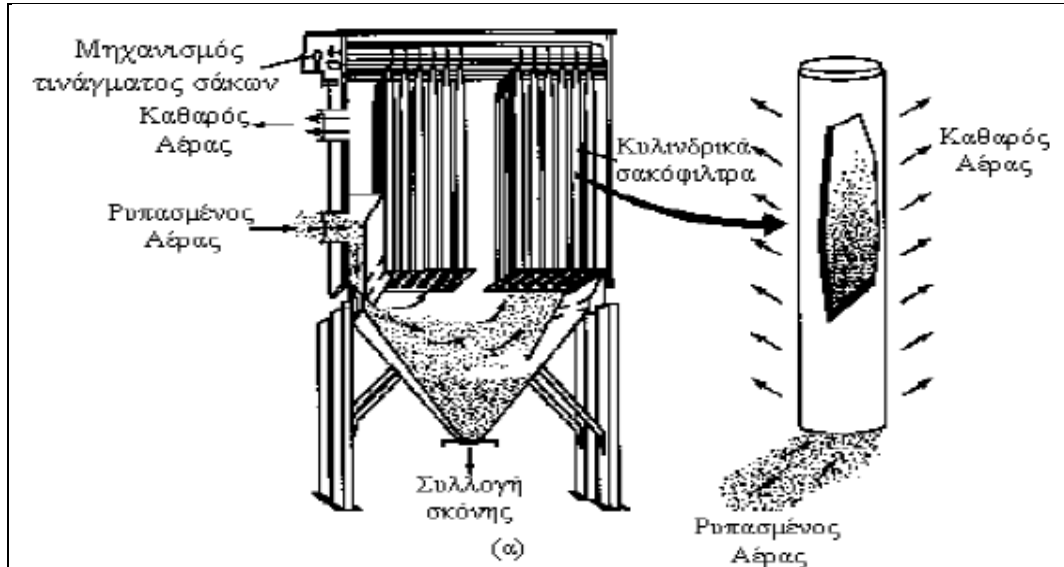
Το σχηματιζόμενο στρώμα απομακρύνεται από τις μικρές μονάδες απλά με το τίναγμα των σάκων. Οι μεγάλοι βιομηχανικοί συλλέκτες καθαρίζονται με τη χρήση ενός ρεύματος αέρα κατά μήκος του σάκου ή με στιγμιαία αντιστροφή του αερίου ρεύματος μέσα στο σάκο. Προκειμένου να αποφεύγεται η ανάγκη πολλών συχνών καθαρισμών, ενώ παράλληλα να διατηρείται ένα ικανοποιητικό πάχος στρώματος για την αποδοτική συλλογή σωματιδίων χωρίς υπερβολική πτώση πίεσης, ο ογκομετρικός ρυθμός παροχής μέσα από το ύφασμα περιορίζεται στο εύρος $(0.5 - 2) \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / \text{m}^2$ επιφάνειας υφάσματος.

Τυπικές τιμές πτώσης πίεσης ποικίλουν στο εύρος (5 – 40) cm ΣΝ, για συχνότητες τινάγματος από 4 – 5 φορές ανά ώρα έως μία φορά ανά αρκετές ώρες. Ο χρόνος ζωής ενός σάκου είναι 2 – 3 χρόνια.

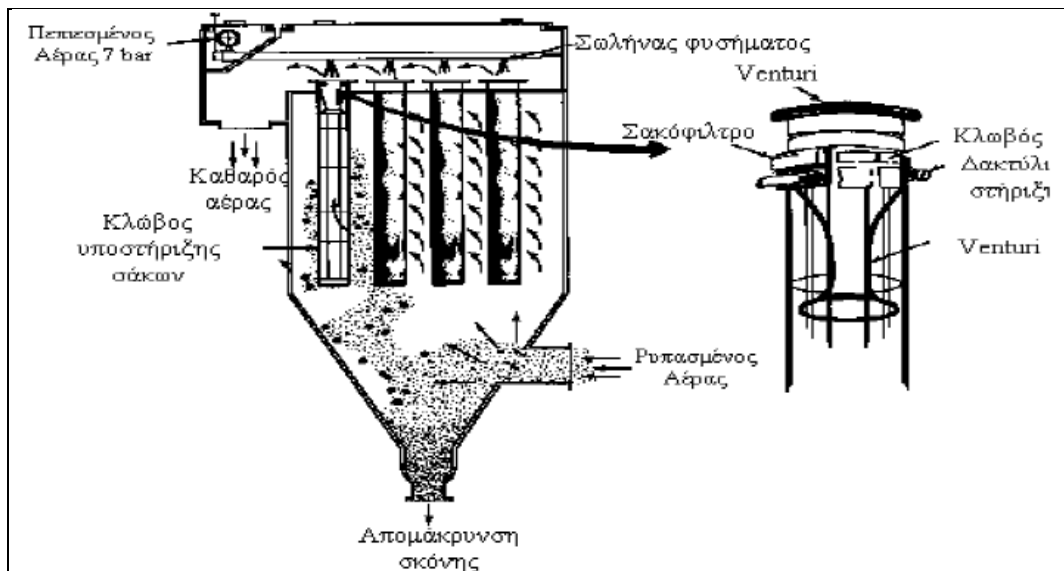
Στα σακόφιλτρα γενικά οι ίνες είναι περίπου 100 – 150μm σε διάμετρο και τα ανοικτά διαστήματα ανάμεσα στις ίνες μπορεί να είναι 50 – 75μm. Τα κενά καταλαμβάνονται από μικροσκοπικά τυχαία προσανατολισμένες μικρές ίνες. Αρχικά όταν αυτό το καθαρό ύφασμα θα μπει σε χρήση, η απόδοση συλλογής θα είναι χαμηλή λόγω του ότι ένα μεγάλο τμήμα των σωματιδίων θα περνά απευθείας μέσα από το ύφασμα. Πάντως λόγω των μηχανισμών διήθησης (πρόσκρουσης, ανάσχεσης πορείας, διάχυσης, τα σωματίδια της σκόνης θα συσσωρευτούν γρήγορα πάνω στις ίνες και θα γεφυρώσουν τα κενά. Από τη στιγμή που αυτές



οι ενδιάμεσες οπές γεμίζουν και σχηματίζεται πάνω στο ύφασμα το στρώμα σωματιδίων, η απόδοση του φιλτραρίσματος αυξάνεται σημαντικά.



Εικόνα 40:Σακόφιλτρα με τίναγμα [7]



Εικόνα 41:Σακόφιλτρα με παλμικά ακροφύσια [7]



5.1 Χαρακτηρισμός -Είδη Σακόφιλτρων.

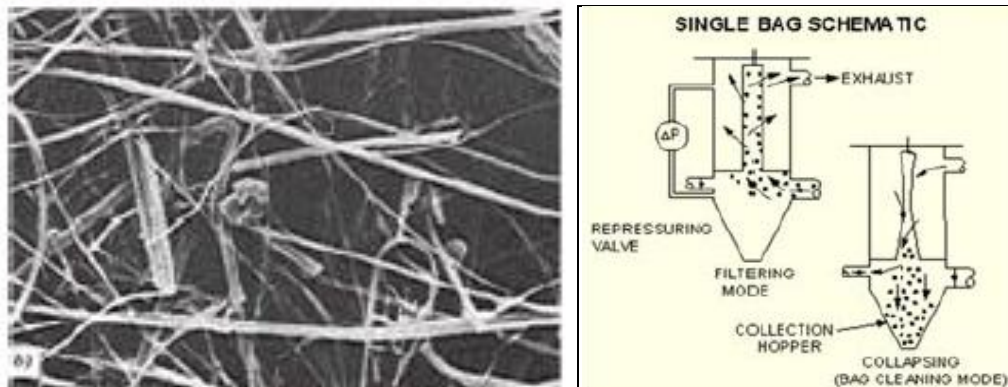
Οι κυριότεροι γνωστοί τύποι σακόφιλτρων (ανάλογα με τη μέθοδο απομάκρυνσης της σκόνης από το σάκο είναι οι εξής:

- Σακόφιλτρα με ρεύμα αέρα αντίθετης ροής (reverse flow – off stream),
- Σακόφιλτρα με μηχανική δόνηση (shaker – off stream),
- Σακόφιλτρα δόνησης με αέρα υπό πίεση (pulse jet – on stream).

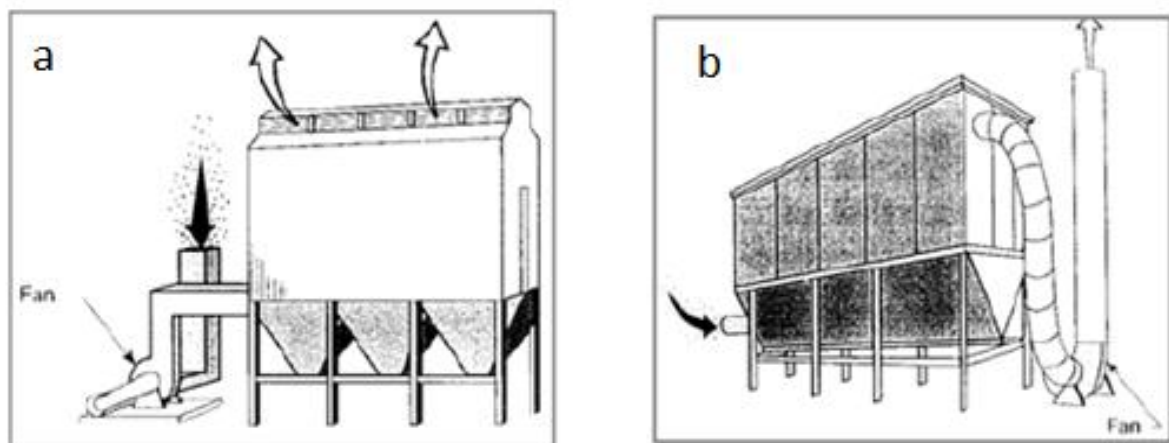
Ανάλογα με τη διάθεσή τους μετά τη χρήση τα σακόφιλτρα χωρίζονται σε :

- Σακόφιλτρα μιας χρήσης (disposable): κυρίως τα βαθιά φίλτρα (ίνες γυαλιού πάνω σε μεταλλική βάση),
- Σακόφιλτρα που επαναχρησιμοποιούνται (non-disposable): από ύφασμα.

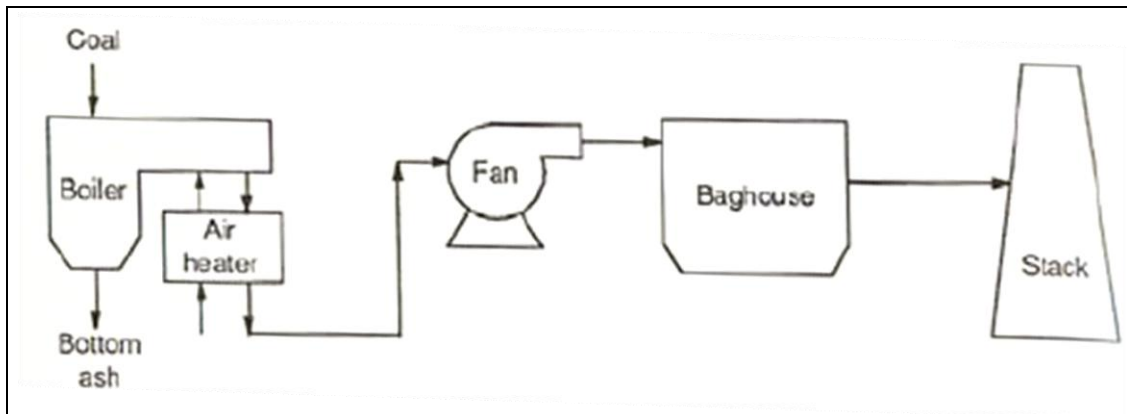
Επίσης τα σακόφιλτρα χαρακτηρίζονται ως *θετικής* (Εικ.34α) ή *αρνητικής πίεσης* (Εικ.34b). Ως θετικής πίεσης - positive pressure θεωρούνται εκείνα τα σακόφιλτρα στα οποία το ρυπασμένο αέριο ρεύμα ωθείται να διέλθει μέσα από αυτά (Εικ.35). Τα σακόφιλτρα αυτά είναι φθηνότερα ενώ συνεισφέρουν στη δημιουργία προβλημάτων στα πτερύγια των ανεμιστήρων. Ως αρνητικής πίεσης σακόφιλτρα - negative pressure χαρακτηρίζονται εκείνα στα οποία ο ανεμιστήρας είναι κατάντη του σακόφιλτρου (Εικ.36). Στα σακόφιλτρα αυτού του τύπου προβλέπεται ενισχυμένη κατασκευή, ενώ προβλήματα παρουσιάζονται με την είσοδο του αέρα και ιδιαίτερα στη χοάνη συλλογής.



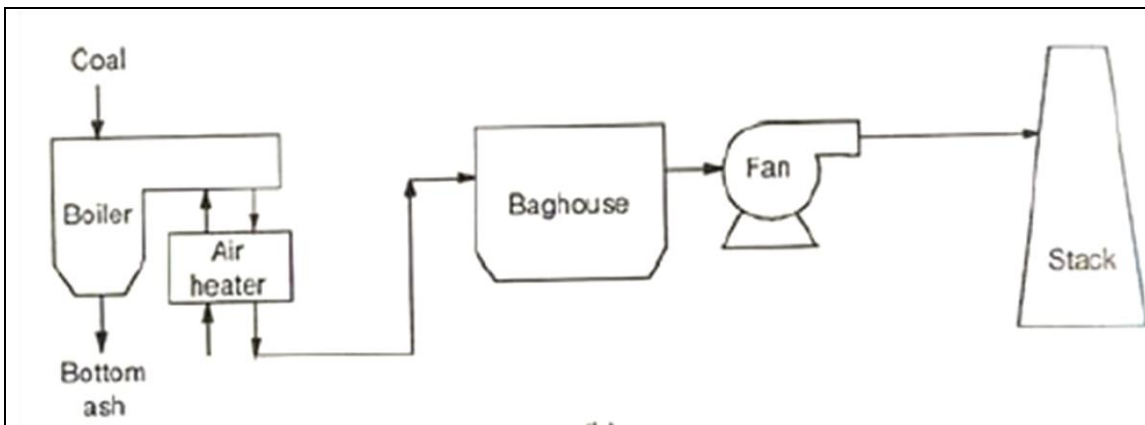
Εικόνα 42: Ίνες Σακόφιλτρου - Μέτρηση Δρ. [7]



Εικόνα 43: Σακόφιλτρα (α) Θετικής και (β) Αρνητικής Πίεσης. [7]



Εικόνα 44: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης σακόφιλτρου θετικής πίεσης. [7]



Εικόνα 45: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης σακόφιλτρου αρνητικής πίεσης [7].

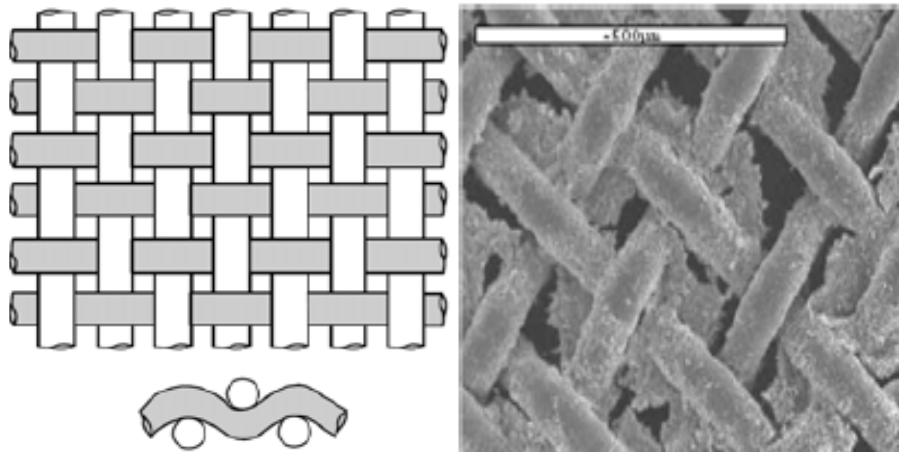
Τα διάφορα μέρη ενός συστήματος σακόφιλτρου είναι: ο σάκος, το ύφασμα και το στήριγμα, η όλη κατασκευή πάνω στην οποία εγκαθίστανται τα σακόφιλτρα, η χοάνη συλλογής, το σύστημα απομάκρυνσης της σκόνης και τέλος το σύστημα καθαρισμού φίλτρων.

5.2 Είδη Υφάσματος – «πλεγμένο ύφασμα»

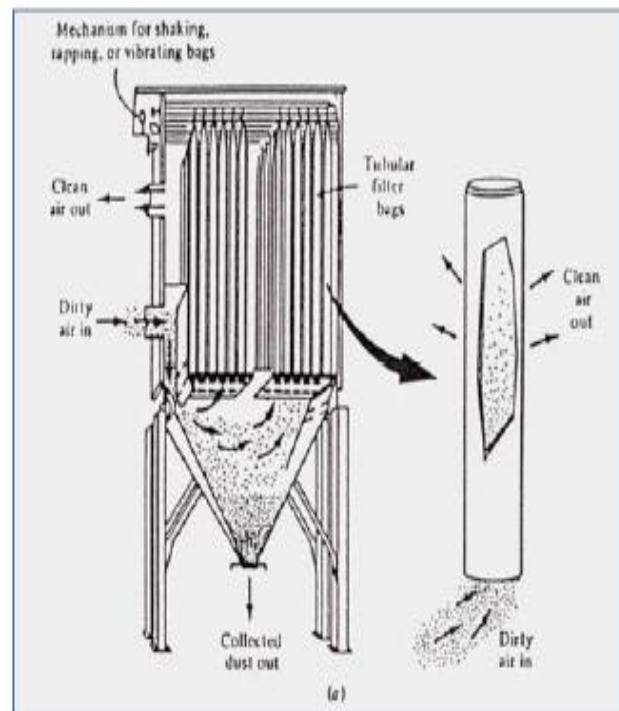
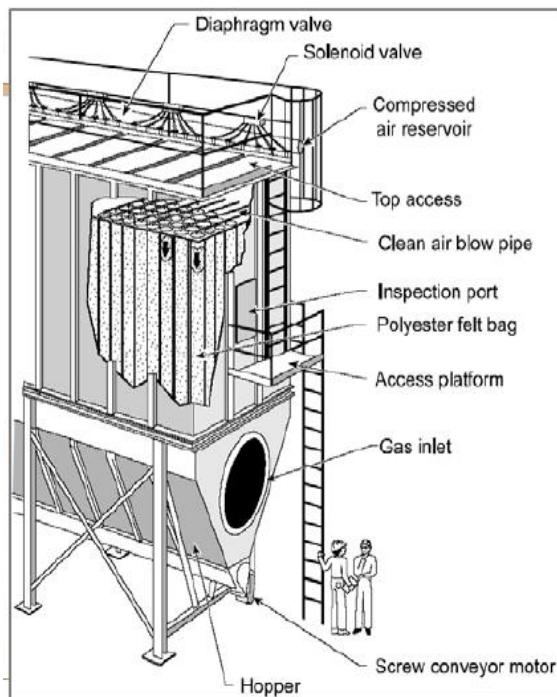
Τα είδη υφάσματος που χρησιμοποιούνται στα σκόφιλτρα είναι τύπου «πλεγμένου υφάσματος» με την πλέξη να είναι σταυρωτή τις περισσότερες φορές όπως φαίνεται στην Εικ. 25. Τα διάφορα είδη πλέξης έχουν διαφορετικά ανοίγματα, κάτι που επηρεάζει την αντοχή του υφάσματος και την περατότητα. Η περατότητα του υφάσματος επηρεάζει την ποσότητα που περνάει και την πτώση πίεσης. Μια πυκνή πλέξη θα συλλέξει καλύτερα τα σωματίδια, αλλά αυξάνει το κόστος και την πτώση πίεσης.

Ορίζεται η πυκνότητα πλήρωσης ή στερεότητας το πηλίκο του όγκου των ινών προς το συνολικό όγκο και το μέγεθος αυτό συνδέεται με το πορώδες σύμφωνα με τη σχέση:

$$a = \frac{\text{όγκος ινών}}{\text{συνολικός όγκος}} = 1 - \text{πορώδες} \quad (5.1)$$

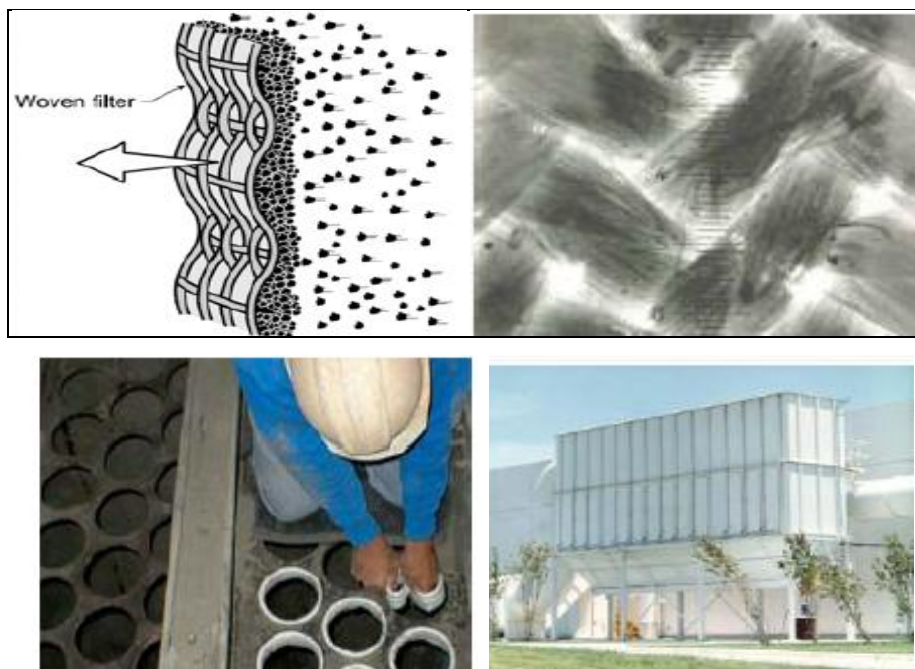


Εικόνα 46: Πλεγμένο φίλτρο (woven filter) [7].

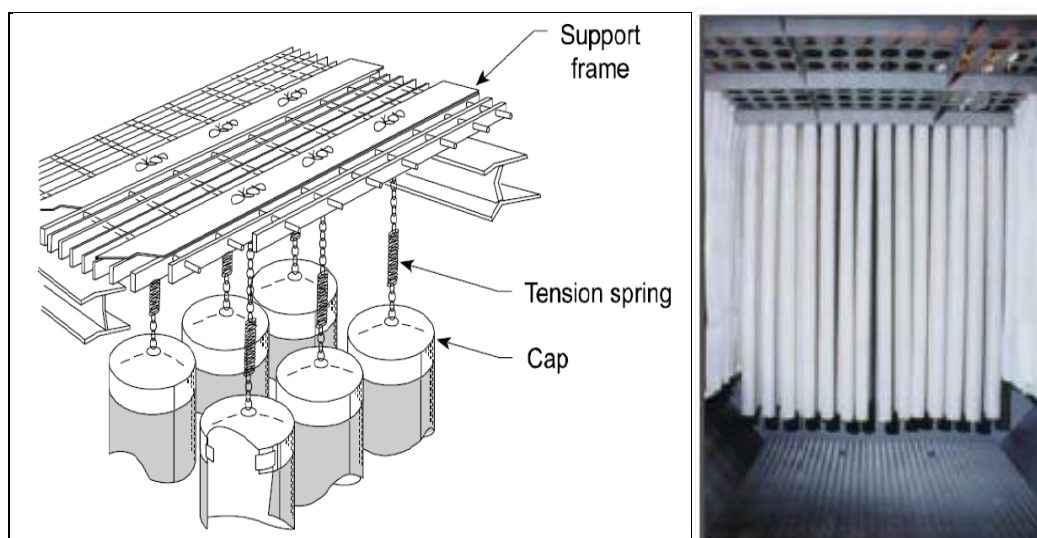


Εικόνα 47: Σχηματική αναπαράσταση των τμημάτων που απαρτίζουν ένα σακόφίλτρο. [6,7]

Για υφασμάτινο φίλτρο από τη βιβλιογραφία συνήθως δίνεται $\alpha < 0.1$, ενώ για πλεγμένο φίλτρο $\alpha \sim 0.2$. Τα «πλεγμένα υφάσματα» συνήθως χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς συλλέκτες που καθαρίζονται με αντίθετη ροή ή με μηχανική δόνηση. Στην πραγματικότητα η σκόνη παγιδεύεται στο πλεγμένο ύφασμα όπως φαίνεται στην Εικ. 48.



Εικόνα 48: Παγίδευση σκόνης σε "πλεγμένο ύφασμα" – Μικροσκοπικά και τεράστια συστήματα [6,7].



Εικόνα 49: Συστοιχία σάκων (σακόφιλτρα) [6,7].

5.2.1 Πιληματοποιημένο φίλτρο (Felted filter).

Τα πιληματοποιημένα υφάσματα (τύπου τσόχας) γίνονται με τη συμπίεση ινών επάνω σε ένα υφασμένο υπόστρωμα. Οι ίνες είναι τοποθετημένες τυχαία (σε αντίθεση με το πλεγμένο). Η πρόσδεση στο υπόστρωμα γίνεται με χημικό τρόπο θερμότητα, ρητίνες κ.α Το στρώμα της σκόνης στηρίζεται στην επιφάνεια της τσόχας, αλλά μερικά σωματίδια διεισδύουν μέσα στην τσόχα. Τα φίλτρα αυτά είναι 2-3 φορές παχύτερα από τα υφασμάτινα. Κάθε τυχαία ίνα λειτουργεί ως στόχος συλλογής των σωματιδίων λόγω των μηχανισμών της πρόσκρουσης και ανάσχεσης. Οι τσόχες χρησιμοποιούνται γενικά σε σακόφιλτρα δόνησης με πεπιεσμένο αέρα.

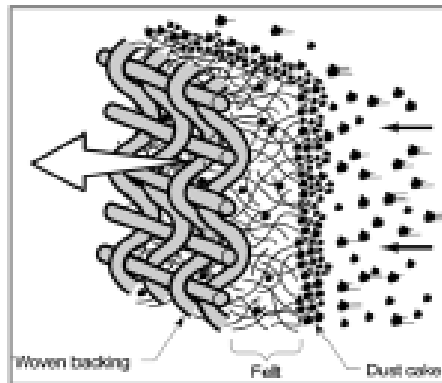


Η διαδικασία πιο παραστατικά δίνεται στην Εικ. 51. Παραδείγματα διηθητικών μέσων (μικροσκοπικά ή τεράστια συστήματα) επίσης φαίνονται στην Εικ. 50.

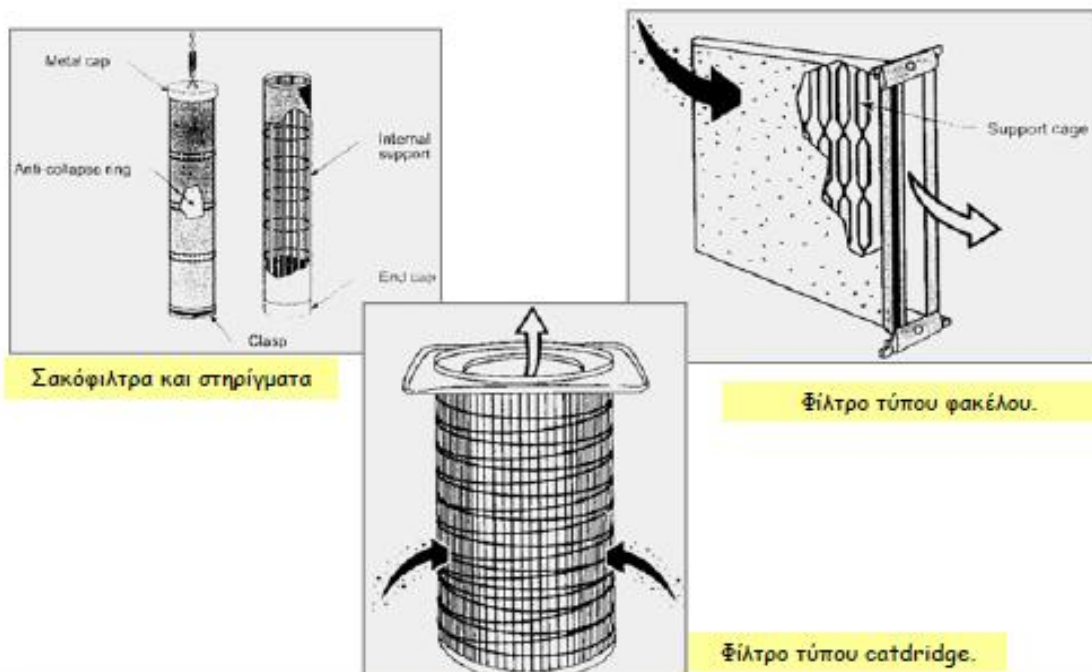
Ως προς τα τεχνικά στοιχεία του φίλτρου κυρίως προσοχή δίνεται στα στηρίγματα σύμφωνα με τα οποία το φίλτρο χαρακτηρίζεται ως τύπου φακέλου ή τύπου cartridge (Εικ. 42).



Εικόνα 50: Διηθητικά μέσα (μικροσκοπικά ή μεγάλου μεγέθους) [7].



Εικόνα 51: Διαδικασία φίλτρασης από πηληματοποιημένο φίλτρο [7].



Σακόφίλτρα και στηρίγματα

Φίλτρο τύπου φακέλου.

Φίλτρο τύπου cartridge.

Εικόνα 52: Τύποι φίλτρων ανάλογα με τα στηρίγματα [7].



5.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Σακόφιλτρων.

Τα πλεονεκτήματα των σακόφιλτρων συνοψίζονται σε κάποια βασικά χαρακτηριστικά όπως:

- Η λειτουργία των σακόφιλτρων είναι σχετικά απλή,
- Διαθέτουν πολύ υψηλές αποδόσεις γενικά σε χονδρά και λεπτά σωματίδια. Αυτά είναι σχετικά ανεπηρέαστα στις διακυμάνσεις των συνθηκών του αερίου ρεύματος. Η απόδοση κυμαίνεται ακόμα και σε 99% για μικρά σωματίδια,
- Η απόδοση και η πτώση πίεσης είναι σχετικά ανεπηρέαστες από μεγάλες αλλαγές στις φορτίσεις σκόνης στην είσοδο για συνεχώς καθαριζόμενα φίλτρα,
- Ο αέρας που εξέρχεται από το φίλτρο είναι πολύ καθαρός και μπορεί να ανακυκλωθεί μέσα στο εργοστάσιο με πολλούς τρόπους (π.χ για αερισμό),
- Τα συλλεγόμενα υλικά κατακρατούνται στεγνά για να ακολουθήσει η επεξεργασία,
- Αντίθετα από τα EPS τα συστήματα σακόφιλτρων, δεν απαιτούν τη χρήση υψηλής τάσης, επομένως η συντήρηση είναι απλή και η εύφλεκτη σκόνη μπορεί να συλλεχθεί με προσοχή,
- Οι συλλογείς των φίλτρων είναι διαθέσιμοι σε μεγάλο αριθμό διαμορφώσεων, με αποτέλεσμα την ύπαρξη ποικιλίας διαστάσεων και θέσεων φλάτζας στην είσοδο και στην έξοδο για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της εγκατάστασης.
- Η χρήση επιλεγμένου ή ινώδους – κοκκώδους φίλτρου βοηθά στην υψηλή απόδοση συλλογής καπνών και αερίων ρύπων,
- Μπορούν να επεξεργαστούν μεγάλο εύρος ογκομετρικών παροχών,
- Αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία που μπορούν να συναρμολογηθούν στη μονάδα,
- Μπορούν να λειτουργήσουν με διάφορα είδη σωματιδίων,
- Απαιτούν σχετικά χαμηλές πτώσεις πίεσης.

Τα μειονεκτήματα των σακόφιλτρων επίσης μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

- Απαιτούν μεγάλες επιφάνειες της στερεής έδρασης, απαιτείται κατασκευή,
- Τα υφάσματα αλλοιώνονται ή καταστρέφονται από υψηλές θερμοκρασίες και από διαβρωτικά μέσα,
- Δεν λειτουργούν σε περιβάλλον με υγρασία (τα φίλτρα γίνονται «τυφλά»),
- Υπάρχει πιθανότητα έκρηξης ή και φωτιάς,
- Οι θερμοκρασίες που υπερβαίνουν κατά πολύ τους 290C απαιτούν πυρίμαχο ορυκτό ή μεταλλικά υφάσματα τα οποία είναι ακριβά.
- Συγκεκριμένες σκόνες μπορεί να απαιτήσουν επεξεργασίες υφάσματος για τη μείωση διαρροής σκόνης ή σε άλλες περιπτώσεις βοηθούν στην απομάκρυνση της συλλεγόμενης σκόνης
- Συγκεντρώσεις κάποιας σκόνης στον συλλογέα, περίπου 50g/m³ μπορεί να εμφανίσει επικινδυνότητα για φωτιά ή έκρηξη εάν μια σπίθα ή φωτιά εξελιχθεί.
- Τα υφάσματα μπορεί να καούν εύκολα όταν συλλέγεται οξειδωτική σκόνη. Τα σακόφιλτρα έχουν σχετικά υψηλές απαιτήσεις συντήρησης (π.χ περιοδική αντικατάσταση σάκων).
- Η διάρκεια ζωής του υφάσματος μπορεί να μικρύνει σε υψηλές θερμοκρασίες και στην παρουσία όξινων ή αλκαλικών σωματιδίων ή στα συστατικά του αερίου.
- Δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε περιβάλλον με υγρασία, με υγροσκοπικά υλικά, με συμπύκνωση υγρασίας ή με πισσώδη κολλώδη συστατικά τα οποία μπορεί να προκαλέσουν κρούστα ή βούλωμα του υφάσματος ή να απιτηθούν ειδικά πρόσθετα,



- Απαιτείται αναπνευστική προστασία για το προσωπικό της συντήρησης κατά την αντικατάσταση των φίλτρων.
- Απαιτείται μέτρια πτώση πίεσης, τυπικά στην περιοχή των 100 – 250mm H₂O.
- Ένα συγκεκριμένο μειονέκτημα για μονάδες παλμού πεπιεσμένου αέρα που χρησιμοποιεί πολύ υψηλές ταχύτητες αερίου είναι ότι η σκόνη από τους καθαρισμένους σάκους μπορεί να οδηγηθεί αμέσως στους γειτονικούς. Εάν αυτό συμβεί, μικρή ποσότητα σκόνης πέφτει στη χοάνη και το στρώμα σκόνης πάνω στους σάκους γίνεται πολύ πυκνό. Για την πρόληψη αυτού, τα σακόφιλτρα με παλμούς πεπιεσμένου αέρα θα πρέπει να σχεδιαστούν με χωριστά τμήματα (διαμερίσματα) που μπορούν να απομονωθούν για τον καθαρισμό.

5.4 Συνθήκες Λειτουργίας.

Τα σακόφιλτρα διακρίνονται σε δύο ομάδες, τα τυπικά και τα κατά παραγγελία, τα οποία διακρίνονται περαιτέρω σε χαμηλή, μέτρια και υψηλή δυναμικότητα. Τα τυπικά σακόφιλτρα είναι μονάδες φθηνής βιομηχανικής κατασκευής. Αυτά μπορούν να χειριστούν λιγότερο από 0.10 έως και πάνω από 50Nm³/s. Τα κατά παραγγελία σακόφιλτρα σχεδιάζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές και κατασκευάζονται με προδιαγραφές του πελάτη. Οι μονάδες αυτές γενικά είναι μεγαλύτερες από τις τυπικές μονάδες δηλ. από 50 – 500.

Τυπικά θερμοκρασίες αερίου πάνω από 260°C με απότομες μεταβολές έως περίπου 290 °C μπορούν να εφοδιαστούν με κατάλληλο υλικό υφάσματος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ψυκτικές συσκευές ψεκασμού ή αραίωση αέρα για τη μείωση της θερμοκρασίας του ρυπασμένου ρεύματος. Αυτό αποτρέπει την υπέρβαση των ορίων θερμοκρασίας του υφάσματος. Παραπάνω μείωση της θερμοκρασίας παρά ταύτα, αυξάνει την υγρασία του ρυπασμένου ρεύματος. Έτσι η ελάχιστη θερμοκρασία του ρυπασμένου ρεύματος πρέπει να παραμείνει πάνω από το σημείο δρόσου κάθε συμπυκνώματος ουσίας του ρεύματος. Τα σακόφιλτρα και το δίκτυο αγωγών του θα πρέπει να μονωθούν και πιθανά να θερμανθούν εάν δημιουργούνται συνθήκες συμπύκνωσης.

Συνήθεις συγκεντρώσεις εισόδου στα σακόφιλτρα είναι (1 – 23) g/m³ αλλά σε εξαιρετικές περιπτώσεις οι συνθήκες εισόδου μπορεί να μεταβάλλονται μεταξύ 0.1 – 230 g/m³ [12,13]. Η επιφανειακή ταχύτητα διήθησης είναι γνωστή και ως λόγος αέρα / υφάσματος είναι ίση με την ογκομετρική παροχή του αερίου διαιρεμένη με την επιφάνεια του υφάσματος δηλ.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (5.2)$$

όπου V είναι η επιφανειακή ταχύτητα διήθησης σε m/min,
 Q είναι ογκομετρική παροχή του αερίου σε m³/min,
 A είναι η επιφάνεια του υφάσματος σε m².

Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος t_j , $t_j = t_f - t_r = (N-1)(t_r + t_c)$ το ύφασμα στο διαμέρισμα j έχει συσσωρευτεί μια τοπική πυκνότητα σκόνης W_j , (lb_m/ft^2) η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$W_j = (N-1)(V_N \cdot L \cdot t_r + V_{N-1} \cdot L \cdot t_c) \quad (5.3)$$

όπου L = φορτίο σε σωματίδια (lb_m/ft^2). Κατά συνέπεια η αντίσταση του φίλτρου στο διαμέρισμα j είναι

$$S_j = K_e + K_s \cdot W_j \quad (5.4)$$

όπου S_j είναι η αντίσταση του φίλτρου στο διαμέρισμα j σε (in H₂O/min/ft). Από τον Πίνακα 4.4 είναι δυνατό να εκτιμηθεί η πραγματική ταχύτητα διήθησης με τη βοήθεια της σχέσης:

$$V_j = f_N V_{N-1} \quad (5.5)$$



όπου V_j είναι η πραγματική ταχύτητα διήθησης στο διαμέρισμα j στο χρονικό διάστημα t_j και f_N είναι ένας συντελεστής διόρθωσης. Τέλος είναι δυνατός ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης ΔP_j , η οποία είναι ίση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση πίεσης ΔP_m , δηλ:

$$\Delta P_j = \Delta P_m = S_j V_j \quad (5.6)$$

όπου ΔP_j είναι η πτώση πίεσης στο διαμέρισμα j μετρημένη σε in H₂O.

Πίνακας 5.1:

Θερμοκρασία και Χημική Αντίσταση συνηθισμένων βιομηχανικών υφασμάτων.

Υφασμα	Συνιστώμενη	Χημική Αντίσταση	
	Μέγιστη Θερμο- κρασία °F	Οξύ	Βάση
Dyrel	160	Καλή	Καλή
Βαμβάκι	180	Χαμηλή	Καλή
Μαλλί	200	Καλή	Χαμηλή
Νάιλον	200	Χαμηλή	Καλή
Πολυπροπυλένιο	200	Εξαιρετική	Εξαιρετική
Orlon	260	Καλή	Μέτρια
Dacron	275	Καλή	Μέτρια
Nomex*	400	Μέτρια	Καλή
Teflon*	400	Εξαιρετική	Εξαιρετική
Υαλο-ύφασμα	550	Καλή	Καλή

Πίνακας 5.2 Λόγος πραγματικής ταχύτητας διήθησης V_j προς τη μέση ταχύτητα διήθησης VN-1 σε σακόφιλτρο πολλαπλών διαμερισμάτων.

Συνολικός Αριθμός Διαμερισμάτων, N	$f_N = V_j / V_{N-1}$
3	0.87
4	0.80
5	0.76
7	0.71
10	0.67
12	0.65
15	0.64
20	0.62

Επειδή οι σάκοι καθαρίζονται με τη μέθοδο παλμών πεπιεσμένου αέρα δεν έχουν ανάγκη να βρίσκονται απομονωμένοι για τον καθαρισμό, τα σακόφιλτρα αυτά δεν έχουν ανάγκη για πρόσθετα τμήματα προκειμένου να διατηρήσουν το φιλτράρισμα σε ικανοποιητικό επίπεδο κατά τη διάρκεια του καθαρισμού. Επίσης λόγω της έντονης και συχνής διαδικασίας καθαρισμού, είναι δυνατή η επεξεργασία υψηλότερων παροχών αερίου με υψηλότερες φορτίσεις σκόνης. Έτσι τα συγκεκριμένα σακόφιλτρα μπορούν να είναι μικρότερα από άλλους



τύπους σακόφιλτρων για την επεξεργασία της ίδιας ποσότητας αερίου σκόνης, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο μεγαλύτερους λόγους αερίου προς ύφασμα. [12].

Η πτώση πίεσης μέσω ενός σακόφιλτρου δόνησης με αέρα υπό πίεση έχει συσχετισθεί με την ταχύτητα διήθησης, την πίεση του παλμού και την τοπική πυκνότητα της σκόνης που εναποτίθεται κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φιλτραρίσματος. Ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε για την ιπτάμενη τέφρα που συλλέγεται σε πολυεστερικούς σάκους συνοψίζεται στη μαθηματική έκφραση:

$$\Delta P = 2.72 \Delta W^{0.45} P^{-1.38} V^{2.34} \quad (5.7)$$

όπου V είναι η ταχύτητα διήθησης σε cm/s ,

P είναι η πίεση του παλμού σε atm .

ΔW είναι η τοπική πυκνότητα σκόνης που προστίθεται μεταξύ δύο διαδοχικών καθαρισμών σε mg/cm^2 δηλ.

$$\Delta W = L \cdot V \cdot t_f \quad (5.8)$$

5.5 Θεωρία Πτώσης Πίεσης – Μοντέλο Αντίστασης Φίλτρου.

Θεωρείται πλεγμένο ύφασμα με διάμετρο ίνας 100-150 μm και ανοίγματα μεταξύ των ινών 50-75 μm . Στα αρχικά στάδια η απόδοση του σακόφιλτρου είναι χαμηλή αλλά με την πάροδο του χρόνου, λόγω μηχανισμών πρόσκρουσης, ανάσχεσης και διάχυσης, τα σωματίδια θα συσσωρευτούν και θα καλύψουν τα ανοίγματα, δημιουργώντας ένα στρώμα οπότε και η απόδοση του φίλτρου θα αυξηθεί.

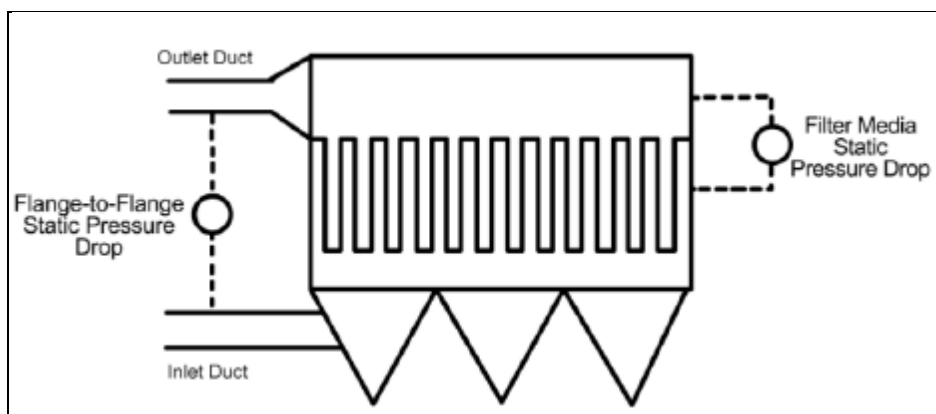
Αναφορικά με την πτώση πίεσης ΔP στο σακόφιλτρο αυτή δίνεται ως:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_s \quad (5.9)$$

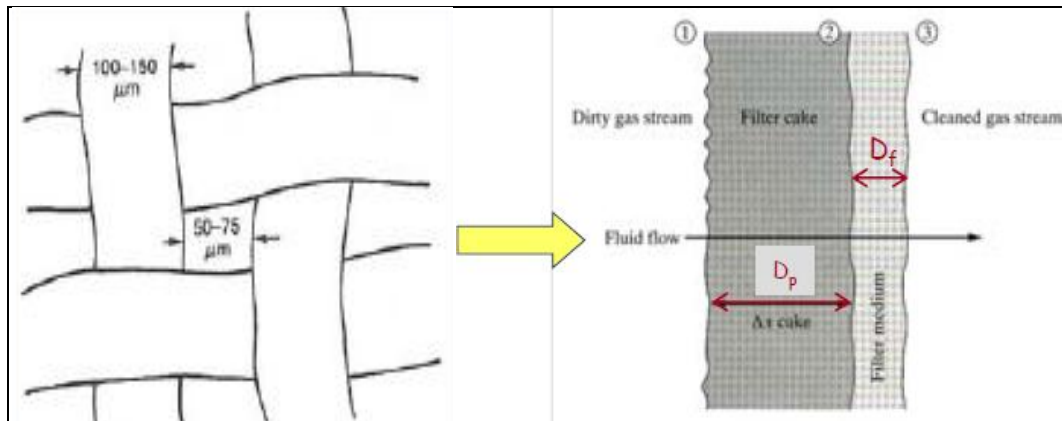
Όπου ΔP_f η πτώση πίεσης λόγω του υφάσματος,

ΔP_p η πτώση πίεσης λόγω του στρώματος των σωματιδίων,

ΔP_s η πτώση πίεσης λόγω της κατασκευής του σακόφιλτρου.



Εικόνα 53: Σημεία μέτρησης διαφοράς - πτώσης πίεσης. [6,7]



Εικόνα 54: Διαδικασία εισδοχής ακάθαρτον αέρα μέσα από το πορώδες [6,7].

Από την εξίσωση Darcy-Weisbach για ροή σε πορώδη μέσα πιο αναλυτικά είναι:

$$\Delta P_f = \frac{D_f \mu v}{K_f} \quad (5.10)$$

$$\Delta P_p = \frac{D_p \mu v}{K_p} \quad (5.11)$$

όπου D_f , D_p είναι το βάθος του φίλτρου και του στρώματος (m),

μ είναι το ιξώδες του αερίου (kg/m s),

v είναι η επιφανειακή ταχύτητα διήθησης, δηλ. ο λόγος της ογκομετρικής παροχής του αέρα /επιφάνεια του υφάσματος δηλ. $v=Q/A$,

K_f , K_p είναι η διαπερατότητα του φίλτρου και του στρώματος (m^2).

Καθώς το φίλτρο λειτουργεί το βάθος του στρώματος D_p θα αυξάνει. Ειδικότερα για σταθερή ταχύτητα και συγκέντρωση η παράμετρος D_p αυξάνει γραμμικά. Η μαθηματική έκφραση είναι:

$$D_p = \frac{Lvt}{\rho_L} \quad (5.12)$$

όπου L η φόρτιση σε σκόνη (kg/m^3),

t ο χρόνος λειτουργίας (s),

ρ_L η πυκνότητα στρώματος σωματιδίων (kg/m^3).

Αντικαθιστώντας στην (5.2) προκύπτει:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \cancel{\Delta P_s} = \frac{D_f \mu v}{K_f} + \frac{D_p \mu v}{K_p} \Rightarrow \Delta P = \frac{D_f \mu v}{K_f} + \frac{\mu v}{K_p} \left(\frac{Lvt}{\rho_L} \right) \quad (5.13)$$

Εισάγοντας τις παραμέτρους,

$S = \frac{\Delta P}{v}$ S είναι η αντίσταση του φίλτρου (filter drag $N s/m^3$),

$W = Lvt$ W είναι η επιφανειακή πυκνότητα σκόνης (aeral dust density υφάσματος kg/m^2),

και διαιρώντας με την ταχύτητα v η σχέση (5.6) γίνεται:



$$\Delta P = \frac{D_f \mu v}{K_f} + \frac{\mu v}{K_p} \left(\frac{L v t}{\rho_L} \right) \Rightarrow \frac{\Delta P}{v} = \frac{D_f \mu}{K_f} + \frac{\mu}{K_p} \left(\frac{L v t}{\rho_L} \right) \Rightarrow \frac{\Delta P}{v} = \frac{D_f \mu}{K_f} + \frac{\mu}{\rho_L K_p} W \Rightarrow$$

$$\boxed{S = K_1 + K_2 W} \quad \text{όπου} \quad \begin{cases} K_1 = \frac{D_f \mu}{K_f} \\ K_2 = \frac{\mu}{\rho_L K_p} \end{cases} \quad (5.14)$$

Το μοντέλο που περιγράφεται είναι το γνωστό **Μοντέλο Αντίστασης Φίλτρου (Filter drag)**, στο οποίο όμως οι συντελεστές K_1, K_2 δύσκολα μπορούν να προσδιοριστούν. Επειδή για πρακτικά προβλήματα οι συντελεστές K_1, K_2 δεν μπορούν να εκτιμηθούν εύκολα, η εξίσωση Μοντέλου Αντίστασης Φίλτρου επαναδιατυπώνεται ως εξής:

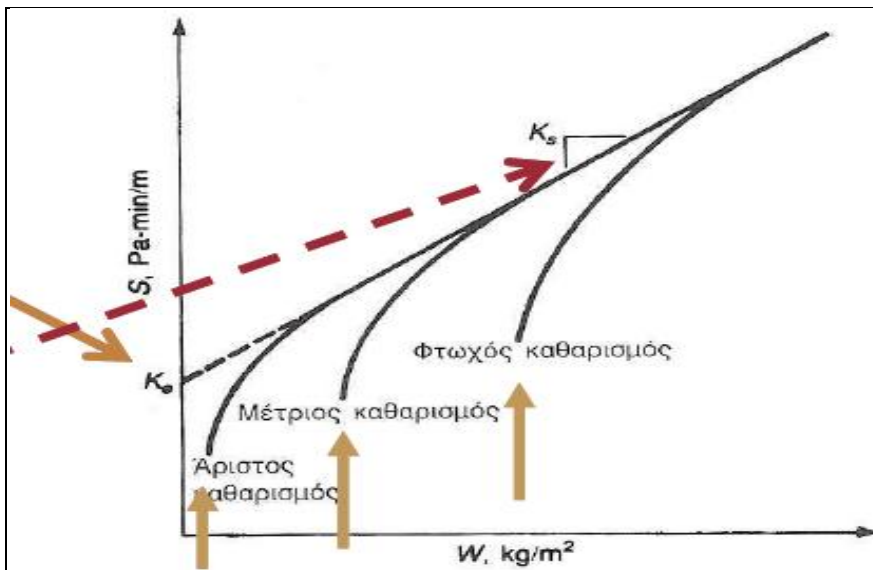
$$\boxed{S = K_e + K_s W} \quad \text{όπου } K_e \text{ η προεκταμένη αντίσταση φίλτρου από καθαρό ύφασμα (N s/m}^3\text{),}$$

$$K_s \text{ η «κλίση», σταθερή για συγκεκριμένο αέριο, σκόνη και ύφασμα (N s/kg m).}$$

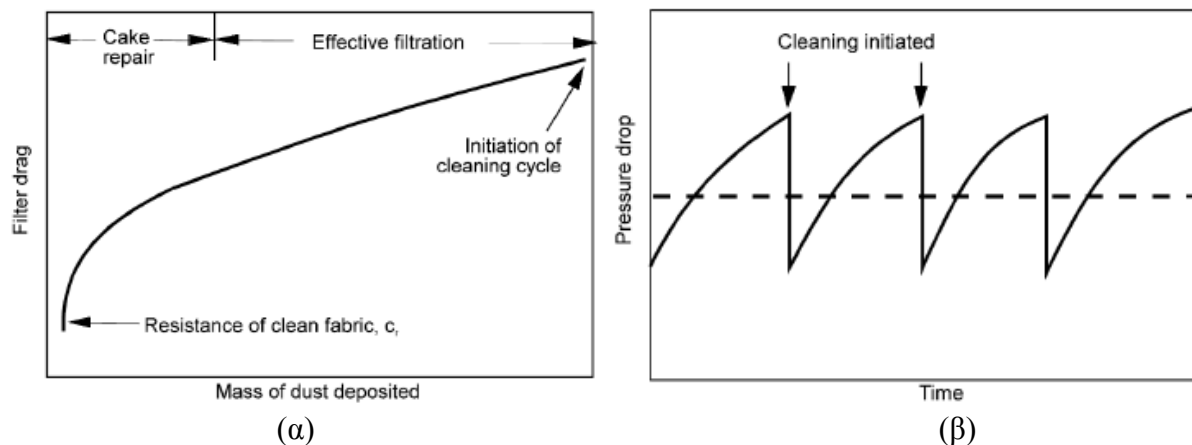
Οι παράμετροι K_e, K_s προσδιορίζονται εμπειρικά με εργαστηριακές δοκιμές σε αέριο με σκόνη παρόμοια με τη σκόνη της βιομηχανίας. Το K_s μεταβάλλεται με την τετραγωνική ρίζα της ταχύτητας v .

$$K_{s2} = K_{s1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{1/2} \quad (5.15)$$

Τυπικές καμπύλες της αντίστασης φίλτρου σε σχέση με την πυκνότητα της σκόνης για διάφορους βαθμούς καθαρισμού φαίνονται στην Εικ.45. Πρακτικά με βάση δεδομένα δοκιμών για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα λειτουργίας, τη φόρτιση και την ταχύτητα μετράται η πτώση πίεσης σε τακτά χρονικά διαστήματα και εκτιμώνται από την καμπύλη οι παράμετροι K_e, K_s .



Εικόνα 55: Εμπειρικός προσδιορισμός συντελεστών K_e, K_s , ως προς την υπολειμματική σκόνη [7].



Εικόνα 56: (α) Αντίσταση του φίλτρου S , σε σχέση με τη μάζα που συλλέγεται σε ένα απλό σακόφιλτρο, (β) Συνολική πτώση πίεσης σε ένα σακόφιλτρο πολλαπλών διαμερισμάτων [7].

5.6 Επιλογή τύπου φίλτρου.

Κατά την επιλογή φίλτρου ο στόχος είναι ένα καλά σχεδιασμένο και συντηρημένο σακόφιλτρο που θα λειτουργεί σωστά. Ο τύπος του σακόφίλτρου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την οξύτητα του αερίου ρεύματος, τα χαρακτηριστικά της σκόνης, το λόγο διήθησης, τον τρόπο καθορισμού του αλλά και από την προηγούμενη εμπειρία για παρόμοιες σκόνες.

Επειδή τα σακόφιλτρα δημιουργούν επιπλέον πτώση πίεσης σε κάθε κατεργασία θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ανεμιστήρας ή συμπιεστής ή άλλο μέσο προώθησης του αερίου ρεύματος. Συνήθως εγκαθίσταται στην «καθαρή» έξοδο του συστήματος των σακόφίλτρων. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να προσμετρηθούν στην επιλογή του σακόφίλτρου είναι η υγρασία, ο χημικός χαρακτηρισμός της σκόνης, η ευφλεκτότητα ή εκρηκτικότητα του υλικού, η χωροθέτηση των σάκων, ο χειρισμός της σκόνης καθώς τέλος και η θέση του ανεμιστήρα.

Από τους πιο σημαντικούς παράγοντες (τεχνικούς και οικονομικούς), στην επιλογή φίλτρου είναι ο τρόπος καθαρισμού του καθώς και ο λόγος διήθησης ή η ταχύτητα διήθησης. Από αυτή την άποψη συνήθως επιλέγονται σακόφιλτρα με ρεύμα αντίθετης ροής (αντιπαράλληλης ως προς τη ροή της σκόνης) με μηχανική δόνηση. Είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο και υπάρχει μεγάλη εμπειρία στο σχεδιασμό. Σημαντικός παράγοντας επίσης είναι η επιλογή του υφάσματος που θα «ντύσει» το σακόφιλτρο.

5.7 Σακόφιλτρα δόνησης με αέρα υπό πίεση.

Ο καθαρισμός των σακόφίλτρων με παλμούς πεπιεσμένου αέρα είναι σχετικά νέα μέθοδος σε σύγκριση με τους άλλους τύπους σακόφίλτρων. Έχει χρησιμοποιηθεί μόνο τα τελευταία 40 χρόνια. Αυτός ο μηχανισμός καθαρισμού έχει σταθερά αναπτυσσόμενη αναγνώριση επειδή μπορεί να χειριστεί μεγάλες φορτίσεις σκόνης, λειτουργεί σε σταθερή πίεση και καταλαμβάνει λιγότερο χώρο από τους άλλους τύπους σακόφίλτρων. Τα σακόφιλτρα με παλμούς πεπιεσμένου αέρα μπορούν να λειτουργήσουν μόνο ως διατάξεις με εξωτερική συλλογή κρούστας. Οι σάκοι είναι κλειστοί στον πυθμένα και ανοικτοί στην κορυφή και στηρίζονται με εσωτερικά συστήματα συγκράτησης που ονομάζονται κλουβιά. Το ρεύμα αερίου με τα σωματίδια οδηγείται στους σάκους χρησιμοποιώντας συχνά διαχυτήρες για πρόληψη καταστροφής των σάκων από υπερμεγέθη σωματίδια. Το αέριο ρέει από την

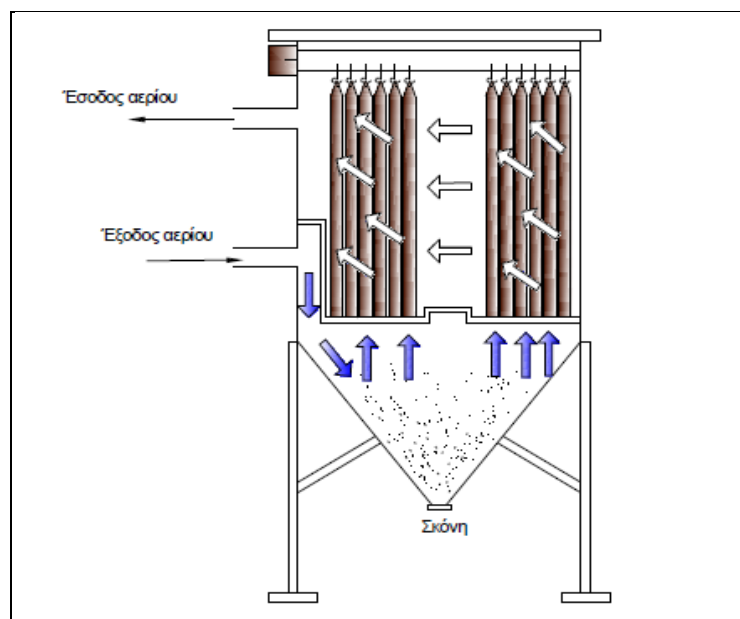


εξωτερική πλευρά των σάκων προς την εσωτερική και στη συνέχεια εξέρχονται τα απαέρια. Τα σωματίδια συλλέγονται στην εξωτερική επιφάνεια των σάκων και πέφτουν μέσα σε μια χοάνη που βρίσκεται στο κάτω μέρος του σακόφιλτρου.

Κατά τη διάρκεια καθαρισμού με παλμούς πεπιεσμένου αέρα, μια μικρή ριπή αέρα διάρκειας 0.03 – 0.1 s υψηλής πίεσης (415 – 830 kPa) εισάγεται μέσα στους σάκους. Ο παλμός μεταφέρεται με ακροφύσιο Venturi στην κορυφή των σάκων και δημιουργεί ένα κύμα έκρηξης που μεταφέρεται μέχρι τον πυθμένα του σάκου. Το κύμα κάμπτεται το ύφασμα, σπρώχνοντας τα μακριά από το κλουβί και στη συνέχεια το ξαναφέρνει πίσω απομακρύνοντας την κρούστα σκόνης. Ο κύκλος καθαρισμού ρυθμίζεται από έναν απομακρυσμένο χρονοδιακόπτη που είναι συνδεδεμένος με μαγνητικό επιστόμιο. Η ριπή αέρα ελέγχεται από το μαγνητικό επιστόμιο και απελευθερώνεται στους αγωγούς οι οποίοι έχουν ακροφύσια που είναι τοποθετημένα ακριβώς πάνω από τους σάκους. Οι σάκοι συνήθως καθαρίζονται κατά σειρά.

Υπάρχουν αρκετά μοναδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του καθαρισμού με παλμούς πεπιεσμένου αέρα. Επειδή ο παλμός είναι πολύ βραχύβιος, η ροή του ρυπασμένου αερίου δεν σταματάει κατά τη διάρκεια του καθαρισμού. Οι άλλοι σάκοι συνεχίζουν το φιλτράρισμα, αναλαμβάνοντας την πρόσθετη υποχρέωση εξαιτίας του καθαρισμού των σάκων. Γενικά δεν υπάρχει αλλαγή στην πτώση πίεσης του σακόφιλτρου ή στη λειτουργία εξαιτίας του καθαρισμού με παλμούς πεπιεσμένου αέρα. Αυτό καθιστά το συγκεκριμένο τύπο σακόφιλτρων να λειτουργούν συνεχώς με μαγνητικό επιστόμιο ως το μοναδικό σημαντικό κινούμενο τμήμα.

Ο καθαρισμός με παλμούς πεπιεσμένου αέρα είναι επίσης πολύ έντονος και πραγματοποιείται με τη μεγαλύτερη συχνότητα από τις άλλες μεθόδους καθαρισμού των σακόφιλτρων. Αυτός ο έντονος καθαρισμός απελευθερώνει σχεδόν όλη την κρούστα σκόνης κάθε φορά που πάλλεται ο σάκος. Ως αποτέλεσμα το φιλτράρισμα στα σακόφιλτρα με παλμούς πεπιεσμένου αέρα δεν βασίζεται στην κρούστα σκόνης. Σε αυτού του τύπου τον καθαρισμό χρησιμοποιούνται τσόχινα (δηλ. χωρίς πλέξη) υφάσματα επειδή ακριβώς δεν απαιτείται η ύπαρξη κρούστας σκόνης για να επιτευχθούν υψηλές αποδόσεις συλλογής. Αντίθετα έχει βρεθεί ότι υφάσματα με πλέξη που χρησιμοποιήθηκαν σε σακόφιλτρα αυτού του τύπου είχαν ως αποτέλεσμα τη διαφυγή μεγάλου μέρους της σκόνης μετά τον καθαρισμό τους.

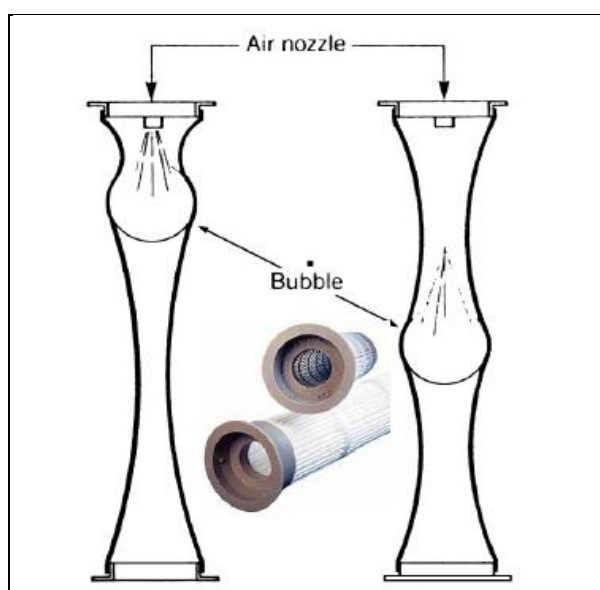


Εικόνα 57: Σακόφιλτρα με μηχανική δόνηση.



Η συχνότητα καθαρισμού γίνεται ως εξής: Μια σειρά από σάκους κάθε φορά με μια αλληλουχία μιας γραμμής μετά την άλλη. Η ακολουθία μπορεί να είναι τέτοια ώστε μη γειτονικές σειρές να καθαρίζονται η μία μετά την άλλη. Η έναρξη του καθαρισμού μπορεί να προκληθεί από διακόπτη στη μέγιστη πτώση πίεσης ή μπορεί να είναι και συνεχής.

Η κίνηση των σάκων μπορεί να προκαλείται από ένα κύμα σοκ που περνά κάτω από το σάκο. Με τον τρόπο αυτό ο σάκος διαστέλλεται από την κλούβα στιγμιαία. Η διαδικασία μπορεί να συμβαίνει κατά τη διάρκεια που ρεύμα αέρα περνά μέσα από τους σάκους αν και τα τελευταία χρόνια ως πιο αποτελεσματική μέθοδος κρίνεται ο καθαρισμός διαμερισμάτων που τίθενται εκτός της γραμμής προκειμένου να καθαριστούν ανεξάρτητα. Ως προς τη διάρκεια ο συμπιεσμένος αέρας (100psi) δίνεται με παλμό (ριπή αέρα) διάρκειας 0.1s με τη σειρά των σακόφιλτρων να είναι πάντα εκτός γραμμής. Οι διαστάσεις των σάκων σε αυτή την περίπτωση μπορούν να είναι 5 -6 ίντσες.



Εικόνα 58: Σακόφιλτρο δόνησης με αέρα υπό πίεση.

Πίνακας 5.3 Μέγιστες ταχύτητες διήθησης για διάφορες σκόνες ή καπνούς σε σακόφιλτρα δόνησης με αέρα υπό πίεση.

Σκόνες ή καπνοί	Μέγιστη Ταχύτητα Διήθησης (cfm/ft ²) ή (ft/min)
Άνθρακας, Γραφίτης, ατμοί μεταλλουργίας, σαπούνι, καθαριστικά, οξείδιο του ψευδαργύρου	5 - 6
Τσιμέντο (ακατέργαστο), άργιλος, πλαστικά, χρωστικές ουσίες, άμυλο, ξυλόσκονη, ψευδάργυρος	7 - 8
Οξείδιο του αλουμινίου, τσιμέντο (φινιρισμένο), άργιλος υαλοποιημένη, ασβέστος, ασβεστόλιθος, γύψος, μαρμαριγιάς, χαλαζιάς	9 - 11
Αλεύρι, σκόνη δέρματος, καπνός	12 - 14

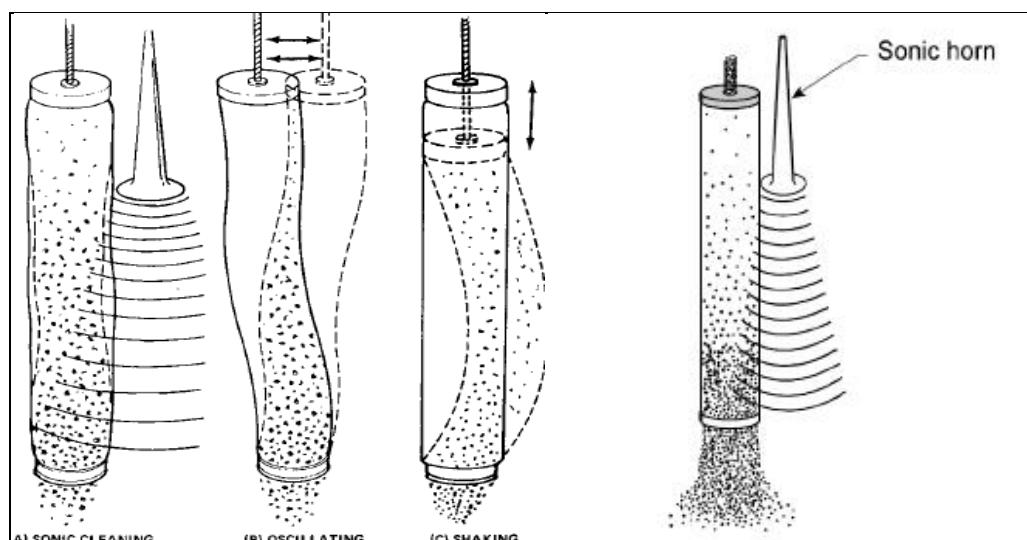


5.7.1 Σακόφιλτρα με ηχητική δόνηση (*shaker*)

Ο καθαρισμός των σακόφιλτρων με ηχητική δόνηση περιλαμβάνει τρία μέρη. Αρχικά ένας ηχητικός παλμός διαβιβάζεται στο σάκο και η σκόνη αναμιγνύεται μέσα στο σακόφιλτρο, το οποίο πάλλεται οριζόντια από το άνω σημείο στήριξής του ενώ τέλος ο σάκος τινάζεται (κατακόρυφα) προκειμένου η σκόνη να κατακαθίσει στη βάση και στη συνέχεια να πέσει μέσα στη χοάνη περισυλλογής. Συνήθως οι ηχητικές δονήσεις χρησιμοποιούνται παράλληλα με κάποιον άλλο μηχανισμό καθαρισμού [14].

Οι παράμετροι καθαρισμού για σακόφιλτρα με ηχητική δόνηση δίνονται στον παρακάτω πίνακα [15]:

Συχνότητα	Συνήθως αρκετοί κύκλοι ανά δευτερόλεπτο ρυθμιζόμενοι
Κίνηση	Απλή αρμονική ή ημιτονοειδής ταλάντωση
Μέγιστη επιτάχυνση	(1 – 10)g
Κίνηση σάκου	Κλάσμα της ίντσας έως μερικές ίντσες
Τρόπος λειτουργίας	Διαμέρισμα εκτός ρεύματος για καθαρισμό
Διάρκεια	(10 – 100) κύκλοι ή (30s – λίγα min)
Συνήθεις διαστάσεις σάκου	5, 8 ή 12 ίντσες διάμετρος, 8, 10, 22 ή 30 πόδια μήκος



Εικόνα 59: Σακόφιλτρα με ηχητική δόνηση (*shaker*) [7].

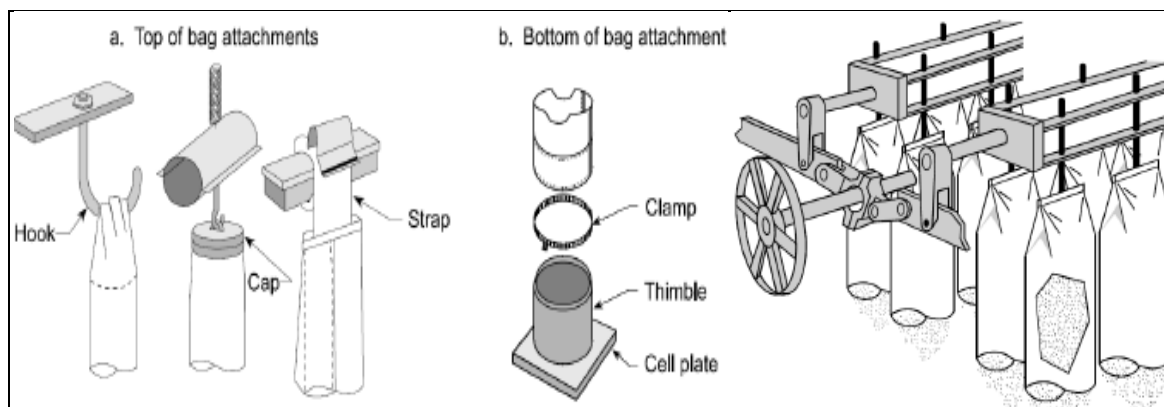
5.7.2 Σακόφιλτρα με μηχανική δόνηση (*shaker*)

Η μηχανική δόνηση ήταν η δημοφιλής μέθοδος καθαρισμού για πολλά χρόνια λόγω της απλής και της αποτελεσματικής διαδικασίας. Σε συνήθη λειτουργία το αέριο που περιέχει σκόνη εισέρχεται μέσω του αγωγού εισόδου στο σακόφιλτρο δονούμενου καθαρισμού και τα πολύ μεγάλα σωματίδια απομακρύνονται από το ρεύμα όταν αυτά προσκρούουν στο διάφραγμα στον αγωγό εισόδου και πέφτουν στη χοάνη. Το αέριο με τα σωματίδια έλκεται από το κάτω μέρος μιας κυψελοειδούς πλάκας στο πάτωμα και μέσα στα σακόφιλτρα. Το αέριο προχωρά από το εσωτερικό των σάκων προς το εξωτερικό και μέσω του αγωγού εξόδου. Τα σωματίδια συλλέγονται στην εσωτερική επιφάνεια των σάκων και συσσωρεύεται μια κρούστα. Στις μονάδες μηχανικής δόνησης, οι κορυφές των σάκων προσαρμόζονται σε μια δοκό δόνησης η οποία κινείται απότομα σε οριζόντια συνήθως διεύθυνση για τον καθαρισμό των

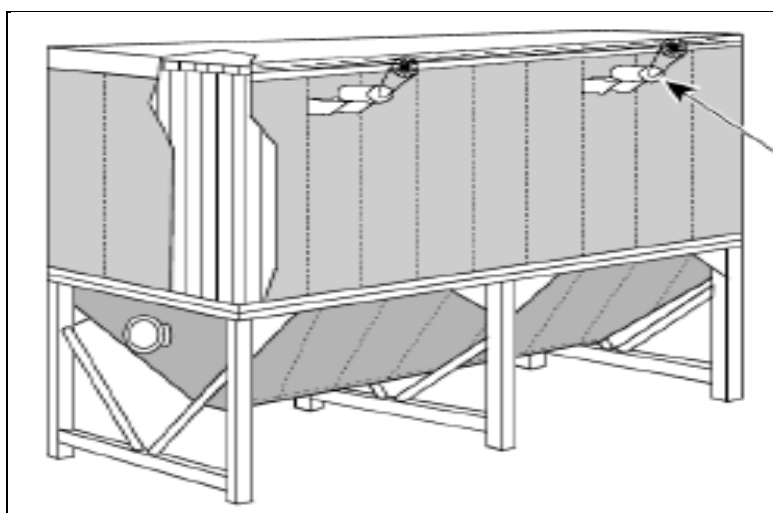


σάκων. Οι δοκοί δόνησης λειτουργούν με μηχανικούς κινητήρες ή με το χέρι, σε εφαρμογές όπου ο καθαρισμός δεν απαιτείται να είναι συχνός.

Η παλμική μέθοδος καθαρισμού είναι παρόμοια με τις μονάδες μηχανικής δόνησης. Αυτή χρησιμοποιεί πνευματική κίνηση υψηλής συχνότητας, χαμηλού εύρους παλμού του πλαισίου του σάκου για τον καθαρισμό των σάκων. Η μέθοδος αυτή έχει περιορισμένη εφαρμογή η οποία οφείλεται στη χαμηλή ενέργεια καθαρισμού και στο σχεδιασμό μικρότερων σακόφιλτρων.



Εικόνα 60: Πρόσδεση του σάκου στη συσκευή δόνηση [6, 7].



Εικόνα 61: Τυπικό σακόφιλτρο με δόνηση όπου με το βέλος δίνεται η θέση του κινητήρα τινάγματος [7].

5.8 Σακόφιλτρα με ρεύμα αντίθετης ροής και μηχανική δόνηση.

Ο συγκεκριμένος τύπος σακόφιλτρου κατασκευάζεται με πολλά διαμερίσματα. Για τον καθαρισμό, ένα διαμέρισμα απομονώνεται από τη ροή, εφαρμόζεται η αντίθετη ροή ή η μηχανική δόνηση και συγκεντρώνεται η σκόνη στο συλλέκτη. Η αντίθετη ροή αν και εκ πρώτης άποψης φαίνεται λιγότερο αποτελεσματική από μόνης της, έχει το πλεονέκτημα ότι με τη βοήθεια μιας ηχητικής χοάνης που προκαλεί δόνηση βοηθάει στην απομάκρυνση της σκόνης.



Πίνακας 5.4 Μέγιστες Ταχύτητες Διήθησης για διάφορες σκόνες σε σακόφιλτρα μηχανικής δόνησης αντίθετης ροής αέρα.

Σκόνες	Μέγιστη Ταχύτητα Διήθησης (cfm/ft ²) ή (ft/min)
Ξυλάνθρακας, Μαύρος άνθρακας, Απορρυπαντικά, Ατμοί μετάλλων.	1.50
Οξείδιο του αλουμινίου, άνθρακας, Λιπάσματα, Γραφίτης, Μετάλλευμα σιδήρου, Οξείδιο του ασβεστίου, Χρώματα, Ιπτάμενη τέφρα, Χρωστικές ουσίες.	2.0
Αργίλιο, Άργιλος, Κωκ, Οξείδιο του Μολύβδου, Μαρμαρυγία, Σαπούνι, Ζάχαρη	2.25
Βωξίτης, Κεραμικά, Ορυκτό Χρώμιο, Αλεύρι, Πυρόλιθος, Γυαλί, Γύψος, Τσιμέντο.	2.50
Αμίαντος, Ασβεστόλιθος, Χαλαζίας, Διοξείδιο του Πυριτίου	2.75
Φελλός, Ζωοτροφές και Δημητριακά, Μάρμαρο, Αλάτι	3.00 – 3.25
Δέρμα, Χαρτί, Καπνός, Ξύλο	3.50

Ο καθαρισμός με ρεύμα αέρος αντίθετης ροής είναι μια δημοφιλής μέθοδος καθαρισμού που έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς και βελτιώνεται για πολλά χρόνια. Είναι ένας ήπιος αλλά μερικές φορές λιγότερο αποτελεσματικός μηχανισμός καθαρισμού από τον μηχανικό καθαρισμό. Τα περισσότερα σακόφιλτρα με καθαρισμό αντίθετης ροής λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με αυτά του μηχανικού καθαρισμού. Τυπικά οι σάκοι είναι ανοικτοί στη βάση και κλειστοί στην κορυφή και η ροή του αερίου είναι από το εσωτερικό προς το εξωτερικό των σάκων με τη σκόνη να δεσμεύεται εσωτερικά του σάκου. Πάντως σε μερικούς σχεδιασμούς αυτού του τύπου σακόφιλτρων η σκόνη συλλέγεται στο εξωτερικό μέρος των σάκων. Και στους 2 σχεδιασμούς ο καθαρισμός αντίθετης ροής ρεύματος αέρα γίνεται κατευθύνοντας τον καθαρό αέρα σε αντίθετη διεύθυνση από αυτή του ρυπασμένου αέρα. Η αλλαγή κατεύθυνσης της ροής του αερίου προκαλεί την κάμψη του σάκου και το σκάσιμο της κρούστας. Στην εσωτερική συλλογή κρούστας επιτρέπεται η κατάρρευση των σάκων σε κάποιο βαθμό κατά τη διάρκεια του καθαρισμού με αντίθετη ροή αέρα. Συνήθως, η κατάρρευση των σάκων προλαμβάνεται πλήρως από κάποιο είδος στήριξης όπως δακτύλιοι που είναι ραμμένοι στους σάκους. Τα στηρίγματα δίνουν τη δυνατότητα στην κρούστα να μειωθεί από τους σάκους και να οδηγηθεί στη χοάνη. Η απελευθέρωση της κρούστας υποβοηθάται από την αντίθετη ροή του αερίου. Επειδή στα τσόχινα υφάσματα παραμένει σκόνη περισσότερο από τα υφάσματα με πλέξη, ο καθαρισμός τους είναι πιο δύσκολος και συνεπώς τα τσόχινα υφάσματα δεν χρησιμοποιούνται στα συστήματα καθαρισμού με αντίθετη ροή αέρα.

Μέχρι σήμερα είναι διαδεδομένες πολλές μέθοδοι αντιστροφής της ροής του αέρα μέσα από τα φίλτρα. Η πιο κοινή προσέγγιση όπως συμβαίνει και με τα συστήματα καθαρισμού με μηχανική δόνηση είναι η διατήρηση χωριστών τμημάτων στο σακόφιλτρο κατά τρόπο ώστε κάθε τμήμα εύκολα να απομονώνεται και να καθαρίζεται χωριστά ενώ τα υπόλοιπα τμήματα να συνεχίζουν να καθαρίζουν το ρυπασμένο αέρα.

Μια από τις μεθόδους είναι η αντιστροφή της ροής του αέρα με τη χρήση ενός δεύτερου ανεμιστήρα ή καθαρισμένου αέρα από τα άλλα τμήματα. Ο καθαρισμός με αντιστροφή του αέρα χρησιμοποιείται μόνο στις περιπτώσεις που η σκόνη μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα από



το φίλτρο. Πολλές φορές η αντιστροφή του αέρα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με δόνηση ή υπό πίεση με ηχητικές χοάνες. [12].

5.8.1 Αριθμός διαμερισμάτων (compartments).

Σε ένα σύστημα ρεύματος αέρα αντίθετης ροής, ο καθαρός αέρας αποστέλλεται μέσω των σάκων στο απομονωμένο διαμέρισμα με κατεύθυνση αντίθετη αυτής της κανονικής ροής για να αποσπασθεί το στρώμα των σωματιδίων. Σε ένα σακόφιλτρο μηχανικής δόνησης, οι σάκοι τινάζονται προκειμένου να αποσπασθεί η προηγούμενη συλλεγμένη σκόνη. Και στις δύο περιπτώσεις πάντως τα μεγάλα κομμάτια και τα πιθανά συσσωματώματα πέφτουν μέσα σε έναν συλλεκτήρα στο κάτω μέρος του διαμερίσματος. Η σκόνη απομακρύνεται περιοδικά από το συλλέκτη και διατίθεται ή επαναχρησιμοποιείται εάν αυτό είναι εφικτό.

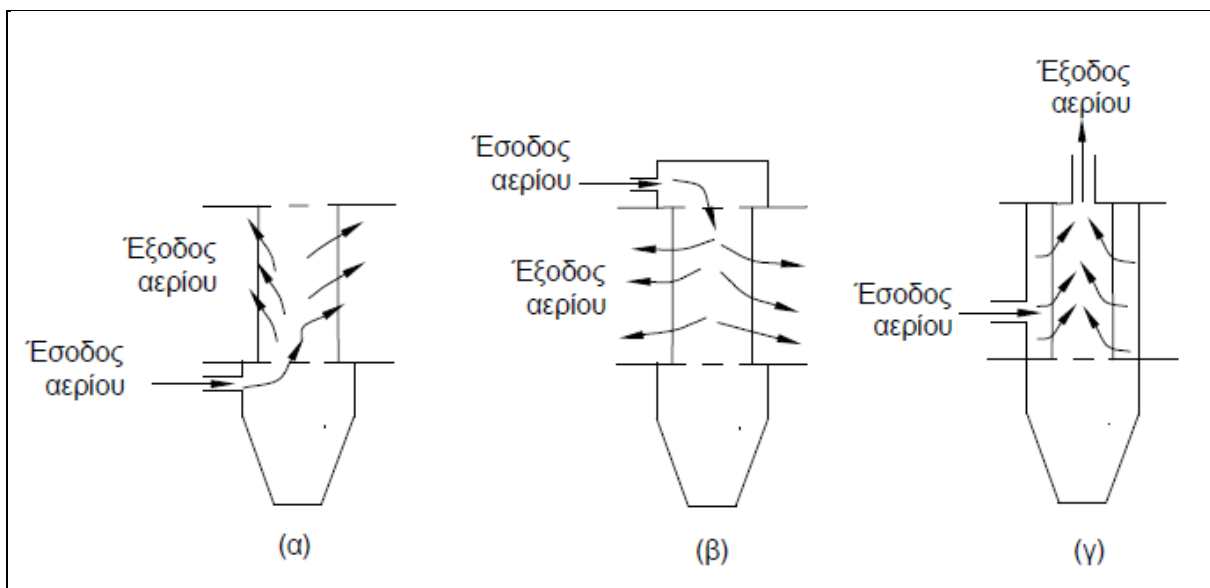
Ο αριθμός των διαμερισμάτων που επιλέγεται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού εξαρτάται από τη συνολική ροή προς διήθηση, τη διαθέσιμη ή την επιθυμητή μέγιστη πτώση πίεσης ΔP_m το χρόνο διήθησης t_f που είναι επιθυμητός ανάμεσα σε δύο καθαρισμούς του ίδιου διαμερίσματος και τον απαιτούμενο χρόνο για τον καθαρισμό ενός διαμερίσματος t_c . Το χρονικό διάστημα ανάμεσα στους καθαρισμούς οποιονδήποτε δύο διαμερισμάτων είναι ο χρόνος λειτουργίας t_r .

Ο χρόνος διήθησης t_f είναι ο χρόνος που παρέχεται από τη στιγμή που ένα διαμέρισμα επιστρέφει σε λειτουργία μέχρι το ίδιο διαμέρισμα να απομονωθεί πάλι για καθαρισμό (με την έννοια ότι όλα τα διαμερίσματα θα έχουν καθαριστεί κατά κυκλικό τρόπο) [13]. Οι χρόνοι που αναφέρονται σχετίζονται με τη σχέση (5.9)

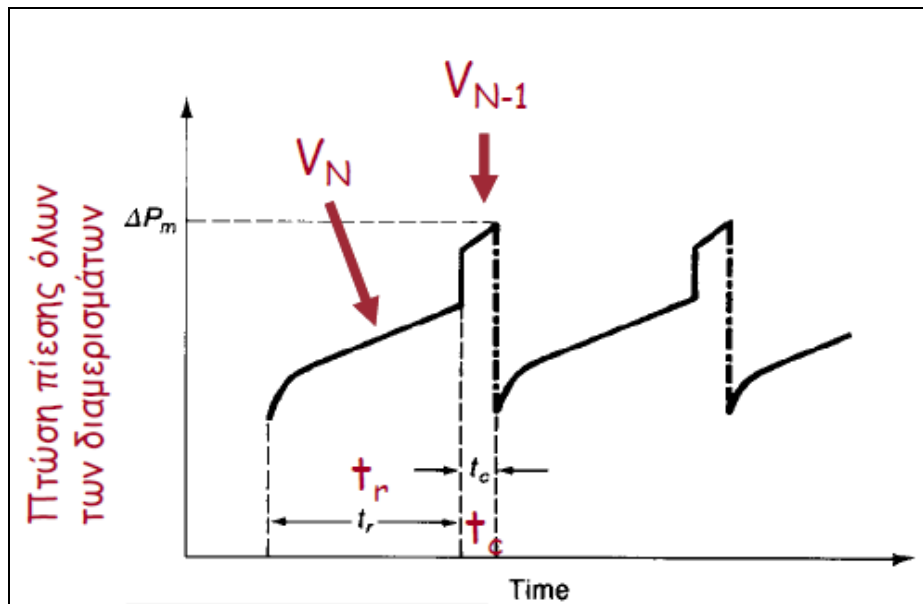
Ο αριθμός διαμερισμάτων εξαρτάται από τη συνολική ροή, τη διαθέσιμη ή επιθυμητή μέγιστη πτώση πίεσης ΔP_m , το χρόνο διήθησης t_f ανάμεσα σε δύο καθαρισμούς του ίδιου διαμερίσματος και το χρόνο καθαρισμού t_c του διαμερίσματος. Επίσης οι δύο παραπάνω χρόνοι συνδέονται με το χρόνο λειτουργίας μέσω ενός γενικού κανόνα σύμφωνα με τη σχέση:

$$t_f = N(t_r + t_c) - t_c \quad (5.16)$$

όπου N είναι το πλήθος των διαμερισμάτων.



Εικόνα 62: Σακόφιλτρα με πεπιεσμένο αέρα [8].



Εικόνα 63: Πτώση πίεσης όλων των διαμερισμάτων συναρτήσει των χρόνων t_r , t_c . [7]

Για παράδειγμα το παραπάνω γράφημα θα μπορούσε να αποδοθεί σε μια πτώση πίεσης κάποιων mm H₂O, για χρόνους λειτουργίας $t_f = (0.5 - 2)$ ώρες και $t_r = (1-5)$ λεπτά.

5.8.2 Σχεδιαστική διαδικασία για σακόφιλτρα.

Για τον σχεδιασμό της διαδικασίας καθαρισμού με χρήση σακόφιλτρων θα πρέπει αρχικά να εκτιμηθεί η ταχύτητα της σκόνης που συνήθως γίνεται από πίνακες αναφοράς σύμφωνα με την εμπειρία σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις αποκονίωσης. Τα βασικά βήματα που θα πρέπει να ακολουθούνται για τον σχεδιασμό των σακόφιλτρων συνοπτικά περιγράφεται παρακάτω:

- Γίνεται εκτίμηση της ταχύτητας για τη σκόνη από τον Πίνακα 5.1.
- Υπολογίζεται η επιφάνεια των φίλτρων $A=Q/v$, στην οποία θα πρέπει να προστεθεί ο πυθμένας του φίλτρου αν χρησιμοποιείται αέρας υπό πίεση,
- Γίνεται εκτίμηση του αριθμού των διαμερισμάτων από τον Πίνακα 5.2.
- Αναπτύσσεται το μοντέλο αντίστασης φίλτρου για τη σχέση ταχύτητας – πτώσης πίεσης.
- Υπενθυμίζεται ότι η όλη διαδικασία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό και από πρότερη εμπειρία, αντίστοιχων διατάξεων.

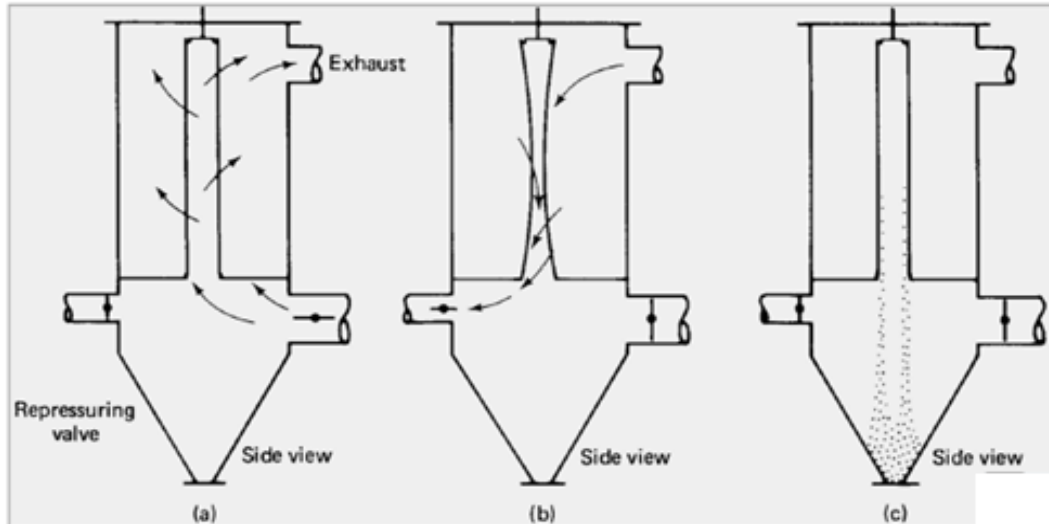
Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την έννοια καθαρή επιφάνεια υφάσματος νοείται το πηλίκο Q_{design}/v_{design} δηλ. το ύφασμα που απομένει συνδεδεμένο, ακόμα και όταν ένα διαμέρισμα είναι εκτός λειτουργίας για καθαρισμό.

Πίνακας 5.5 Σχέση μεταξύ καθαρής επιφάνειας υφάσματος και αριθμού διαμερισμάτων.

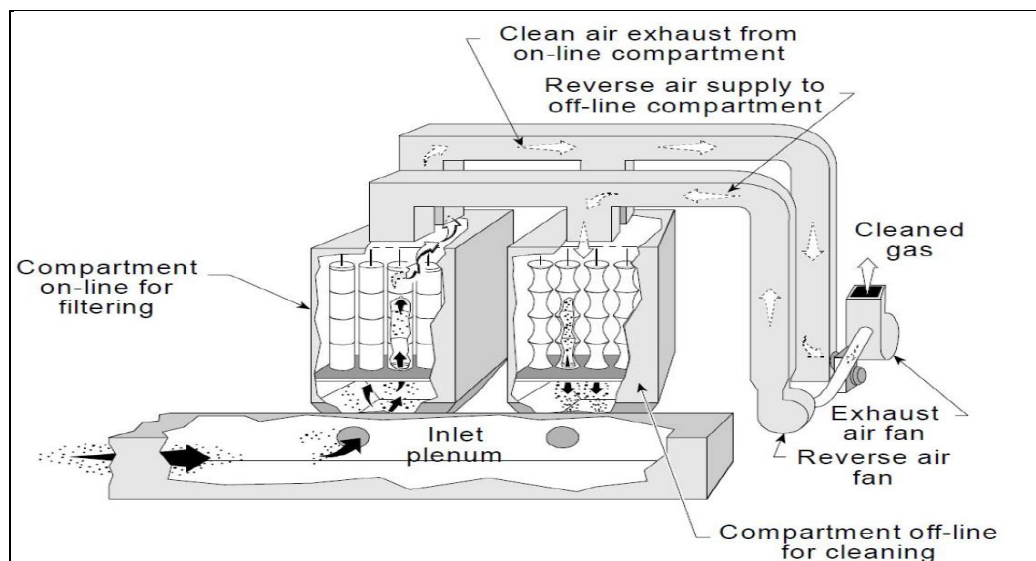
Καθαρή Επιφάνεια Υφάσματος (ft ²)	Αριθμός Διαμερισμάτων
1 – 4,000	2
4,000 – 12,000	3
12,000 – 25,000	4 – 5
25,000 – 40,000	6 – 7



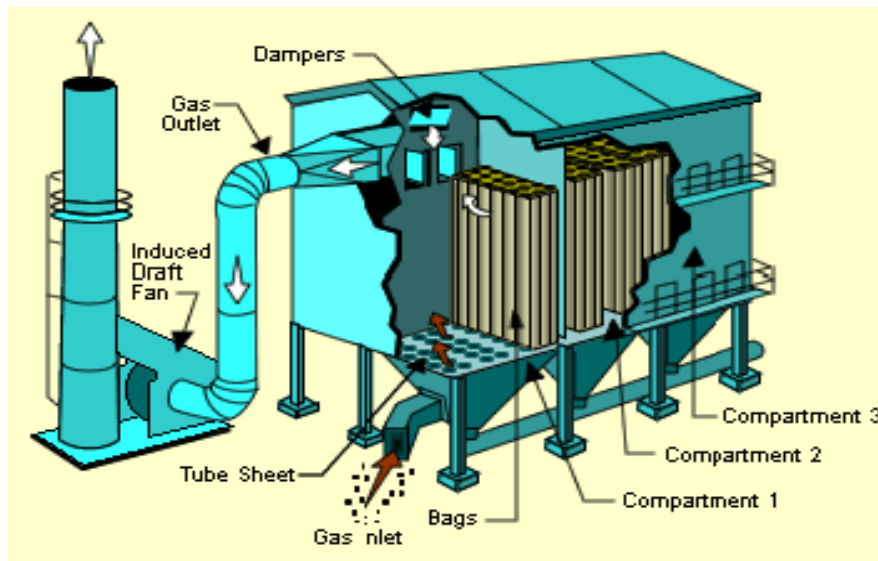
40,000 – 60,000	8 – 10
60,000 – 80,000	11 – 13
80,000 – 110,000	14 – 16
110,000 – 150,000	17 – 20
> 150,000	> 20



Εικόνα 64: Σακόφιλτρα με ρεύμα αέρα αντίθετης ροής (reverse flow) [7].



Εικόνα 65: Διαδικασία καθαρισμού σακόφιλτρον με ρεύμα αέρα αντίθετης ροής (reverse flow) [7].



Εικόνα 66: Ολοκληρωμένο σύστημα καθαρισμού σακόφιλτρου σε διάταξη ροής αερίου αντίθετης ροής [7].







6 ΠΗΓΕΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια καταγραφής των αέριων ρυπαντών που ευθύνονται για την ατμοσφαιρική ρύπανση. Επίσης σκοπός είναι η αναγνώριση της συμβολής της σωματιδιακής ύλης - σκόνης που προέρχεται από την τσιμεντοβιομηχανία στην ατμοσφαιρική ρύπανση.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί κατά έναν εύκολο τρόπο να ορισθεί ως η προσθήκη κάθε υλικού (μοριακής ή σωματιδιακής φύσης) στην ατμόσφαιρα που μας περιβάλλει, η οποία θα έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη δηλητηρίαση της ζωής (βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα) πάνω στον πλανήτη γενικότερα. Το υλικό μπορεί να είναι ένα τοξικό αέριο με πιθανά μακροχρόνια αποτελέσματα σε έναν έμβιο οργανισμό που επίσης μπορεί να μην γίνονται άμεσα αντιληπτά. Ρύποι επίσης θεωρούνται οποιαδήποτε υλικά που μπορούν να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα, είτε λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητα είτε διαμέσου κάποιας φυσικής διαδικασίας. Οι ρύποι αυτοί μπορούν να έχουν ακόμα και έμμεσα αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα, μείωση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας ή κάποια άλλη αλλαγή της σύστασης του αέρα.

Κύριες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης συνήθως θεωρούνται :

1. τα μέσα μεταφοράς,
2. η οικιακή θέρμανση,
3. οι διεργασίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,
4. οι ανεπιθύμητες καύσεις,
5. οι βιομηχανικές καύσεις οποιονδήποτε καυσίμων και
6. όλες οι υπόλοιπες βιομηχανικές εκπομπές κατά τη λειτουργία των μονάδων παραγωγής.

Αν και είναι δύσκολο να καθοριστεί το ποσοστό ευθύνης που αναλογεί σε κάθε μια από αυτές τις παραπάνω πηγές, μια χονδρική κατανομή θα χρέωνε την συνεισφορά όλων των τύπων μηχανών εσωτερικής καύσης για την κίνηση των αυτοκινήτων στο 60% της συνολικής ετήσιας εκπομπής. Οι γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνεισφέρουν κατά 10-15%, η οικιακή θέρμανση περίπου 10%, οι βιομηχανικές καύσεις και εκπομπές περίπου 20% και οι ανεπιθύμητες καύσεις περίπου 5%.

Μια από τις κύριες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης που σχετίζεται και άμεσα με την δουλειά του μηχανικού είναι οι ποικίλες εκπομπές της Βιομηχανίας. Μια πρόχειρη λίστα βασικών βιομηχανιών με τα επίπεδα εκπομπών ρύπων, σε ετήσια βάση, που τις συνοδεύουν δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

- Διυλιστήρια Πετρελαίου: 3.8 δισεκατομμύρια kg σωματιδιακής ύλης, οξειδίων του θείου, υδρογονανθράκων, και μονοξειδίου του άνθρακα,
- Διαδικασίες τήξεως αλουμινίου, χαλκού, μολύβδου, ψευδαργύρου: 3.8δισεκατομμύρια kg σωματιδιακής ύλης και οξειδίων του θείου,
- Χυτήρια σιδήρου: 3.4 δισεκατομμύρια kg σωματιδιακής ύλης και μονοξειδίου του άνθρακα,
- Πολτοποίηση και επεξεργασία χαρτιού: 3 δισεκατομμύρια kg σωματιδιακής ύλης, μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του θείου,
- Παραγωγή κωκ (χρησιμοποιείται στη χαλυβουργία): 2 δισεκατομμύρια kg σωματιδιακής ύλης, οξειδίων του θείου και μονοξειδίου του άνθρακα,
- Τσιμεντοβιομηχανίες: 0.8 δισεκατομμύρια kg σωματιδιακής ύλης,
- Μονάδες παρασκευής φωσφορούχων λιπασμάτων: 284 εκατομμύρια kg σωματιδιακής ύλης και ενώσεων του φθορίου.



Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το 1970 ο μέσος όρος της δαπάνης της Βιομηχανίας για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ήταν μόλις σε ποσοστό 1.7%, των συνολικών δαπανών τους. Το ποσοστό αυτό αυξήθηκε σημαντικά στη δεκαετία 1970 – 1980. Στις μέρες μας πολλές βιομηχανίες ξεπερνούν πλέον το επίπεδο του 5-10%. Σε αυτό έχει συντελέσει βέβαια και η αυστηροποίηση των κανόνων λειτουργίας της βιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο όπως αυτοί περιλαμβάνονται και στην Οδηγία Ολοκληρωμένου Ελέγχου και Πρόληψης της Ρύπανσης (Integrated Pollution Prevention and Control, IPPC) καθώς και οι Βέλτιστες, διαθέσιμες Τεχνικές Αντιρρύπανσης, οι οποίες ακολουθούνται σε εθνικό επίπεδο και έχουν θεσμοθετηθεί από αρμόδιους φορείς ελέγχου σύμφωνα με την ευρωπαϊκή καθώς και την ελληνική νομοθεσία. Γενικότερα πάντως όπως αποδεικνύεται απαιτούνται εντατικότερες μετρήσεις των εκπομπών των υφιστάμενων βιομηχανιών, στη διάρκεια του έτους.

Μια πρόχειρη κατηγοριοποίηση των ρύπων με σκοπό την πιο εύκολη αξιολόγηση του συνολικού προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, είναι η ακόλουθη:

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO),
- Οξείδια του θείου (SO₂, SO₃),
- Οξείδια του αζώτου (N₂O και NO_x: NO, NO₂),
- Υδρογονάνθρακες (CH₄ και ανώτεροι πτητικοί Volatile Organic Compounds),
- Σωματίδια ύλης.

Το περισσότερο μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται από τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Η μεγαλύτερη ποσότητα των οξειδίων του θείου (SO₂, SO₃) προέρχεται από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας και τις βιομηχανίες. Το μεγαλύτερο ποσοστό οξειδίων του αζώτου (NO₂, NO) προέρχεται από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, ενώ η καύση κατέχει τη δεύτερη θέση.

Το CO επιδρά στο κεντρικό νευρικό σύστημα ακόμα και σε συγκεντρώσεις της τάξης των λίγων ppm (~10ppm). Αυτό το επίπεδο αντιστοιχεί στο σχηματισμό περίπου 2% καρβοξυ-αιμοσφαιρίνης (κατεστραμμένης αιμοσφαιρίνης) στο κυκλοφορικό σύστημα, μετά από παρατεταμένη έκθεση πάνω από οκτώ ώρες. Υπάρχουν στοιχεία ότι η κυκλοφορία του οξυγόνου στο αίμα επηρεάζεται όταν το επίπεδο της καρβοξυ-αιμοσφαιρίνης φτάσει περίπου το 5%, και αυτό προκαλείται όταν η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα στον αέρα είναι 30 ppm. Τα επίπεδα του μονοξειδίου του άνθρακα σε αστικές περιοχές συχνά φτάνουν τα 50 ppm και μπορεί να αυξηθούν μέχρι και 140 ppm για μικρό διάστημα σε περίπτωση έντονης κυκλοφοριακής δραστηριότητας.

Τα οξείδια του θείου (SO₂ και SO₃), τα οποία γενικά παράγονται από την καύση ορυκτών καυσίμων με μεγάλες περιεκτικότητες σε θείο, συμβάλουν με περίπου 24,000,000 τόνους [1,2] κατ' έτος στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Το φυσιολογικό κατώτατο όριο έκθεσης σε διοξείδιο του θείου σε διάστημα πάνω από οκτώ ώρες είναι περίπου 5ppm. Στις διεργασίες τήξεως μεταλλευμάτων της βαριάς μεταλλουργικής βιομηχανίας, το επίπεδο του SO₂ μπορεί να αυξηθεί έως και 30 ή 40 φορές πάνω από το όριο για μικρά χρονικά διαστήματα, και εάν αυτές οι υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου παγιδευτούν με μια αντιστροφή της ροής των εκπομπών από τις καμινάδες σε ένα στάσιμο επιφανειακό στρώμα αέρα, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι σοβαρά επικίνδυνα.

Τα οξείδια του αζώτου συμβάλλουν κατά 10,000,000 τόνους ετησίως (μόνο στις Η.Π.Α) στην ατμοσφαιρική ρύπανση και γενικά βρίσκονται σε πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις από το μονοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου. Αν και τα άμεσα αποτελέσματά τους στη ζωή του ανθρώπου δεν είναι εντελώς ξεκάθαρα, υπάρχουν κάποια εμφανή αποτελέσματα όπως το γεγονός της πρόκλησης ερεθισμών στη λειτουργία της αναπνοής και στον ερεθισμό των ματιών. Τα οξείδια του αζώτου είναι από τους κύριους συντελεστές στο σχηματισμό του νέφους εξαιτίας φωτοχημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα στις οποίες συμμετέχει. Τα

τελευταία χρόνια επιρρίπτονται στα NO_x ($=\text{NO}+\text{NO}_2$) όλο και περισσότερες ευθύνες για αλλοιώσεις του οργανισμού, και έτσι ο έλεγχός τους γίνεται συνεχώς αυστηρότερος. Από την άλλη πλευρά το θεωρούμενο "αθώο" N_2O , τουλάχιστο σε λογικές συγκεντρώσεις, βρέθηκε να συμβάλει σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, επιδρώντας έτσι έμμεσα στον παράγοντα ζωή στον πλανήτη.

Οι επιδράσεις των υδρογονανθράκων που προέρχονται τόσο από εκπομπές της βιομηχανίας, της αυτοκίνησης ή άλλων εφαρμογών, όσο και από την ίδια την φύση, είναι δύσκολο να γενικευθούν στον ανθρώπινο οργανισμό. Πάντως είναι γνωστό ότι οι υδρογονάνθρακες, έχουν πολλές και ποικίλες αρνητικές επιδράσεις στους ζώντες οργανισμούς. Πολλοί από αυτούς είναι καρκινογόνοι και πρέπει να αποφεύγεται η με οποιονδήποτε τρόπο εισαγωγή τους στον ανθρώπινο οργανισμό είτε διαμέσου της αναπνοής είτε δια μέσου της τροφικής αλυσίδας.

6.1 Σωματιδιακοί Ρύποι.

Στα προηγούμενα αναφέρθηκαν οι κύριες πηγές ρύπανσης της ατμόσφαιρας (αέριοι ρύποι). Εκτός από τα γνωστά αέρια του θερμοκηπίου που αναφέρθηκαν και νωρίτερα σημαντική συνεισφορά στην αέρια ρύπανση έχουν οι σωματιδιακοί ρυπαντές που μπορούν και να αιωρούνται στην ατμόσφαιρα.

Τα σωματίδια ύλης είναι επίσης βλαβερά για το αναπνευστικό σύστημα. Η άμεση τοξικότητα ή μη, κάποιου σωματιδιακού ρύπου σχετίζεται με την πηγή προέλευσής του. Η πιο συνηθισμένη μορφή σωματιδιακής ύλης στην ατμόσφαιρα είναι ανόργανη και μη τοξική (σκόνη). Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι είναι και μη βλαβερή. Τέτοιες ουσίες λαμβάνονται μέσω του αναπνευστικού σωλήνα και επικάθονται στους πνεύμονες προκαλώντας σταδιακά συσσώρευση. Η πνευμονοκονίαση είναι μια συνηθισμένη αρρώστια για αυτούς που δουλεύουν στα ορυχεία και σε τσιμεντοβιομηχανίες. Το οίδημα των "μαύρων πνευμόνων" που είναι μια μορφή πνευμονοκονίασης, εμφανίζεται συχνότερα στους εργαζόμενους στα ορυχεία άνθρακα. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα σωματίδια ύλης επικάθονται στους πνεύμονες και μειώνουν την ικανότητά τους να μεταφέρουν οξυγόνο στο κυκλοφορικό σύστημα, προκαλώντας δυσκολία της αναπνοής και πρόωρο θάνατο.

Το μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδιακών εκπομπών και εκπομπών υδρογονανθράκων οφείλεται επίσης στις μηχανές εσωτερικής καύσης, αλλά μεγάλες εκπομπές παρατηρούνται και σε βιομηχανικές μονάδες. Η εκπομπή σωματιδίων είναι κύρια συνδεδεμένη με τις βιομηχανικές διεργασίες και τις διεργασίες καύσης.

Οι βιομηχανικές πηγές είναι στατικές, και κάθε μια από αυτές εκλύει σχετικά σταθερή ποσότητα και ποιότητα (με την έννοια της γνωστής σύστασης) ρύπων. Μια τσιμεντοβιομηχανία ειδικότερα βρίσκεται πάντα στην ίδια θέση, εκλύοντας την ίδια ποσότητα των ίδιων ειδών ρύπων εκτός εάν πραγματοποιηθεί κάποια βασική τροποποίηση στην παραγωγική διαδικασία ή εκτός αν μεταφερθεί ολόκληρη. Στις μέρες μας υπάρχει μια αρκετά ανεπτυγμένη τεχνολογία ελέγχου πηγών ρύπανσης στην οποία μπορεί να βασιστεί η βιομηχανία και να επιλέξει την κατάλληλη διαδικασία για την μείωση των εκπομπών της.

6.2 Στατικές Πηγές.

Οι εκπομπές από τις βιομηχανίες ποικίλουν στο περιεχόμενο αλλά συχνά και στην πολυπλοκότητα ενώ ο έλεγχος μπορεί να γίνει με εφαρμογή της κατάλληλης τεχνολογίας. Οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί έχουν την ευελιξία ικανοποιητικής εφαρμογής σε ευρύ φάσμα παρόμοιων βιομηχανικών εκπομπών, όχι βέβαια και πανομοιότυπων. Έτσι συχνά η εξεύρεση λύσης από τον Μηχανικό οδηγείται από την ανεύρεση παρόμοιων βιομηχανιών, με παρόμοιες εκπομπές, ώστε να εφαρμοστεί το σύστημα ελέγχου που αυτές χρησιμοποιούν εάν βέβαια αυτό κριθεί ικανοποιητικό.

Ειδικότερα αναφορικά με τις βιομηχανίες τσιμέντου οι διεργασίες που επιτελούνται στις μονάδες παραγωγής συνδέονται με την εκπομπή κυρίως σωματιδιακής ύλης σε μεγέθη που μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στους πνεύμονες. Οι επιτρεπόμενες τιμές από τέτοιες εκπομπές έχουν καθοριστεί αρκετά χαμηλά ώστε να προστατεύεται κατά το δυνατόν το εργατικό δυναμικό. Η βιομηχανία τσιμέντου είναι η βασικότερη της κατηγορίας η οποία μάλιστα συνδέεται και με εκπομπές ποσοτήτων οξειδίων του αζώτου από τους περιστρεφόμενους κλιβάνους παραγωγής κλίνκερ που λειτουργούν σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (>1200°C).

6.2.1 Αιωρούμενα Σωματίδια.

Η χώρα μας τα τελευταία χρόνια βρίσκεται σταθερά στις πρώτες θέσεις των ευρωπαϊκών χωρών με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, ενώ δεν έχει ακόμη υιοθετήσει αποτελεσματικά μέτρα για τη μείωσή τους. Παράλληλα, οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί της (π.χ) στην Κοζάνη χρησιμοποιούν ως καύσιμο το λιγνίτη, την πρώτη πηγή αιωρούμενων σωματιδίων στην Ελλάδα. Όλα αυτά συμβαίνουν ενώ διεθνείς επιδημιολογικές μελέτες αποδεικνύουν ότι οι ρύποι αυτοί προκαλούν σοβαρά προβλήματα υγείας.

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να ορισθούν πρόχειρα ως μια ανάμιξη (κοκτέηλ) ατμοσφαιρικών ρύπων με επικίνδυνα για τη υγεία συστατικά, δηλαδή βαρέα μέταλλα (μόλυβδος, κάδμιο, αρσενικό, νικέλιο), πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, διοξίνες, οργανοχλωριωμένα εντομοκτόνα.

Προέρχονται από τα καυσαέρια των αυτοκινήτων, από τη βιομηχανία (π.χ. εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου, σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, χυτήρια), σκόνη από το έδαφος καθώς και άλλες αγροτικές δραστηριότητες.

Όσο πιο μικρή διάμετρο έχουν τα αιωρούμενα σωματίδια τόσο πιο επιβλαβή αποδεικνύονται για την υγεία, γιατί εισέρχονται πιο εύκολα στον οργανισμό μέσω της αναπνοής. Η διεθνής ορολογία για τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας είναι PM (Particulate Matter) και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθός τους. Οι συνηθέστεροι τύποι τέτοιων σωματιδίων που συχνότερα αναφέρονται είναι τα PM10 των οποίων η διάμετρος είναι μικρότερη των 10 μm (εκατομμυριοστά του μέτρου) καθώς και τα PM2.5 των οποίων η διάμετρος είναι μικρότερη των 2,5 μm.

Οι 20 ευρωπαϊκές πόλεις με τα περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια δίνονται στον Πίνακα 6.1 στον οποίο η υπέρβαση αναφέρεται σε πλήθος ημερών.



Πίνακας 6.1: Πλήθος ημερών υπέρβασης αιωρούμενων σωματιδίων ευρωπαϊκών πόλεων (Πηγή: “State of European Cities Report” 2007/EU, Regional Policy [16]).

1.Θεσσαλονίκη	208
2.Μίσκολτς (Ουγγαρία)	201
3.Αθήνα	174
4.Βουδαπέστη (Ουγγαρία)	166
5.Λάρισα	151
6.Λευκωσία (Κύπρος)	144
7.Πάτρα	38
8.Λιέγη (Βέλγιο)	132
9.Βίλνιους (Λιθουανία)	18
10.Πόρτο (Πορτογαλία)	109
11.Κόιμπρα (Πορτογαλία)	99
12.Γκντανσκ (Πολωνία)	97
13.Βόλος .	95
14.Πεκς (Ουγγαρία).	93
15. Μπιντγκός (Πολωνία)	93
16.Οστράβα (Τσεχία)	91
17.Μπρακολάβα (Σλοβενία)	87
18.Οκστί νατ Λάμπεμ (Τσεχία)	87
19.Μάντσεστερ (Αγγλία)	69
20.Ηράκλειο	69

Η μέση ανώτατη ετήσια τιμή που έχει καθορίσει η Ε.Ε. για τις συγκεντρώσεις PM10 είναι 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο), ενώ η μέση ανώτατη ημερήσια τιμή είναι 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και επιτρέπεται να ξεπερνιέται 35 φορές το χρόνο. Στο κέντρο της Αθήνας οι μέσες ημερήσιες τιμές ξεπερνιούνται πάνω από 150 φορές το χρόνο (σταθμοί Αμαρουσίου, Αριστοτέλους), ενώ οι αντίστοιχες υπερβάσεις στο κέντρο της Θεσσαλονίκης ξεπερνούν τις 200 φορές το χρόνο. Το νέο όριο είναι 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ εφαρμόζεται από 1η Ιανουαρίου του 2010.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση γίνεται εύκολα αντιληπτή ακόμα και οπτικά (οπτική ρύπανση) όταν προέρχεται από τον καπνό και τη σκόνη από τα αιωρούμενη σωματιδιακή μάζα (suspended particulate matter). Με τον όρο αυτό νοούνται, όλα τα στερεά σωματίδια πολύ μικρής διαμέρισης ανεξάρτητα της χημικής τους συστάσεως και προελεύσεως, που αιωρούνται στον ατμοσφαιρικό αέρα ή σε άλλο αέριο φορέα.

Το γενικό φυσικό χαρακτηριστικό των αιωρούμενων σωματιδίων είναι το μέγεθός τους, η διάμετρος η οποία κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά του μέτρου μέχρι περίπου τις διαστάσεις των φυσικών μορίων, δισεκατομμυριοστά του μέτρου (nm) . Ο όρος σκόνη (dust) αναφέρεται στα μικρά στερεά σωματίδια, με διάμετρο μικρότερη των 75 μm , που μπορούν να αιωρούνται για κάποιο χρονικό διάστημα και τα οπαία κατακάθονται λόγω του βάρους τους. Ο όρος ιπτάμενη τέφρα (fly ash) αναφέρεται στα λεπτά διαμελισμένα σωματίδια τέφρας που συμπαρασύρονται με τα καπναέρια διαφόρων καύσεων. Ο όρος καπνιά (soot) αναφέρεται στα



σωρευμένα ανθρακούχα σωματίδια που σχηματίστηκαν από ατελή καύση και παρέμειναν κοντά στο σημείο καύσεως χωρίς να παρασυρθούν στα αερία.

Καπνός (smoke) είναι το ορατό αερόλυμα που προκύπτει από καύσεις. Καπνομίχλη ή αιθαλομίχλη (smoke+fog=smog) ορίζεται η εκτεταμένη ατμοσφαιρική ρύπανση από αερολύματα, που προέρχονται από φυσικές διεργασίες και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Αερολύματα (aerosols) είναι τα σχετικώς σταθερά αιωρήματα στερεών ή υγρών σωματιδίων σε αέριο. Τα αερολύματα διαφέρουν από τα σωματίδια κατά το ότι τα αερολύματα συμπεριλαμβάνουν και τα σωματίδια και το αέριο στο οποίο αυτά αιωρούνται.

6.2.2 Τεχνολογία για την προστασία από τα αιωρούμενα σωματίδια.

Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές, που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια, είναι οι διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και τα παντός είδους αυτοκίνητα. Οι συσκευές για τη συλλογή των εκατομμυρίων τόνων των σωματιδίων, τα οποία παράγονται από τις βιομηχανικές δραστηριότητες, κατατάσσονται σε πέντε κατηγορίες:

1. Θάλαμος κατακαθίσεως με τη βαρύτητα,
2. Φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες (cyclones),
3. Πύργοι καταϊονισμού (wet scrubbers),
4. Σακόφιλτρα.
5. Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστήρες (φίλτρα).

Η διήθηση δεν μπορεί να διαχωρίσει τα σωματίδια, σύμφωνα με το μέγεθος τους, διότι αφού οι πόροι, του φίλτρου στομωθούν από τα μεγάλα σωματίδια, δεν θα μπορούν να περάσουν σωματίδια μικρότερου μεγέθους. Η ταξινόμηση των σωματιδίων, ανάλογα με τη διάμετρό τους, γίνεται με συστοιχία κρουστικών διαχωριστήρων, ρυθμίζοντας τις οπές των επιφανειών συλλογής και την ταχύτητα κίνησης του αερίου.

6.3 Ελληνική Τσιμεντοβιομηχανία.

Η Ελληνική Τσιμεντοβιομηχανία γεννήθηκε στις αρχές του περασμένου αιώνα με την ίδρυση των 4 εταιριών σε διάστημα 32 ετών:

Παρούσα κατάσταση: τα εργοστάσια τσιμέντου είναι ο κτώ (8) στην Ελλάδα και επτά (7) της εταιρείας TITAN A.E. στο εξωτερικό.

1. TITAN στην Ελλάδα (Καμάρι Βοιωτίας, Ελευσίνα, Θεσσαλονίκη ΔρέπανοΑχαΐας, Εξωτερικό (U.S.A. 2, Αίγυπτος 2, Σκόπια 1, Βουλγαρία 1, Σερβία 1),
2. ΑΓΕΤ - ΗΡΑΚΛΗΣ (Lafarge Group) στην Ελλάδα (Βόλος, Χαλκίδα, Μηλάκι Αλιβερίου),
3. Τσιμέντα - ΧΑΛΥΨ (Italcementi Group) στην Ελλάδα (Ασπρόπυργος).






Στο παρελθόν η δημιουργία πόρων στις πετρελαιοπαραγωγές χώρες οδήγησαν σε πρώτη φάση στην κάλυψη των αναγκών τους σε τσιμέντο λόγω ανάπτυξης με εισαγωγές τσιμέντου κυρίως από Ελλάδα και μετέπειτα σε δημιουργία ιδίων τσιμεντοβιομηχανιών. Το τελευταίο σε συνδυασμό με την οικονομική κρίση των ανεπτυγμένων χωρών λόγω των δύο πετρελαϊκών κρίσεων οδήγησε τις διεθνείς τιμές πώλησης του τσιμέντου σε κάθετη πτώση (τιμές 1986 έως και 50% χαμηλότερες από 1979). Έτσι η ελληνική τσιμεντοβιομηχανία βασισμένη στην υψηλή τεχνολογία και τεχνογνωσία που διαθέτει στην άριστη ποιότητα του προϊόντος αλλά και στην υποστήριξη του πελάτη από τα εξειδικευμένα στελέχη της και στον έλεγχο και κατά συνέπεια στη μείωση του κόστους, έστρεψε την εξαγωγική της δραστηριότητα σε νέες

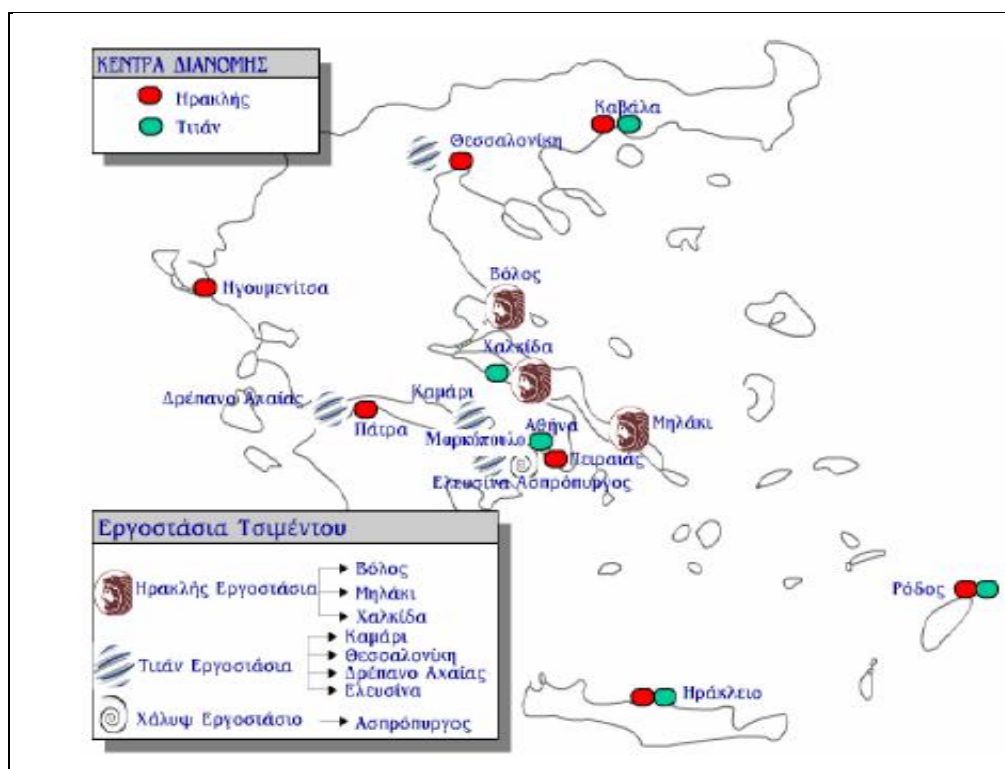


ανεπτυγμένες αγορές (Η.Π.Α., χώρες Δυτικής Ευρώπης) αλλά και σε άλλες χώρες της Αφρικής και Ασίας, παραμένοντας μία από τις ισχυρότερες εξαγωγικές χώρες.

Πίνακας 6.2: Ελληνικές Βιομηχανίες Παραγωγής τσιμέντου

(<http://www.halyps.gr/> <http://www.hcia.gr/7GR.html>)

	1902	Ίδρυση της Ανωνύμου Εταιρείας Τσιμέντων "ΤΙΤΑΝ"
	1911	Ίδρυση της Ανωνύμου Γενικής Εταιρίας Τσιμέντων "ΗΡΑΚΛΗΣ"
	1926	Ίδρυση της Εταιρίας "ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ Α.Ε."
http://www.halyps.gr/	1934	Πρώτη ίδρυση της Εταιρίας με την Επωνυμία "Σ. ΚΟΤΣΙΡΑΣ & ΣΙΑ Ε.Π.Ε."
	1943	Επανίδρυση της Εταιρίας "Σ. ΚΟΤΣΙΡΑΣ & ΣΙΑ Ε.Π.Ε." με νέα επωνυμία "ΕΤΑΙΡΑ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΧΑΛΥΨ Α.Ε."
	2001	Συγχώνευση της Ανωνύμου Γενικής Εταιρίας Τσιμέντων "ΗΡΑΚΛΗΣ" και "ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ Α.Ε."



Εικόνα 67: Κατανομή ελληνικών εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου [1,16]



Εικόνα 68: Παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα περίοδος 1997 – 2006. [1,16]



Εικόνα 69: Εξέλιξη των πωλήσεων του παραγόμενου τσιμέντου στην Ελλάδα [1,16].

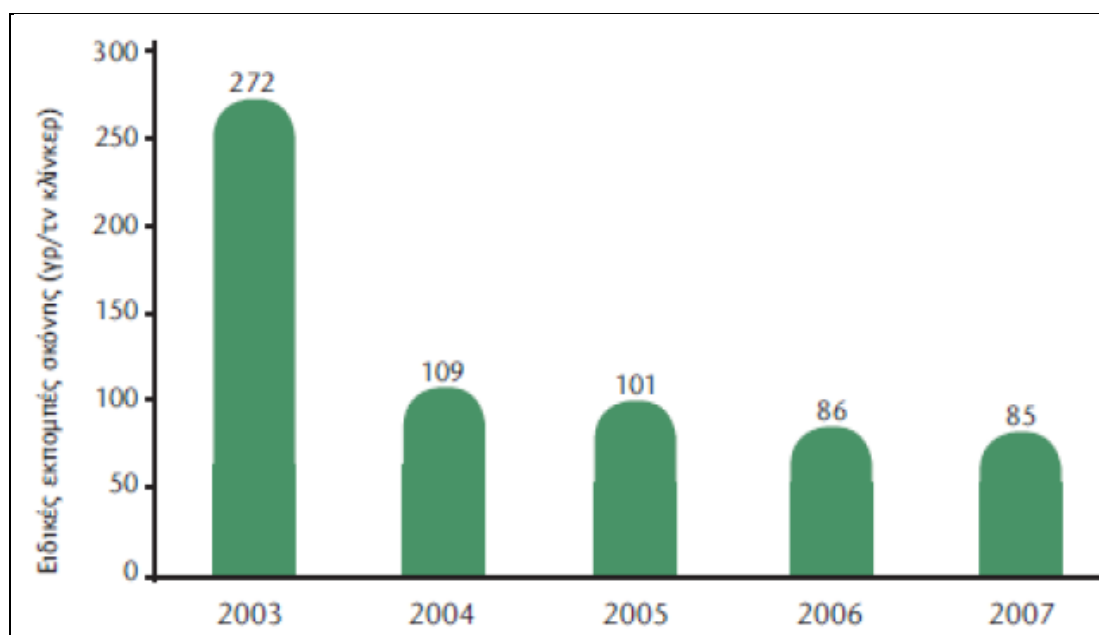


Η ετήσια παραγωγή της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας ανήλθε το 2006 σε 16.1 εκατ. τόννους τσιμέντου. Το 35.8 % της παραγωγής (5.77 εκατ. τόννοι) εξάγεται σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στις Η.Π.Α. και τις χώρες της Μ. Ανατολής και της Αφρικής, ενώ το 64.2 % (10.35 εκατ. τόννοι) διατίθεται στην ελληνική αγορά. Από το διατιθέμενο τσιμέντο στην ελληνική αγορά (Ι.Ο.Β.Ε, Ινστιτούτο Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών) ποσοστό 70% (7.25 εκατ. τόννοι περίπου) διατίθεται χύμα και 30% (3.1 εκατ. τόννοι περίπου) ενσασκισμένο. Το 80% του διατιθέμενου «χύμα» τσιμέντου στην ελληνική αγορά απορροφάται από τις εταιρείες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος, το 12-15% από τις κατασκευαστικές εταιρείες και το 5-8% από τις μονάδες παραγωγής προϊόντων τσιμέντου.

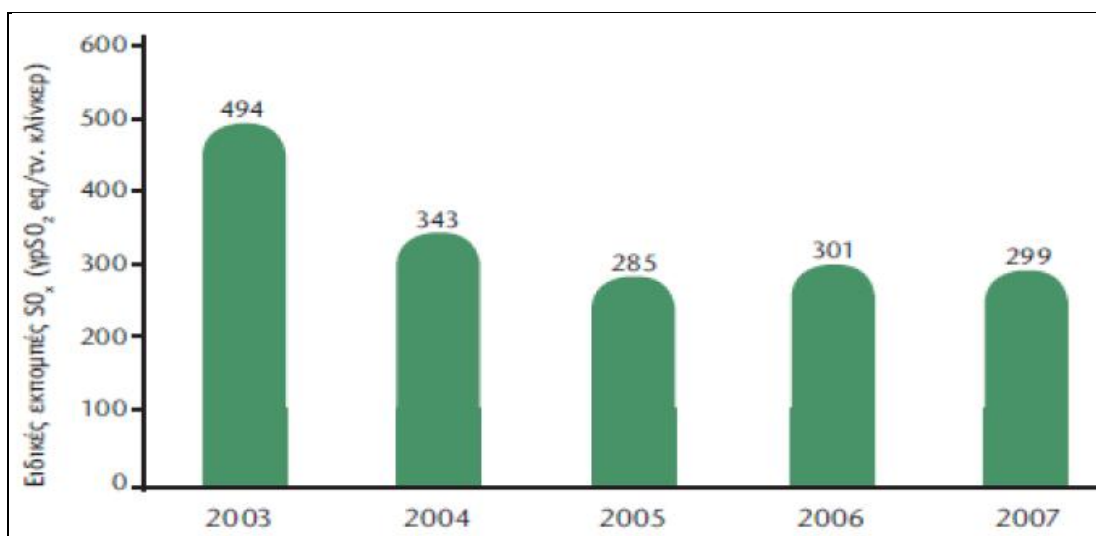
Οι συνολικές πωλήσεις τσιμέντου και σκυροδέματος αποφέρουν ακαθάριστα έσοδα 3.4 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως περίπου. Αν ληφθούν δε υπόψη και τα προϊόντα τσιμέντου (τσιμεντόλιθοι, έτοιμα κονιάματα κλπ.) που παράγονται, δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα αν λεχθεί ότι ο ετήσιος κύκλος εργασιών των βιομηχανιών τσιμέντου και σκυροδέματος ανέρχεται σε 4.0-5.0 δισεκατομμύρια ευρώ περίπου.

6.4 Εκπομπές TITAN.

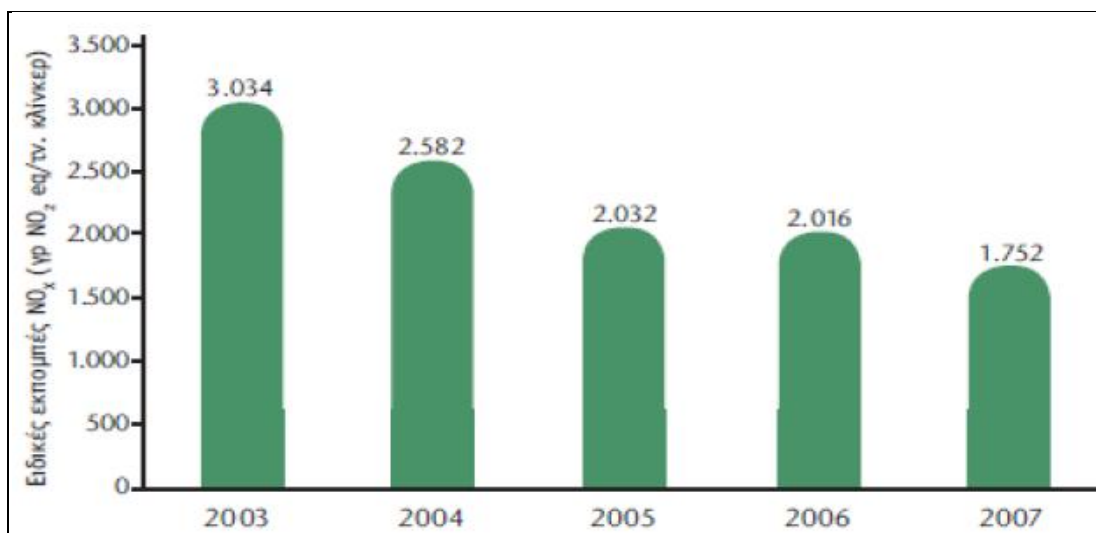
Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι τομείς του τσιμέντου και του σκυροδέματος είναι από τους δυναμικότερους της ελληνικής βιομηχανίας με σημαντική συμμετοχή στο Α.Ε.Π. της χώρας. Το μέλλον τους προβλέπεται ευοίωνο για τα επόμενα χρόνια, δεδομένης της αύξησης της παραγωγικής τους δυναμικότητας με την εξαγορά ομοειδών επιχειρήσεων του εξωτερικού, την αύξηση διεθνώς του αριθμού των κέντρων διανομής των προϊόντων τους και την κατάσταση της οικοδομικής και κατασκευαστικής δραστηριότητας της χώρας. Τα παραπάνω βέβαια αναφέρονται σε μια περίοδο άνθισης και ανάπτυξης της ελληνικής οικονομίας που όμως τα τελευταία χρόνια έχει συρρικνωθεί λόγω της κρίσης που βιώνει η χώρα.



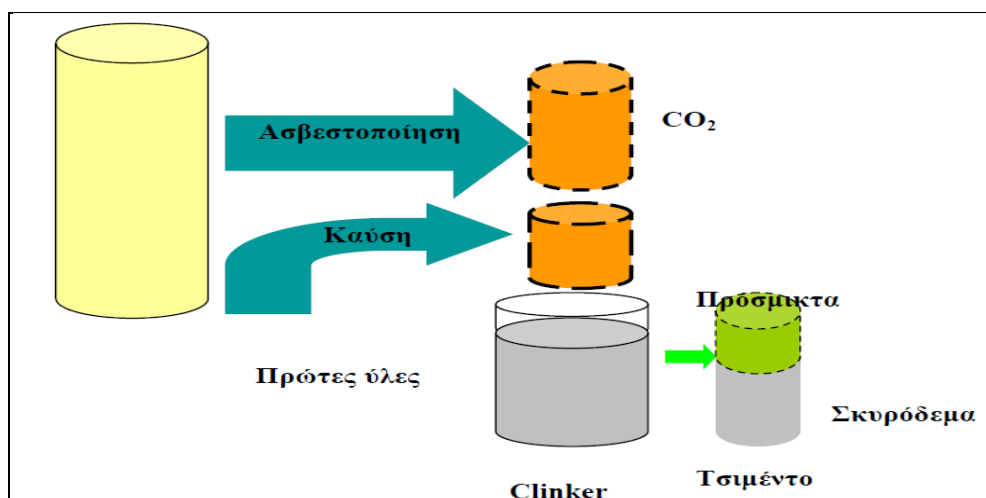
Εικόνα 70: Ειδικές εκπομπές σκόνης [16].



Εικόνα 71: Ειδικές εκπομπές οξειδίων του Θείου [16].



Εικόνα 72: Ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου [16].



Εικόνα 73: Διάγραμμα παραγωγής CO₂. [16]



6.5 Δυνατότητες μείωσης των εκπομπών TITAN.

Παρά το ότι η τσιμεντοβιομηχανία λαμβάνοντας πρόνοια αλλά και με την επιβολή των μέτρων ασφάλειας που προβλέπονται από διεθνείς και εθνικούς οργανισμούς συνεισφέρει κατά πολύ μικρό ποσοστό στην ατμοσφαιρική ρύπανση, εντούτοις υπάρχουν κάποιες δυνατότητες για τη μείωση των εκπομπών που συνοψίζονται στα ακόλουθα:

Στην τσιμεντοβιομηχανία TITAN είναι δυνατή η μείωση της θερμικής κατανάλωσης με

- Βελτίωση θερμικής απόδοσης (διεργασία – πρόσθετες βαθμίδες κυκλώνων – νέα συστήματα ψύξης κλίνκερ κλπ),
- Μείωση θερμοκρασίας έψησης κλίνκερ (Βελιτικά, θειοαλουμινικά, αλινιτικά κλίνκερ),
- Χρήση πρώτων υλών/παραπροϊόντων με έτοιμο η μη ανθρακικό CaO (Βολαστονίτης, Χλωρίτης, Βασάλτης / Σκωρίες υψικαμίνων, Χαλυβουργικές σκωρίες).

Επίσης στην τσιμεντοβιομηχανία TITAN είναι δυνατή η μείωση των συντελεστών εκπομπής καύσης με διάφορους τρόπους όπως:

- Με τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων με μικρότερους συντελεστές εκπομπής,
- Με τη χρήση βιομάζας, η οποία θεωρείται ως μηδενικής εκπομπής καύσιμο (Αγροτικά υπολείμματα ως στελέχη βαμβακιού, καλαμποκιού – υπολείμματα παραγωγής βιοκαυσίμων),
- Με τη χρήση - καύση αποβλήτων με μικρότερο συντελεστή εκπομπής η με περιεχόμενη βιομάζα (καύσιμο από επεξεργασία αστικών απορριμμάτων, λάσπες βιολογικών καθαρισμών κλπ),
- Με τη μείωση του ποσοστού κλίνκερ στο τσιμέντο ή με την αύξηση του ποσοστού προσμίκτων
- Παραγωγή πιο ενεργών κλίνκερ.

Η Ελληνική Τσιμεντοβιομηχανία πραγματοποίησε τα τελευταία χρόνια πριν την κρίση αλλά και πριν από την εφαρμογή της συμφωνίας του Kyoto σημαντικό ύψος επενδύσεων στην παραγωγή για την μείωση και εξοικονόμηση ενέργειας με αποτέλεσμα η περαιτέρω μείωση κατανάλωσης καυσίμων και των αντίστοιχων εκπομπών να είναι οριακή αν όχι αδύνατη. Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων θα συνέβαλε στην μείωση των εκπομπών, πλην όμως η χρήση τους δεν είναι εφικτή λόγω της αντίδρασης των Τοπικών Αρχών, της άρνησης χορήγησης σχετικών αδειών, αλλά και της μεγάλης διασποράς στην χώρα. Η χρήση εναλλακτικών πρώτων υλών δεν είναι πάντα εφικτή λόγω διαφόρων παράπλευρων προβλημάτων (Cr, MgO και λοιπή χημική σύσταση). Η Ελληνική Τσιμεντοβιομηχανία από πολλά χρόνια παράγει τσιμέντα με υψηλό ποσοστό προσμίκτων με αντίστοιχο ενεργειακό και περιβαλλοντικό όφελος αλλά και σημαντική βελτίωση της ποιότητας και του χρόνου ζωής της κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιθώρια μείωσης εκπομπών από την χρήση των προσμίκτων. Το 60% των συνολικών εκπομπών CO₂ είναι ποσότητα ανελαστική, διότι οφείλεται στην διάσπαση των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών. Κάθε μείωση των εκπομπών του κλάδου σημαίνει αντίστοιχη μείωση του όγκου παραγωγής, γεγονός καταστροφικό για την ανταγωνιστικότητα της Ελληνικής Τσιμεντοβιομηχανίας σε τοπικό και διεθνές επίπεδο.



7 Αναφορές.

1. Τσακαλάκης Κ. (2010), «Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος», ΕΜΠ, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων,
2. Schofield G. C., (1980), Homogenisation/Blending Systems Design and Control for Mineral Processing, Series on Bulk Materials Handling Vol. 2, Trans Tech Publications,
3. Bye C. G., (1999), Portland Cement, 2nd Edition, Thomas Telford,
4. Τσακαλάκης, Κ.Γ., (2005), Σχέση μεταξύ καταναλισκόμενης ενέργειας και ειδικής επιφάνειας (Blaine) στην άλεση κλίνκερ σε σφαιρόμυλους, 5ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, σελ. 445-448,
5. Peray E. K., (1986), The Rotary Cement Kiln, Chemical Publishing Co.,Inc., N.Y,
6. Cooper C. David & Alley F.C (2011), “Air pollution Control: A Design Approach” 4th Edition, Waveland Press Inc.
7. Ανδρίτσος Ν. (2016), Τεχνολογία Βιομηχανικής Αντιρρύπανσης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Σημειώσεις μαθήματος ΜΗΧΒ119 e-class, <http://eclass.uth.gr/eclass/courses/MHXB119/>
8. Ψαρρά Ασημίνα (2014), «Μελέτη Συστήματος Αποκονίωσης στα πλαίσια της μείωσης των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων στη Λάρκο», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης,
9. Yeh.H.C &Liu, B.Y.H. (1974) “Aerosol filtration by fibrous filters – I theoretical” J.Aerosol Sci 5: 91-217, ,
10. Krish, A.A. and Stechkina, I.B. (1978). The Theory of Aerosol Filtration with Fibrous Filters, In Fundamentals of Aerosol Science, Shaw, D.T., (Ed.), Wiley, New York.
11. Wu, C., Li, L. and Thornton, C. (2003). Rebound Behaviour of Spheres for Plastic Impacts. Int. J. Impact Eng. 28
12. J. P. Reynolds, J. S. Jeris, Louis Theodore (2002) “HANDBOOK OF CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING CALCULATIONS”
13. Bunicore, A. J., and Davis W. T., (1992), Eds. Air pollution engineering manual. New York: Van Nostraand Reinhold,
14. Air Pollution Control Equipment: Particulates, Volume 1 Louis Theodore, Anthony J. Buonicore, CRC Press, (1988) - Nature
15. McKenna, J. D., and G. P. Greiner. (1982) "Baghouses." *Air Pollution Control Equipment-Selection, Design, Operation and Maintenance. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.*
16. Νουσιοπούλου Θ., (2010), «Βέλτιστες Τεχνικές Αντιρρύπανσης (IPPC), στις Βιομηχανίες και Εφαρμογή σε Τσιμεντοβιομηχανία», Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσσαλονίκης, ΠΜΣ Φυσικής Περιβάλλοντος,
17. <http://gpceng.gr/activities/%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%BC%CE%AC%CE%BA%CF%81%CF%85%CE%BD%CF%83%CE%B7-%CF%81%CF%8D%CF%80%CF%89%CE%BD-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%BF%CF%83%CE%BC%CF%8E%CE%BD-%CE%B1%CF%80%CF%8C-%CE%B1%CF%80%CE%B1%CE%AD%CF%81/>
18. www.valleyair.org