

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΜΟΥΡΙΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΒΟΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	7
1.1 Η ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	7
1.2 ΟΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	8
1.2 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ	9
1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	10
Εικόνα 1.3: Γραμμή παραγωγής τσιμέντου	11
1.4.1 Λατόμευση των Α' υλών	11
1.4.2 Θραύση Α' υλών	12
1.4.3 Αποθήκευση και προομοιογένεια των Α' υλών	13
1.4.4 Ξήρανση και άλεση πρώτων υλών.....	13
1.4.5 Ομογενοποίηση και αποθήκευση φαρίνας	14
1.4.6 Η έμφυσηση.....	14
1.4.7 Άλεση τσιμέντου	17
1.4 ΚΑΥΣΙΜΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ.....	17
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	21
2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΛΕΣΗΣ.....	22
2.3 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΛΕΣΗΣ.....	23
2.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΛΕΣΗΣ	24
2.5 ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΕΣ.....	26
2.5.1 Σταθερός διαχωριστής.....	26
2.5.2 Διαχωριστής με ενσωματωμένο ανεμιστήρα.....	26
2.5.3 Διαχωριστές τύπου κυκλώνα.....	28
2.5.4 Διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας (ΔΥΑ).....	29
2.6 ΜΥΛΟΙ ΑΛΕΣΗΣ.....	31
2.7 ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟΙ (BALL MILL).....	32
2.9 ΚΑΘΕΤΟΙ ΜΥΛΟΙ.....	42
2.10 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΑΛΕΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΝΚΕΡ ΚΑΙ ΑΛΕΣΗ ΦΑΡΙΝΑΣ.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	47
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	47
3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΩΝ	47
3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΗ	49

3.4	ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	49
3.4.1	Αγωγοί.....	50
3.4.2	Ανεμιστήρες.....	52
3.5	ΦΙΛΤΡΑ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ.....	54
3.6	ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΕΣ.....	54
3.6.1	Κονιοθάλαμοι.....	54
3.6.2	Κυκλώνες.....	57
3.6.2.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυκλώνων.....	58
3.6.2.2	Τύποι κυκλώνων.....	58
3.6.2.3	Διαστασιολόγηση κυκλώνα.....	59
3.6.2.4	Απόδοση συλλογής.....	61
3.6.2.5	Είσοδος σκόνης στον κυκλώνα και τρόποι συλλογή της.....	62
3.6.3	Πολυκυκλώνες.....	64
3.6.3.1	Κυκλώνες σε σειρά και εν παραλλήλω.....	65
3.6.4	Σακόφιλτρα.....	65
3.6.4.1	Σακόφιλτρα δόνησης (shaker-cleaned).....	66
3.6.4.2	Σακόφιλτρα αντίστροφης ροής (reverse-flow-cleaned).....	67
3.6.4.3	Σακόφιλτρα πεπιεσμένου αέρα (reverse pulse cleaned).....	68
3.7	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΕΣ – ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....		73
4.1	ΡΥΠΑΝΣΗ.....	73
4.2	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ.....	75
4.2.1	Γενικά.....	75
4.2.2	Λατομεία – Εξόρυξη.....	75
4.2.3	Διατάξεις προομογενοποίησης.....	76
4.2.4	Διατάξεις θραύσης.....	76
4.2.5	Διατάξεις άλεσης φαρίνας και τσιμέντου.....	76
4.2.6	Διατάξεις ομογενοποίησης.....	77
4.2.7	Διατάξεις έψησης.....	77
4.2.8	Διατάξεις ψύξης κλίνκερ.....	78
4.2.9	Αποθήκευση κλίνκερ και πρώτων υλών.....	78
4.2.10	Αποθήκευση και διάθεση τσιμέντου.....	78
4.2.11	Μέσα μεταφοράς.....	78
4.3	ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	79

4.4 ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	80
4.4.1 Θεσμικό πλαίσιο για τη διακίνηση του τσιμέντου.	84
4.4.2 Θεσμικό πλαίσιο για την ίδρυση και τη λειτουργία του κέντρου διανομής.	84
4.4.3 Θεσμικό πλαίσιο για τον έλεγχο του τσιμέντου.	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η βιομηχανία τσιμέντου αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς κλάδους της βιομηχανίας στην χώρα μας, η οποία εδώ και χρόνια έχει διευρύνει τις δραστηριότητες της στην Ευρώπη με πολυεθνικές εταιρίες αναγνωρισμένες και ανταγωνιστικές, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά και στην οικονομία.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Τεχνολογία άλεσης τσιμέντου και συστήματα αποκονίωσης» αναφέρεται και αναλύεται ολόκληρη η παραγωγική διαδικασία που πραγματοποιείται για την παραγωγή του τσιμέντου, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην διεργασία της άλεσης του τσιμέντου καθώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την λεπτότητα του προϊόντος και κατ' επέκταση στη ποιότητα του προϊόντος. Επίσης εκτός από τις διεργασίες άλεσης, και το γενικότερο συγκρότημα της άλεσης αναφέρονται επίσης και τα μέτρα αντιρρύπανσης για την προστασία του περιβάλλοντος. Στην προστασία από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να έχει μια βιομηχανία τσιμέντου συμβάλουν οι διατάξεις αποκονίωσης, δηλαδή η διαδικασία που ασχολείται με την συγκράτηση της σκόνης, που υπάρχει στα αέρια, που δημιουργούνται στις διάφορες διεργασίες μιας βιομηχανίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή Α. Βούρο του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε για την συμπαράσταση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να ολοκληρώσω την παρούσα πτυχιακή εργασία. Φυσικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την πολύτιμη βοήθεια τους και την στήριξη που μου πρόσφεραν σε όλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια εισαγωγική αναφορά στο χώρο της βιομηχανίας τσιμέντου στην Ελλάδα καθώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην οικονομία της. Επίσης περιγράφεται και η παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου. Η γραμμή παραγωγής αρχίζει με την εξόρυξη των πρώτων υλών και τη θραύση, στη συνέχεια με την άλεση των πρώτων υλών, την έψηση από την οποία προκύπτει το κλίνκερ και καταλήγει στην τελική άλεση του τσιμέντου όπου αλέθεται το κλίνκερ με γύψο και άλλα πρόσθετα και προκύπτει το τελικό προϊόν το οποίο αποθηκεύεται σε σιλό αποθήκευσης. Επίσης αναφέρονται τα καύσιμα που χρησιμοποιεί μια τσιμεντοβιομηχανία όπως άνθρακες, φυσικό αέριο, Pet-coke, καθώς και εναλλακτικά καύσιμα.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην τεχνολογία άλεσης του τσιμέντου. Η άλεση είναι μια από τις σημαντικότερες παραγωγικές διαδικασίες για την παραγωγή του τσιμέντου καθώς την συναντάμε δύο φορές. Αρχικά η άλεση των πρώτων υλών και έπειτα η άλεση του τσιμέντου. Σαν άλεση στην τσιμεντοβιομηχανία χαρακτηρίζουμε τον λεπτότατο διαμελισμό των υλικών για την παραγωγή φαρίνας και τσιμέντου. Επίσης με τον όρο διάταξη άλεσης εννοούμε ένα σύνολο μηχανημάτων, απαραίτητα για την δημιουργία του λεπτού προϊόντος. Τα μηχανήματα που αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι μύλοι άλεσης και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους, διατάξεις προσαγωγής και απαγωγής του υλικού και οι διαχωριστές που διαχωρίζουν το λεπτόκοκο υλικό.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνεται έμφαση στα συστήματα αποκονίωσης. Σε μια βιομηχανία τσιμέντου ένα από τα κύρια προβλήματα είναι η εκπομπή σκόνης. Με τον όρο αποκονίωση εννοούμε την τεχνολογία συγκράτησης σκόνης που δημιουργείται σε διάφορες διεργασίες της παραγωγικής γραμμής. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα είδη των αποκονιωτών που χρησιμοποιούνται με σκοπό την αποφυγή της σκόνης στην ατμόσφαιρα καθώς και ο εξοπλισμός που απαιτείται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται το θέμα της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Αναφέρονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από μια βιομηχανία τσιμέντου, σε κάθε παραγωγική διαδικασία, όπως είναι τα καυσαέρια της περιστροφικής καμίνου, η έκλυση σκόνης και ο θόρυβος από τα μηχανήματα παραγωγής, καθώς και τα μέτρα προστασίας που θα πρέπει να λαμβάνονται σε κάθε παραγωγική διεργασία. Τέλος παρουσιάζεται θεσμικό πλαίσιο για τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής ρύπων, για τον έλεγχο του τσιμέντου και για την διανομή και την διακίνηση του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

1.1 Η ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου, η οποία είναι μια αμιγώς μεταλλευτική-μεταλλουργική δραστηριότητα, είναι ίσως η σπουδαιότερη βιομηχανική δραστηριότητα στην Ελλάδα με μεγάλες εξαγωγικές δυνατότητες και πολύ μεγάλη συμβολή στην εθνική οικονομία της χώρας. Η βιομηχανία τσιμέντου στην Ελλάδα ξεκίνησε στις αρχές του περασμένου αιώνα και σε διάστημα 32 ετών ιδρύθηκαν οι 4 εταιρίες που αποτέλεσαν τον κλάδο με την ακόλουθη χρονολογική σειρά.

- Ίδρυση της Ανώνυμης Εταιρίας Τσιμέντων **TITAN** (1902)
- Ίδρυση της Ανώνυμης Γενικής Εταιρίας Τσιμέντων **ΗΡΑΚΛΗΣ** (1911)
- Ίδρυση της Ανώνυμης Εταιρίας **ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ** (1926)
- Ίδρυση της Ανώνυμης Εταιρίας **ΧΑΛΥΨ** (1934)

Η συνεχής αύξηση της ζήτησης τσιμέντου για την κατασκευή κάθε είδους έργων είχε σαν επακόλουθο την σημαντική ανάπτυξη του κλάδου με αποτέλεσμα πέρα από την κάλυψη των αναγκών της εσωτερικής αγοράς να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις εξαγωγών ήδη πριν από τον Β' Παγκοσμιο Πόλεμο.

Στην μεταπολεμική περίοδο και μέχρι το 1983 οι ρυθμοί ανάπτυξης της τσιμεντοβιομηχανίας τόσο από πλευράς δυναμικότητας όσο και από πλευράς τεχνολογίας ήταν ραγδαίοι, ακολουθώντας τις ανάγκες ανάπτυξης και ανοικοδόμησης της χώρας μας, αλλά και την αυξανόμενη ζήτηση των αγορών εξωτερικού σε κοντινές περιοχές (Περσικός Κόλπος, Ερυθρά Θάλασσα, χώρες Βορείου και Δυτικής Αφρικής) κυρίως μετά την πρώτη εκτίναξη των τιμών του πετρελαίου το 1973. Η δημιουργία πόρων στις πετρελαιοπαραγωγές χώρες οδήγησε σε μεγάλους ρυθμούς ανάπτυξης και σε πρώτη φάση η κάλυψη των αναγκών τους σε τσιμέντο έγινε με εισαγωγές κυρίως από Ελλάδα ενώ στην συνέχεια δημιουργήθηκαν ίδιες τσιμεντοβιομηχανίες. 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 τη μείωση του κόστους έστρεψε την εξαγωγική της δραστηριότητα σε νέες ανεπτυγμένες αγορές (Η.Π.Α., χώρες Δυτικής Ευρώπης) αλλά και σε άλλες, όπως χώρες Αφρικής και Ασίας, παραμένοντας μία από τις ισχυρότερες εξαγωγικές χώρες.

1.2 ΟΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στις μέρες μας οι μεγαλύτερες παραγωγικές μονάδες παραγωγής τσιμέντου στην Ελλάδα είναι οι εταιρίες ΤΙΤΑΝ Α.Ε και η ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ η οποία το 2001 συγχωνεύτηκε με τα ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ. Οι εταιρίες αυτές με συνολική ετήσια παραγωγική ικανότητα 13,6 εκατ. τόνους, ελέγχουν το 90-93% της εγχώριας αγοράς τσιμέντου (45% η κάθε μία) και η εταιρία ΧΑΛΥΨ με παραγωγική ικανότητα 1,0 εκατ. τόνους ελέγχει το 7-10% της αγοράς.



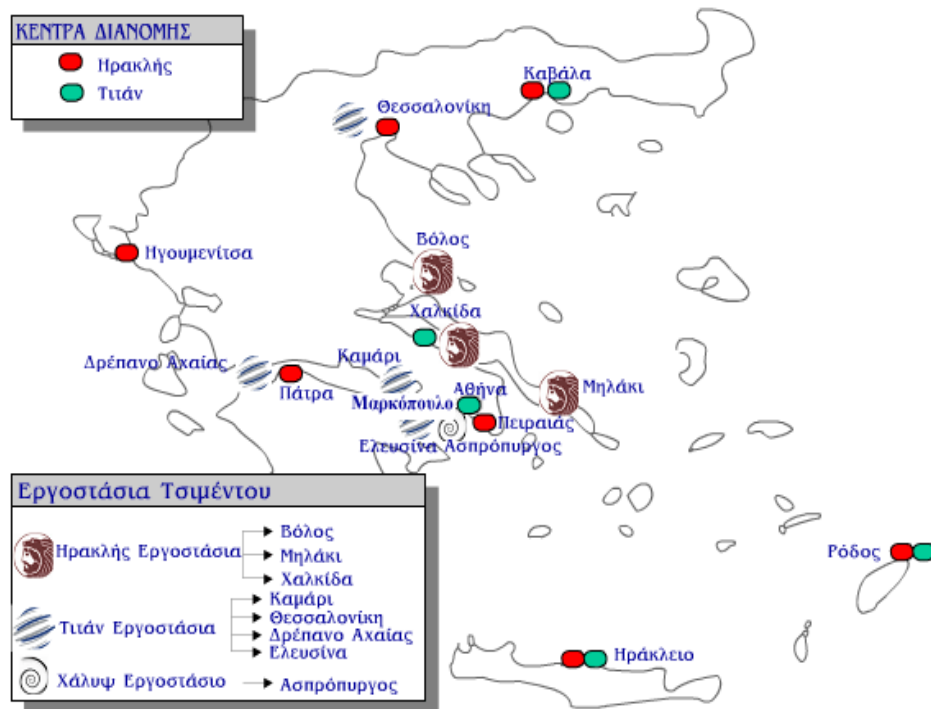
Γράφημα 1.1 Ετήσια παραγωγική ικανότητα (%) των τριών τσιμεντοβιομηχανιών [Βιβλιογραφία 21]

Η εταιρία ΤΙΤΑΝ Α.Ε. διαθέτει 4 εργοστάσια τσιμέντου στην Ελλάδα και 7 στο εξωτερικό.

- Στην Ελλάδα (1 στο Καμάρι Βοιωτίας, 1 στην Ελευσίνα, 1 στην Θεσσαλονίκη, και 1 στο Δρέπανο Αχαΐας)
- Στο εξωτερικό (2 USA, 2 στην Αίγυπτο, 1 στα Σκόπια, 1 στην Βουλγαρία, και 1 στην Σερβία)

Η εταιρία ΑΓΕΤ «ΗΡΑΚΛΗΣ» διαθέτει 3 εργοστάσια στην Ελλάδα (1 στον Βόλο, 1 στην Χαλκίδα, και 1 στο Μηλάκι Αλιβερίου)

Τα τσιμέντα ΧΑΛΥΨ διαθέτει 1 εργοστάσιο τσιμέντου στον Ασπρόπυργο.



Εικόνα 1.1: Κατανομή ελληνικών εργοστασίων τσιμέντου [Βιβλιογραφία 21]

1.3 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Τσιμέντο είναι μία υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μία πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληρύνεται έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητα της ακόμα και κάτω από το νερό. Αποτελείται από οξείδια του ασβεστίου, πυριτίου, αργιλίου και σιδήρου που είναι ενωμένα μεταξύ τους και αποτελούν το 90% του βάρους του. Το υπόλοιπο μέρος είναι γύψος και μικρές ποσότητες αλάτων μαγνησίου, καλίου, νατρίου και άλλων στοιχείων.

Το τσιμέντο είναι βιομηχανικό προϊόν που παράγεται με την έψηση σε ειδικούς κλιβάνους μίγματος από αλεσμένο ασβεστόλιθο και άργιλο, σε θερμοκρασίες της τάξης των 1450 C. Το προϊόν που προκύπτει από στις συνθήκες αυτές από τον ορυκτολογικό μετασχηματισμό των πρώτων υλών ονομάζεται κλίνκερ και στην συνέχεια αλέθεται σε σκόνη για να γίνει το γνωστό τσιμέντο.



Εικόνα 1.2: Πρώτες ύλες και τελικό προϊόν παραγωγής τσιμέντου [Βιβλιογραφία 23]

Το τσιμέντο Πόρτλαντ κατέχει την πρώτη θέση στην παραγωγή του τσιμέντου γενικά. Στις περισσότερες χώρες που κατασκευάζεται το τσιμέντο Πόρτλαντ αναγνωρίζονται μερικοί τύποι που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι πιο ενδιαφέρουσες μεταβλητές είναι η ταχύτητα σκληρύνσεως, η ταχύτητα και η ολική ελκυόμενη θερμότητα κατά την ενυδάτωση και η αντίσταση του σκληρυμένου τσιμέντου στην προβολή από διαλύματα θεικών. Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζονται από τη σχετική αναλογία και από φυσικούς συντελεστές όπως η λεπτότητα άλεσης.

Εκτός των τύπων τσιμέντου Πόρτλαντ κατασκευάζονται και μερικοί άλλοι για ειδικές χρήσεις.

- 1) Λευκά τσιμέντα κατασκευάζονται από υλικά χωρίς Fe όπως ο ασβεστόλιθος, περιέχουν C3S, β-C2S και C3A.
- 2) Επίσης για να επιτευχθεί η στεγανοποίηση των οπών που ανοίγονται κατά τις γεωτρήσεις πετρελαίου, όπου επικρατούν συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσεως, έχουν κατασκευαστεί τα τσιμέντα (oil well cement). Στα τσιμέντα αυτά επιδιώκεται μεγαλύτερη λεπτότητα της συνήθους και χαμηλός λόγος Al_2O_3/Fe_2O_3 ώστε να μην υπάρχει C3A και με την προσθήκη οργανικών αντιδραστηρίων όπως υδατάνθρακες, επιβραδύνεται η πήξη των τσιμέντων αυτών, πράγμα απαραίτητο για την χρήση τους.
- 3) Στην ίδια κατηγορία των άλλων τύπων τσιμέντων ανήκουν και τα τσιμέντα σκωρίας (slag cements), τα διογκωμένα τσιμέντα (expansive cements), τα ποζολανικά τσιμέντα (pozzolanicements), τα τσιμέντα τοιχοποιίας, τα αργιλικά τσιμέντα (aluminous cements), τα πυρίμαχα τσιμέντα (Ba-Aluminate cements).

Πίνακας 1.1: Συστάσεις διαφορετικών τύπων τσιμέντων

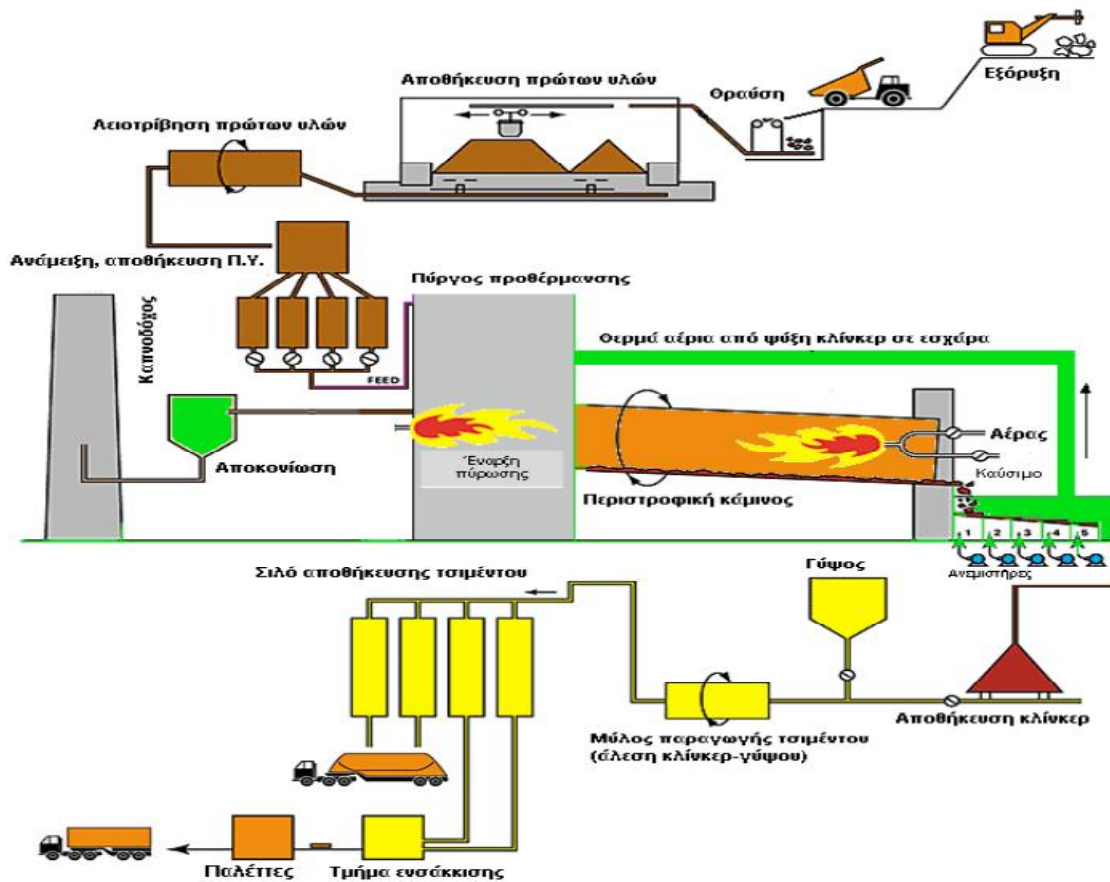
Τύπος τσιμέντου	Κύρια χαρακτηριστικά
Πόρτλαντ κοινό (OPC)	C3A: 8-15% C2S:~25% C4AF:8-15% C3S:~50%
Μέσης Θερμότητας Ενυδατώσεως (Μ.Θ.Ε.)	C3A: ~5%
Υψηλών Αρχικών Αντοχών (Υ.Α.Α.)	C3S:55-60% Μεγάλη λεπτότητα
Χαμηλής Θερμότητας Ενυδατώσεως (Χ.Θ.Ε.)	C3A: ~5% C2S:υψηλό (35-40%)
Αντοχής σε Θειικά Άλατα	C3A: ≤5% Συνήθως $C4AF + 2C3A < 20\%$
Λευκά	Κυρίως C3S, C2S, C3A

1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα και αρκετά περίπλοκη διαδικασία καθώς ακολουθεί μια σειρά διεργασιών οι οποίες είναι απαραίτητες για την παραγωγή του τσιμέντου. Οι διεργασίες αυτές περιγράφονται παρακάτω με τη σειρά της παραγωγικής διαδικασίας.

- Αρχικά πραγματοποιείται η λατόμευση των Α υλών
- Ακολουθεί η θραύση των Α υλών
- Η αποθήκευση και προομοιογένεια των Α υλών
- Η ξήρανση και άλεση των Α υλών
- Η ομογενοποίηση και αποθήκευση φαρίνας
- Η έμψηση
- Η άλεση τσιμέντου

Στην συνέχεια το τσιμέντο αποθηκεύεται σε σιλό που αποτελούν χώρους αποθήκευσης μέσης χρονικής διάρκειας και διατίθεται στην κατανάλωση χύμα ή σε σάκους 20kg και 50kg. Η μεγαλύτερες ποσότητες διατίθενται χύμα με ειδικά σιλοφόρα αυτοκίνητα ή πλοία.



Εικόνα 1.3: Γραμμή παραγωγής τσιμέντου [Βιβλιογραφία 23]

1.4.1 Λατόμευση των Α υλών

Η εξόρυξη των πρώτων υλών για την παραγωγή του τσιμέντου αποτελεί το πρώτο στάδιο στην γραμμή παραγωγής. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι ο ασβεστόλιθος, η κιμωλία, οι μάργκες, οι άργιλοι, οι σχιστόλιθοι και άλλα υλικά που ανήκουν στην κατηγορία των ημίσκληρων έως σκληρών υλικών. Για την εξόρυξη τους και ιδιαίτερα του ασβεστόλιθου απαιτείται διάτρηση και ανατίναξη με χρήση εκρηκτικών υλικών (όπως ζελατινώδη εκρηκτικά, κονιάδη σε σχήμα φυσιγγιού και εκρηκτικά με αμμωνιτίδα). Μερικά από τα υλικά αυτά όπως η κιμωλία και οι άργιλοι που είναι πιο μαλακά μπορούν να εξορυχτούν μέσω σκαπτικών μηχανημάτων.

Τα λατομεία είναι ανοικτού υπαίθριου μετώπου έχοντας εκτεθειμένη σχεδόν κατακόρυφα την επιφάνεια του πετρώματος. Οι βιομηχανίες τσιμέντου βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση από αυτά και εφοδιάζονται τις πρώτες ύλες είτε μέσω μεγάλων φορτηγών, είτε μέσω μεταφορικών ταινιών απευθείας στο εργοστάσιο όπου μεταφέρονται στην εγκατάσταση θραύσεως.



Εικόνα 1.4: Λατομείο εξόρυξης πρώτων υλών [Βιβλιογραφία 23]

1.4.2 Θραύση Α΄ υλών

Η θραύση των πρώτων υλών αποτελεί το δεύτερο στάδιο της παραγωγικής γραμμής. Οι θραυστήρες που χρησιμοποιούνται για την θραύση των υλικών διακρίνονται σε εκείνους που χρησιμοποιούν για την θραύση την συμπίεση (θραυστήρες με σιαγόνα, περιστροφικοί ή κωνικοί θραυστήρες και θραυστήρες με κυλίνδρους) και σε εκείνους που χρησιμοποιούν την κρούση (θραυστήρες με σφυριά). Οι πρώτες ύλες από το λατομείο μεταφέρονται στο συγκρότημα του θραυστήρα και τροφοδοτούνται απευθείας στην χοάνη τροφοδοσίας του. Η χοάνη οδηγεί τα υλικά σε μια μεταλλική πλακοταινία ή σε περιστρεφόμενους κυλίνδρους και από εκεί οδηγείται στον θραυστήρα όπου γίνεται η ελάττωση του μεγέθους των υλικών, μικρότερα των 2,5cm. Το παραγόμενο από τον θραυστήρα υλικό οδηγείται για προομοιογενοποίηση και αποθήκευση μέσω μεταφορικών ταινιών.



Εικόνα 1.5: Θραυστήρας σιαγώνων



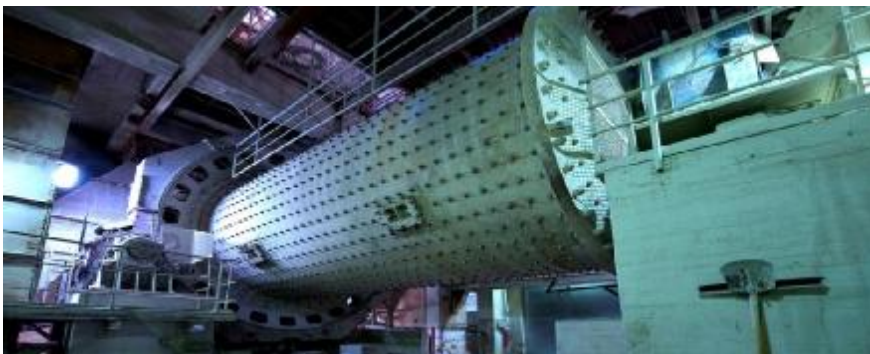
Εικόνα 1.6: Θραυστήρας με σφυριά

1.4.3 Αποθήκευση και προομοιογένεια των Α΄ υλών

Για να ψηθεί σωστά η φαρίνα στον περιστροφικό κλίβανο και να παραχθεί ομοιόμορφη ποιότητα κλίνκερ, θα πρέπει να έχει ομοιόμορφη χημική σύσταση. Για τον λόγο αυτό η πρώτη ύλη θα πρέπει να ομογενοποιηθεί πριν και μετά την άλεση της στους μύλους χώματος. Όσο καλή ομογενοποίηση γίνει πριν την άλεση (προομοιογένεια), τόσο λιγότερη προσπάθεια θα πρέπει να καταβληθεί μετά την άλεση για ομογενοποίηση της φαρίνας. Συνήθως δημιουργούνται δύο μίγματα από τα οποία το ένα είναι υψηλής τιτλοδότησης σε CaO (ψηλό) και το άλλο χαμηλής σε CaO (χαμηλό). Για κάθε ένα από τα δύο μίγματα δημιουργούνται δύο επιμήκεις σωροί έτσι ώστε όταν η απόθεση γίνει στον ένα σωρό, η απόληψη να γίνεται από τον άλλο. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για την απόθεση και την απόληψη του υλικού. Κατά την απόθεση ο αποθέτης μπορεί να κινείται συνεχώς από την μία άκρη της σωρού στην άλλη και αντίστροφα ή να προχωράει βηματικά μόλις ο σωρός στο σημείο απόθεσης φθάσει στο τελικό ύψος. Ο σωρός μπορεί να δημιουργείται από στοιβάδες υλικού η μια πάνω στην άλλη (μέθοδος Chevron) ή πολλές παράλληλες σειρές η μια δίπλα στην άλλη και κατόπιν πάνω στις προηγούμενες (μέθοδος Windrow) ή ακόμη από μικρότερους σωρούς στην σειρά (μέθοδος κωνικών κελύφων). Η απόληψη μπορεί να γίνει κόβοντας τον σωρό σε φέτες κάθετα προς τον άξονα του ή παράλληλα προς αυτόν. Επίσης μπορεί να γίνει και από υπόγειες θυρίδες κάτω από τον σωρό.

1.4.4 Ξήρανση και άλεση πρώτων υλών

Στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της άλεσης των πρώτων υλών στους μύλους άλεσης (MA). Οι πρώτες ύλες (ασβεστόλιθοι, αργιλοπυριτικά και σκουριά) εισέρχονται στον μύλο έχοντας ένα ποσοστό υγρασίας που απομακρύνεται με την χρησιμοποίηση των απαερίων των περιστροφικών κλιβάνων. Έπειτα το μίγμα των πρώτων υλών υπόκειται σε περεταίρω θραύση μέσω χαλύβδινων σφαιρικών αλεστικών σωμάτων, τα οποία εκμεταλλεύονται την περιστροφική κίνηση του μύλου κονιορτοποιούν τις πρώτες ύλες. Ο μύλος χωρίζεται εσωτερικά σε διαμερίσματα με διαφράγματα, όπως και από ειδικές πλάκες με σχισμές που αφήνουν να περνά ο αέρας και το προς άλεση υλικό. Το αλεσμένο προϊόν που προκύπτει από την άλεση αποκαλείται « **μίγμα φαρίνας** ».



Εικόνα 1.7: Μύλος άλεσης πρώτων υλών.

1.4.5 Ομογενοποίηση και αποθήκευση φαρίνας

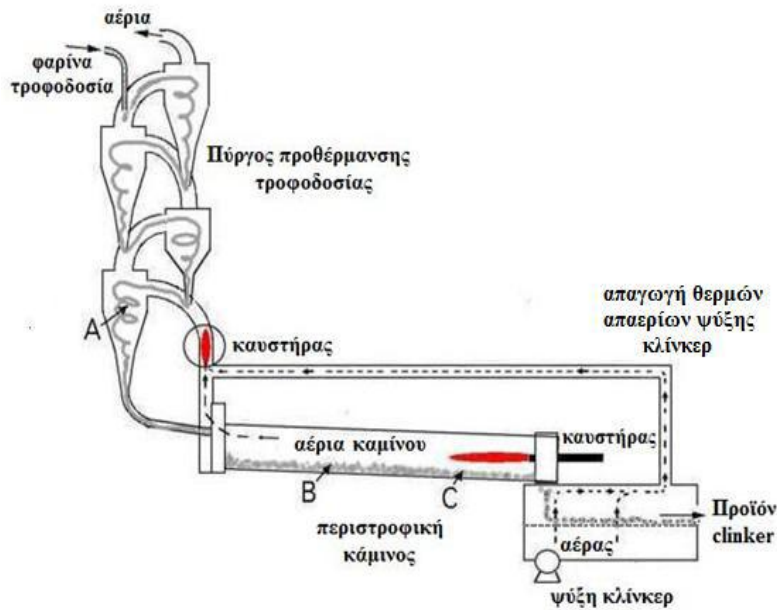
Εκτός από τα δύο προηγούμενα στάδια της προομοιογένειας και της άλεσης φαρίνας στα οποία έγινε ομογενοποίηση του αναμειχθέντος μείγματος των πρώτων υλών απαιτείται και μια τελική ομογενοποίηση της φαρίνας. Η ομογενοποίηση επιτυγχάνεται με την εμφύσηση αέρα από τον πυθμένα των σιλό αναμείξεως. Ο αέρας περνάει μέσα από κατάλληλες πορώδεις κεραμικές πλάκες και τα δημιουργούμενα λεπτά ρεύματα προκαλούν την ανάμειξη της φαρίνας. Το πιο γνωστό σύστημα ομογενοποίησης είναι της εταιρίας Fuller που χωρίζει τον πυθμένα σε τέσσερα μέρη και τον αέρα σε δύο ροές, όπου από αυτές, η μία είναι το 75% του αέρα και οδηγείται στο ένα τεταρτημόριο ενώ το άλλο 25% μοιράζεται στα υπόλοιπα τρία τεταρτημόρια. Εναλλάσσοντας κατά διαστήματα το τεταρτημόριο στο οποίο οδηγείται το 75% του αέρα πετυχαίνεται η αναμόχλευση όλης της ποσότητας της φαρίνας που περιέχεται στο σιλό.

Ο ρυθμός εξαγωγής της φαρίνας ελέγχεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η φαρίνα μεταφέρεται σε έναν ζυγιστικό τροφοδότη και από εκεί τροφοδοτείται στον κλίβανο μέσω μεταφορικών κοχλιών, μεταφορικών ταινιών, αναβατήρων ή με πνευματική μεταφορά με αντλίες Fuller.

1.4.6 Η έμψηση

Με τον όρο έμψηση εννοούμε τρεις διεργασίες, οι οποίες περιλαμβάνουν την προθέρμανση της φαρίνας, την κυρίως έψηση (κλινκεροποίηση) και την ψύξη του παραγόμενου κλίνκερ.

- Μετά την ομογενοποίηση η φαρίνα τροφοδοτείται στον προθερμαντή ο οποίος αποτελείται από μια συστοιχία κατακόρυφων κυκλώνων (συνήθως 4) οι οποίοι βρίσκονται εγκατεστημένοι πριν την είσοδο του κλιβάνου. Εκεί υφίσταται προοδευτική θερμική κατεργασία μέχρι τους 900°C, βρίσκεται δηλαδή στο στάδιο της αβεστοποίησης. Για την προθέρμανση του υλικού μέσα στο δίκτυο των κυκλώνων, χρησιμοποιούνται τα θερμά αέρια εξαγωγής των κλιβάνων και των διατάξεων ψύξης του κλίνκερ, τα οποία μεταφέρονται στο σύστημα με αεραγωγούς. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η χαμηλή ειδική κατανάλωση θερμότητας.



Εικόνα 1.8: Ενδεικτικός πύργος συστοιχίας κυκλώνων

- Στη συνέχεια οι περιστροφικοί κλίβανοι αναλαμβάνουν την έψηση. Οι περιστροφικοί κλίβανοι είναι μεταλλικοί κύλινδροι μήκους 50-150 μέτρων και διαμέτρου 3-5 μέτρων με εσωτερική επένδυση από ειδικά πυρότουβλα. Η περιστροφική κίνηση του κλίβανου και η κλίση του εξωθούν τη φαρίνα προς την έξοδο. Στην πορεία της συναντάει θερμοκρασίες που φτάνουν τους 1400-1500 C. Μέσα στον κλίβανο χάρη στις φυσικοχημικές διεργασίες, η φαρίνα μετατρέπεται σε ένα κοκκώδες προϊόν που λέγεται « κλίνκερ ».



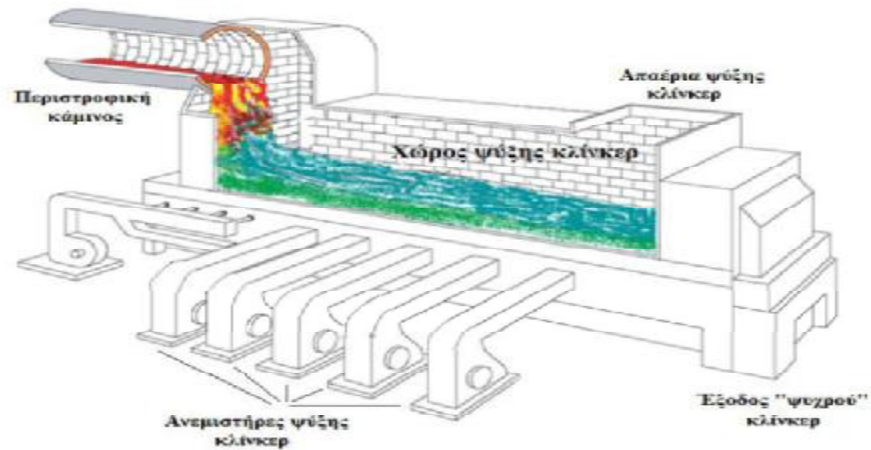
Εικόνα 1.9: Κλίβανος τσιμεντοβιομηχανίας



Εικόνα 1.10: Κλίνκερ τσιμέντου

- Το σχηματισμένο κλίνκερ, μετά την έξοδο του από την περιστροφική κάμινο σε θερμοκρασία 1400-1500 C οδηγείται στους ψυχαντήρες. Οι επικρατέστεροι τύποι ψυχαντήρων είναι με εσχάρα και οι πλανητικοί. Εκεί το κλίνκερ ψύχεται με εμφύσηση ψυχρού αέρα έως την θερμοκρασία των 80-150 C.

Οι ψυχαντήρες με εσχάρα αποτελεί ανεξάρτητο συγκρότημα του κλιβάνου, από πλευράς εγκατάστασης αλλά λειτουργικά συνδέεται στενά με αυτό. Το εξερχόμενο κλίνκερ του κλιβάνου πέφτει σε μια διάτρητη εσχάρα που αποτελείται από σειρές κινούμενων και ακίνητων πλακών, τοποθετημένων εναλλάξ. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την κίνηση του κλίνκερ προς την έξοδο του ψυχαντήρα όπου υπάρχει ένας θραυστήρας για την θραύση των μεγάλων. Η ψύξη του κλίνκερ επιτυγχάνεται με τον αέρα ο οποίος εισάγεται στον ψυχαντήρα με διάταξη ανεμιστήρων.



Εικόνα 1.11: Σύστημα αερισμού ψυχαντήρα με εσχάρα

Ο πλανητικός ψυχαντήρας αποτελείται από πολλούς κυλίνδρους (10 περίπου), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι περιφερειακά του κλιβάνου και στα τελευταία μέτρα αυτού (προς την έξοδο). Επικοινωνούν με τον κλίβανο με το ένα άκρο τους, απ' όπου εισέρχεται το κλίνκερ, από το άλλο άκρο εισάγεται ο αέρας, με αναρρόφηση, ο οποίος ψύχει το κλίνκερ και ο θερμός πλέον οδηγείται σαν δευτερογενής αέρας καύσης.



Εικόνα 1.12: Πλανητικές διατάξεις ψύξης

Η διαδικασία της ψύξης θεωρείται απαραίτητη καθώς η μεταφορά του κλίνκερ γίνεται ευκολότερη αφού αυτό ψυχθεί πρώτα και εξοικονομείται ενέργεια με την εκμετάλλευση των θερμών αερίων, τα οποία οδηγούνται σαν δευτερογενείς αέρας καύσης στον κλίβανο.

1.4.7 Άλεση τσιμέντου

Το παραγόμενο κλίνκερ εξερχόμενο από την διαδικασία της έψησης μεταφέρεται μέσω μεταφορικών ταινιών στα σιλό αποθήκευσης κλίνκερ, όπου και φυλάσσεται μέχρι να τροφοδοτηθεί στο επόμενο και τελευταίο τεχνολογικό στάδιο παραγωγής τσιμέντου που είναι η άλεση τσιμέντου. Στην συνέχεια ο μύλος τσιμέντου (MT) τροφοδοτείται με κλίνκερ που είναι το κύριο προϊόν του τσιμέντου, με γύψο που είναι απαραίτητο προϊόν για την επιβράδυνση των πήξεων καθώς και με άλλα υλικά όπως ποζολανικά υλικά, ιπτάμενη τέφρα, σκουριά που είναι προσμίξεις διαφόρων ποιοτήτων τσιμέντου.

Οι μύλοι τσιμέντου (MT) στους οποίους αλέθουμε το κλίνκερ με γύψο για την παραγωγή τσιμέντου είναι επίσης χαλύβδινοι σωλήνες που περιστρέφονται οριζόντια όπως και οι μύλοι φαρίνας και έχουν πολλά κοινά τεχνικά χαρακτηριστικά. Ο μύλος τσιμέντου αποτελείται και αυτός από δύο συνήθως διαμερίσματα που χωρίζονται με διαφράγματα και ειδικές πλάκες με σχισμές όπου περνά ο αέρας και το αλεσμένο πλέον τσιμέντο. Το μέγεθος των χαλύβδινων σφαιρικών αλεστικών σωμάτων που διαθέτει ο μύλος είναι διαφόρων μεγεθών από την αρχή ως το τέλος του μύλου, όπου μέσω αυτών τα υλικά αλέθονται μέχρι να προκύψει μια πολύ λεπτή σκόνη τσιμέντου.



Εικόνα 1.13: Μύλος τσιμέντου.

Τέλος το τσιμέντο εξέρχεται από τον μύλο τσιμέντου και αποθηκεύεται σε ειδικά σιλό μέσης χρονικής διάρκειας.

1.5 ΚΑΥΣΙΜΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Στις μέρες μας οι τσιμεντοβιομηχανίες έχουν στραφεί κυρίως στην χρήση στερεών καυσίμων όπως άνθρακας, **πετρελαϊκό κόκ (Pet-coke)** και σε **εναλλακτικά καύσιμα**, έναντι των αέριων καυσίμων (φυσικό αέριο) και υγρών καυσίμων (μαζουτ).

Το **pet-coke** είναι παραπροϊόν της διύλισης πετρελαίου. Παράγεται κατά την πυρόλυση των υπολειμμάτων της τροφοδοσίας και από την απόσταξη των βαριών πετρελαίων. Πρόκειται για ένα μαύρο κοκκώδες υλικό που αποτελείται κυρίως από άνθρακα. Η σύσταση του ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα του πετρελαίου από το οποίο προήλθε, καθώς επίσης και τις μεθόδους επεξεργασίας.

Πίνακας 1.2: Σύσταση pet-coke

Υγρασία	0,5-10%
Τέφρα	0,8 max
Πτητικές ουσίες	8-14%
Καθαρός άνθρακας	80% min
Θείο	Up to 6%
Σκληρότητα	40-95

Το pet-coke εμπορεύεται και διακινείται κυρίως σε κοκκώδη μορφή και σε λιγότερες περιπτώσεις εν διαλύσει μέσα σε νερό. Πριν την καύση του θρυμματίζεται ώστε να αποκτήσει ακόμα μικρότερο μέγεθος κόκκων. Όταν μεταφέρεται σε μορφή σκόνης πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερα μέτρα προφύλαξης για την αποφυγή της διασποράς. Το ίδιο ισχύει και για τις φάσεις της προσωρινής αποθήκευσης, τον θρυμματισμό και της μεταφοράς στην εστία καύσης, για την προστασία των εργαζομένων. Χρησιμοποιείται πάντα σε στερεά μορφή στους περιστροφικούς κλιβάνους της τσιμεντοβιομηχανίας. Το κυριότερο πλεονέκτημα του ως καύσιμο είναι η πολύ καλή αναλογία θερμογόνου δύναμης και τιμής. Τα μειονεκτήματα του είναι τόσο τεχνικά όσο και περιβαλλοντικά. Από τεχνικής άποψης, η χαμηλή του περιεκτικότητα σε πτητικές ενώσεις το καθιστά δυσκολότερο να αναφλεγεί, με αποτέλεσμα να απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες. Επίσης στερεό υπόλειμμα μετά την καύση (περίπου 4%) επικάθεται υπό μορφή σκόνης, δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό και αυξάνεται η απαίτηση για συντήρηση και επισκευή. Περιβαλλοντολογικά, η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, καθώς επίσης και οι ποσότητες βαρέων μετάλλων που υπάρχουν στην τέφρα αποτελούν σημαντικούς κινδύνους για τις περιοχές οι οποίες γειτνιάζουν με τις εστίες καύσης που χρησιμοποιούν pet-coke. Επίσης το διοξείδιο του θείου έχει τοξικές δράσεις (βρογχίτιδα, βρογχοσπασμός), ενώ θεωρείται και πιθανό καρκινογόνο.

Τα **εναλλακτικά καύσιμα** που χρησιμοποιεί η τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να είναι.

- Λάστιχα αυτοκινήτων
- Χαρτιά και πλαστικό
- Ξύλα
- Μεταχειρισμένα λάδια
- Λάσπες βιολογικών καθαρισμών
- Λάσπες διυλιστηρίων
- Κρεατάλευρα
- Αγροτικά κατάλοιπα
- RDF (καύσιμο από απορρίμματα)
- PDF (καύσιμο από υλικά συσκευασίας)

Η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων ή καλύτερα η θερμική αξιοποίηση αποβλήτων είναι όχι μόνο εφικτή, αλλά και πολλαπλά ωφέλιμη :

- Μειώνει το ενεργειακό κόστος, βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα της τσιμεντοβιομηχανίας.

- Συμβάλει στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Περί τα 5 εκ. τόνοι άνθρακα τον χρόνο εξοικονομούνται στην Ε.Ε. υποκαθιστάμενα από εναλλακτικά καύσιμα.
- Αποτελεί την καλύτερη περιβαλλοντικά λύση. Σε θερμοκρασία υλικού 1450°C, όλες οι βλαβερές οργανικές ουσίες (φουράνια, διοξίνες) διασπώνται πλήρως και τα ανόργανα άκαυστα κατάλοιπα εγκλωβίζονται στο παραγόμενο κλίνκερ.
- Μειώνει τις εκπομπές CO₂ με την αποφυγή καύσης των αποβλήτων σε βιομηχανικούς αποτεφρωτήρες ή της ταφής τους σε χωματερές. Στην Ε.Ε. αποφεύγεται σήμερα η εκπομπή 8 εκ. τόνων CO₂ ετησίως από την χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία.

Πίνακας 1.3: Είδος και θερμογόνος δύναμη καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία

Συμβατικά και εναλλακτικά καύσιμα τσιμεντοβιομηχανίας	Θερμογόνος δύναμη GJ/tonne
A. Συμβατικά καύσιμα	
• Άνθρακας (6000 kcal/kg)	25.3
• Pet-coke	33.7
• Μείγμα άνθρακα-Petcoke	29.0
B. Εναλλακτικά καύσιμα	
1. Άχρηστα ελαστικά οχημάτων	27-31
2. Άχρηστα λιπαντικά	33
3. Βιομηχανικά απορρίμματα	
• Χαρτοπολτός, χαρτί, χαρτόνια	17
• Πλαστικά	21
• Υλικά συσκευασίας	22
• Απορρίμματα υφαντουργίας	21
• Άλλα	21
4. Μείγμα οικιακών απορριμμάτων	15
5. Άλευρα οστών και ζωικά λίποι	19
6. Ρινίσματα βιομηχανίας ξύλου	13
7. Διαλύτες	24
8. Άλλα όπως	
• Ίλυσ διωλιστηρίων	13
• Οργανικά κατάλοιπα διωλιστηρίων	13-16
• Ίλυσ βιολογικών καθαρισμών (ξηρή)	

Πίνακας 1.4 Είδη καυσίμων που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία

Είδος καυσίμου	Ποσοστό (%)
Pet-coke	50.5
Ανθρακες	24
Πετρέλαιο και βαρέα κλάσματα	5
Λιγνίτες και άλλα είδη στερεών καυσίμων	5.5
Φυσικό αέριο	1.0
Εναλλακτικά καύσιμα	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΑΛΕΣΗ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σαν άλεση στην βιομηχανία τσιμέντου χαρακτηρίζουμε τον λεπτότατο διαμελισμό των πρώτων υλών για την παραγωγή φαρίνας, τσιμέντου καθώς και άνθρακα για καύση.

Ο ρόλος της άλεσης σε μια βιομηχανία τσιμέντου είναι πολύ σημαντικός. Η σημασία της φαίνεται και από το γεγονός ότι η διεργασία της αλέσεως γίνεται δύο φορές κατά τη παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου (στο τέταρτο στάδιο που αποτελεί την ξήρανση και άλεση πρώτων υλών και στο έβδομο στάδιο της άλεσης τσιμέντου, όπως περιγράφεται παραπάνω στο υποκεφάλαιο 1.2). Οι στόχοι που επιδιώκονται είναι διαφορετικοί για την άλεση του μίγματος των πρώτων υλών (άλεση φαρίνας) και διαφορετικοί για την άλεση του τελικού προϊόντος (άλεση τσιμέντου).

Στην πρώτη περίπτωση επιδιώκεται η δημιουργία πολύ λεπτών κόκκων για την αύξηση της επιφάνειας του στερεού και την συμπλήρωση κατά συνέπεια της αντιδράσεως στη περιστροφική κάμμο. Στο τσιμέντο η λεπτότητα της αλέσεως αφ' ενός μεν επιδρά στο χρόνο αναπτύξεως των αντοχών, αφ' ετέρου δεν ενεργοποιεί την επιφάνεια των δημιουργούμενων νέων σωματιδίων. Στην ενεργοποίηση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο η ενυδάτωση και σκλήρυνση του τσιμέντου.

Η άλεση της φαρίνας (μίγμα πρώτων υλών) και του τσιμέντου γίνεται σε διάφορους μύλους άλεσης. Ένα είδος είναι ο σωληνωτός μύλος (TUBE MILL), δηλαδή ένας σωληνωτός κυλινδρικός σωλήνας που το πηλίκο του μήκους L προς την διάμετρο D είναι $6/1$ έως $3/1$. Ένα άλλο είδος είναι ο σφαιρόμυλος (BALL MILL) ένας κυλινδρικός σωλήνας που το πηλίκο L/D είναι $2/1$. Ένα τρίτο είδος είναι ο μύλος περιστρεφόμενων τροχών (VERTICAL ROLLER MILL). Από την μεγάλη ποικιλία των μύλων, στον χώρο της βιομηχανίας τσιμέντου και ειδικότερα για την άλεση του κλίνκερ, χρησιμοποιούνται σχεδόν κατ' αποκλειστικά σφαιρόμυλοι (BALL MILL).



Εικόνα 2.1: (Roller mill)



Εικόνα 2.2: (Ball mill)

2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΛΕΣΗΣ

Η άλεση μαζί με την θραύση αποτελούν τα δύο βασικά στάδια της ελάττωσης μεγέθους των διάφορων στερεών σωμάτων. Με την χρήση θραυστήρων με σφυριά επιτυγχάνεται μεγάλος βαθμός απομείωσης μεγέθους και έτσι το προϊόν των θραυστήρων κυμαίνεται στα 100mm, μέγεθος που άνετα αποτελεί τροφοδοσία για τα συστήματα άλεσης. Τα μηχανήματα άλεσης τροφοδοτούνται με κόκκους διαστάσεων των 100mm και παρέχουν προϊόν, που ανάλογα με την περίπτωση (τύπος τσιμέντου), μπορεί και όλο να είναι μικρότερο των 90μm, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του είναι πολύ λεπτότερο.

Η βασική διαφορά των δύο διεργασιών είναι ότι ενώ για την θραύση η απαιτούμενη ενέργεια είναι σχετικά μικρή, η άλεση αντίθετα απαιτεί μεγάλα ενεργειακά ποσά που μπορεί να φτάσουν έως και το 50πλάσιο αυτών που απαιτούνται για την θραύση.

Στην τσιμεντοβιομηχανία μέχρι και το 75% της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου καταναλώνεται για την κονιοποίηση (διαδικασία θραύσης και άλεσης) των υλικών.

- Θραύση πρώτων υλών 1-2 KWh/t
- Άλεση φαρίνας 5-15 KWh/t
- Άλεση άνθρακα 2-4 KWh/t
- Άλεση τσιμέντου 30-60 KWh/t

Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου με το σύνολο των φάσεων παραγωγής κυμαίνεται από 90-130 KWh/t.

Πίνακας 2.1: Ενεργειακή απόδοση μηχανισμού κονιοποίησης

Σιαγωνικός θραυστήρας ή θραυστήρας με ρόλους	70-90 %
Θραυστήρας κρούσης	30-40 %
Σφυροθραυστήρες	15-20 %
Κυλινδρόπρεσα	10-20 %
Κάθετος μύλος	7-15 %
Σφαιρόμυλος	6-9 %

Επίσης η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά την άλεση εξαρτάται :

- Από το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων.
- Την σκληρότητα, την αντοχή, την ελαστικότητα και την πλαστικότητα των προς άλεση υλικών.
- Τα χαρακτηριστικά του μήλου (διαστάσεις, σχέση μήκους προς διάμετρο).
- Την θερμοκρασία και υγρασία του υλικού.
- Την ειδική επιφάνεια του προϊόντος.
- Το σύστημα άλεσης.

Έχει διαπιστωθεί ότι η ειδική ενέργεια άλεσης είναι συνάρτηση της σκληρότητας του κλίνκερ (δείκτης έργου ή δείκτης Bond) , της λεπτότητας Blaine (κοκκομετρία) του τσιμέντου που θα παραχθεί και δίνεται απο την παρακάτω σχέση.

$$E = 10^{(1.74 * 10^{(-4)} * F_{bi} + 0.035 * w_i + 0.4714)}$$

Όπου E η ενέργεια άλεσης του κλίνκερ σε KWh/t, F_{bi} η λεπτότητα του τσιμέντου (Blaine) σε cm²/g και w_i ο δείκτης έργου (work index) σε KWh/short ton. Στους συντελεστές της εξίσωσης έχει ενσωματωθεί ο συντελεστής μετατροπής 1 short ton (s.t) = 0.907 tonne.

2.3 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΛΕΣΗΣ

Η διαχείριση μιας μονάδας άλεσης γίνεται με στόχο την αριστοποίηση της λειτουργίας της, έτσι ώστε με δεδομένη ποιότητα παραγόμενου προϊόντος (η ποιότητα στη προκειμένη περίπτωση είναι η λεπτότητα του προϊόντος) να μεγιστοποιηθεί η δυναμικότητα της και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Επομένως τρεις είναι οι βασικοί στόχοι που πρέπει να επιδιώκονται από μία εγκατάσταση άλεσης :

- Σταθερότητα στην ποιότητα του προϊόντος ή καλύτερα η ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων.
- Ελαχιστοποίηση της ειδικής κατανάλωση ενέργειας:

$$(q/M) = \min$$

Γεγονός που ισοδυναμεί είτε με μεγιστοποίηση της δυναμικότητας του μηχανήματος (M = max) είτε με ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας (q = min).

- Βαθμός απόδοσης (a) όσο το δυνατό μεγαλύτερος :

$$a = \max$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα τμήματα άλεσης είναι τα πιο ενεργοβόρα τμήματα ενός εργοστασίου τσιμέντου όσον αφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσης είναι πολύ μικρός και σπάνια υπερβαίνει το 5 %. Η ενέργεια που χρειάζεται είναι μεγάλη γιατί ένα μεγάλο μέρος αυτής σπαταλάται. Εκτός από ένα μικρό μέρος της ενέργειας που πηγαίνει στην σμίκρυνση του υλικού (έργο θραύσεως) το υπόλοιπο σπαταλάται :

- Στην τριβή των κόκκων μεταξύ τους
- Στην τριβή των κόκκων με τα στοιχεία του μύλου
- Στον ήχο
- Στην θερμότητα
- Στους κραδασμούς
- Στον βαθμό αποδόσεως του κινητήρα
- Στον βαθμό αποδόσεως του μειωτή

2.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΛΕΣΗΣ

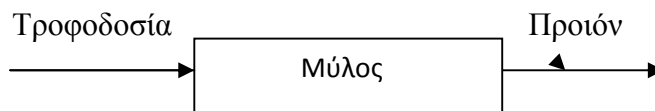
Οι διατάξεις άλεσης κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες :

- A) Διατάξεις διακοπτόμενης λειτουργίας (batch).
- B) Διατάξεις ανοιχτού κυκλώματος (open circuit).
- Γ) Διατάξεις κλειστού κυκλώματος (closed circuit).

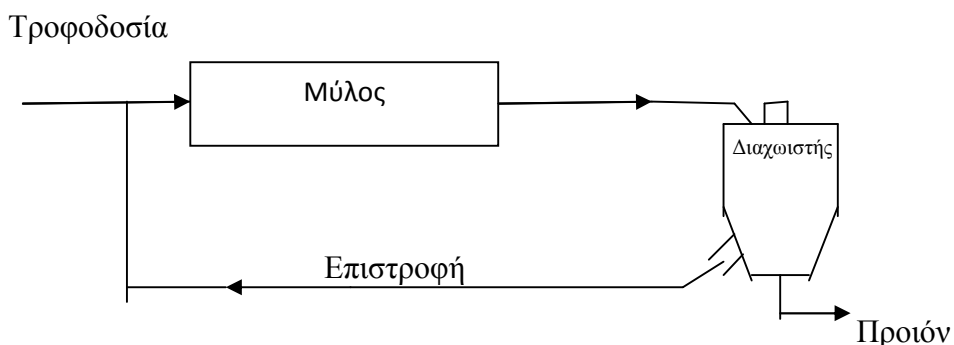
Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν διατάξεις στις οποίες το προς άλεση υλικό εισάγεται στον μύλο, αλέθεται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα ανάλογα με την επιδιωκόμενη λεπτότητα και στην συνέχεια εξάγεται προκειμένου να εισέλθει άλλη και να επαναληφθεί ο ίδιος κύκλος. Η κατηγορία αυτή δεν συνιστάται στις βιομηχανίες τσιμέντου, εφόσον δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις μεγάλες δυναμικότητες που επιζητούνται από τους μύλους.

Στην διάταξη του ανοιχτού κυκλώματος υπάρχει μια συνεχής δίοδος του υλικού μέσα από τον μύλο. Στο ανοιχτό κύκλωμα η άλεση ολοκληρώνεται με μια διέλευση του υλικού μέσα από τον μύλο σε αντίθεση με την απλή μορφή κλειστού κυκλώματος, όπου το προϊόν της άλεσης του μύλου οδηγείται σε ένα διαχωριστή όπου και διαμοιράζεται σε χονδρόκοκκο και σε λεπτόκοκκο όπου το λεπτόκοκκο αποτελεί το τελικό προϊόν της άλεσης, ενώ το χονδρόκοκκο επιστρέφει στον μύλο για συμπληρωματική άλεση.

Με τον όρο διάταξη άλεσης εννοούμε ένα σύνολο βοηθητικών μηχανημάτων, απαραίτητα για την δημιουργία του λεπτού προϊόντος. Στο σύνολο αυτών των μηχανημάτων περιλαμβάνονται διατάξεις προσαγωγής και απαγωγής του υλικού, διατάξεις αερισμού ή ψεκασμού του μύλου με νερό, διαχωριστές, συστήματα αποκονίωσης και απαιτούν μια επιπρόσθετη ενέργεια 15-20% σε σχέση με αυτή που δαπανάται στον μύλο.



Σχήμα 2.1: Ανοιχτό κύκλωμα



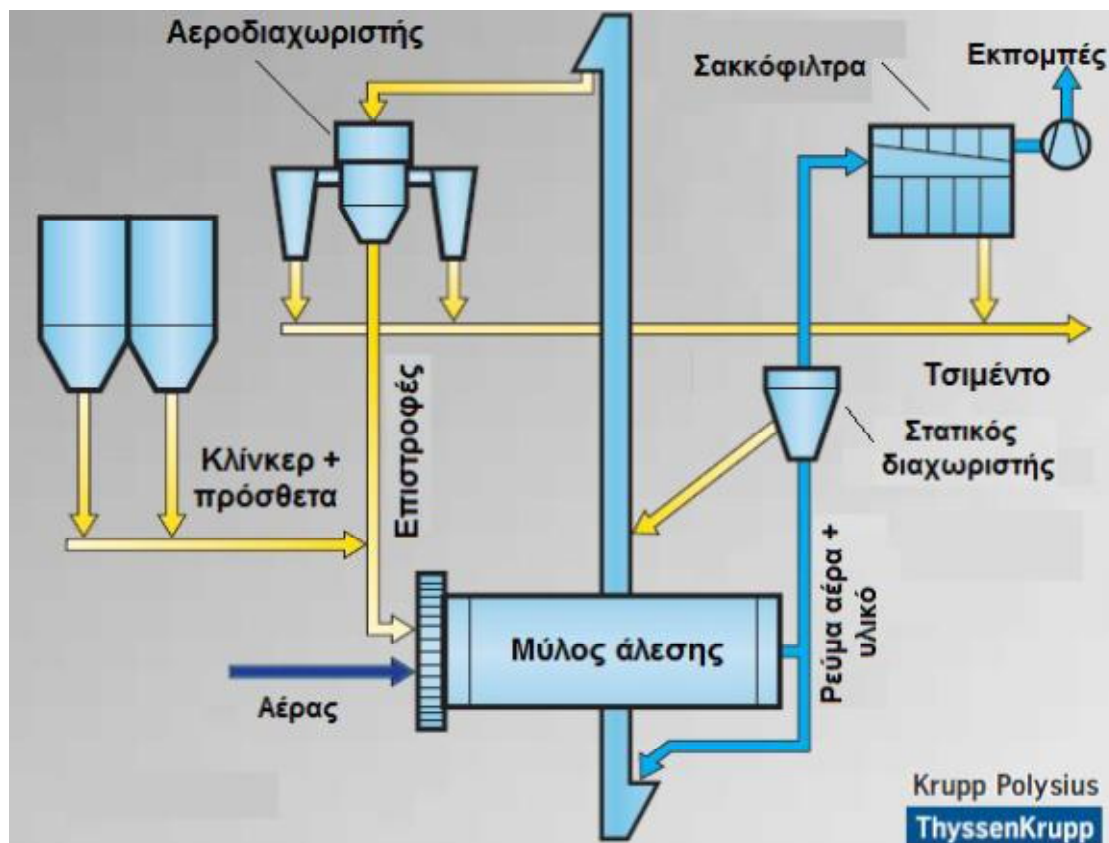
Σχήμα 2.2: Κλειστό κύκλωμα

Η άλεση στο κλειστό κύκλωμα συνεπάγεται με την δίοδο του χονδρόκοκκου υλικού περισσότερες από μία φορές στον μύλο, σε αντίθεση με το λεπτόκοκκο που διαχωρίζεται στον διαχωριστή και αποφεύγεται με τον τρόπο αυτό η περαιτέρω άλεση των κόκκων που έχουν ήδη την επιθυμητή λεπτότητα.

Η κυκλοφορία του υλικού από τον μύλο στον διαχωριστή γίνεται είτε με σύστημα αναβατορίων (bucket elevator) είτε με πνευματική μεταφορά (air slides). Αντιθέτως, η κυκλοφορία από τον διαχωριστή προς τον μύλο γίνεται με την βαρύτητα.

Το τελικό προϊόν των κλειστών κυκλωμάτων άλεσης χαρακτηρίζεται από στενό κοκκομετρικό φάσμα, σε αντίθεση με το κοκκομετρικό φάσμα του προϊόντος από το ανοιχτό κύκλωμα που είναι αρκετά ευρύ.

Τα πλεονεκτήματα των κλειστών κυκλωμάτων άλεσης, έναντι των ανοιχτών είναι η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, (της τάξης του 20-40% ανάλογα με την λεπτότητα του προϊόντος) και οι βελτιωμένες ιδιότητες του προϊόντος λόγω της στενότερης κοκκομετρικής κατανομής του.



Εικόνα 2.3: Διάταξη άλεσης κλειστού κυκλώματος τσιμεντοβιομηχανίας.

Τέλος ένα σημαντικό μέγεθος για τα κλειστά κυκλώματα άλεσης είναι το κυκλοφορούν φορτίο του μύλου (L), που ορίζεται ως το πηλίκο της ποσότητας (χονδρόκοκκο) που επιστρέφει στον μύλο (R) προς τη νεοεισαγόμενη στο μύλο ποσότητα (F), η οποία είναι ίση με το λεπτόκοκκο που αποτελεί το τελικό προϊόν του συστήματος άλεσης.

$$L = R/F$$

Όσο το κυκλοφορούν φορτίο παίρνει μεγαλύτερες τιμές, τόσο το τελικό προϊόν είναι περισσότερο λεπτόκοκκο, καθόσον επιστρέφει μεγαλύτερη ποσότητα για συμπληρωματική άλεση. Επίσης παρατηρείται όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα να μειώνεται η παραγωγή του τμήματος άλεσης, ενώ αυξάνεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 2.2: Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας δυναμικότητας, κατανάλωση ενέργειας και κυκλοφορούμενου φορτίου.

Κυκλοφορούν φορτίο (%)	Ειδική επιφάνεια (cm ² /g)	Παραγωγή (t/h)	Ειδική κατανάλωση ενέργειας (KWh/t)
200	2500	115	31
250	2900	90	39
300	3400	70	50

Το τελικό προϊόν των κλειστών συστημάτων άλεσης χαρακτηρίζεται από στενό κοκκομετρικό φάσμα (συντελεστής ομοιομορφίας Rosin-Rammler $n = 0.99$), σε αντίθεση με το κοκκομετρικό φάσμα του προϊόντος από ανοιχτό κύκλωμα που είναι αρκετά ευρύ ($n = 65$).

2.5 ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΕΣ

Ο διαχωριστής όπως αναφέρθηκε είναι το μηχάνημα που διαχωρίζει το προϊόν της άλεσης σε χοντρό και λεπτό. Ανάλογα με το είδος του μύλου που υπάρχει και ο αντίστοιχος διαχωριστής.

Δύο είναι οι βασικοί τύποι διαχωριστών πρώτης γενιάς :

- Ο σταθερός διαχωριστής (διαχωριστής ελκυσμού)
- Ο διαχωριστής με ενσωματωμένο ανεμιστήρα

Επίσης υπάρχουν και οι διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας ή διαχωριστές τρίτης γενιάς.

2.5.1 Σταθερός διαχωριστής.

Ο σταθερός διαχωριστής (διαχωριστής ελκυσμού). Το μόνο κινούμενο μέρος του διαχωριστή είναι ο ανεμιστήρας που βρίσκεται έξω από το σώμα του διαχωριστή. Το ρεύμα του αέρα τραβά μέσα από τον μύλο το μισοαλεσμένο υλικό, που στη συνέχεια μεταφέρεται με τον σωλήνα αναρροφήσεως στο διαχωριστή. Εκεί το χονδρόκοκκο υλικό γυρίζει πάλι στο μύλο και το έτοιμο υλικό συγκρατείται σ' ένα κυκλώνα απ' όπου προχωρεί ανάλογα προς τα σιλό ομοιογένειας ή τα σιλό τσιμέντου.

2.5.2 Διαχωριστής με ενσωματωμένο ανεμιστήρα.

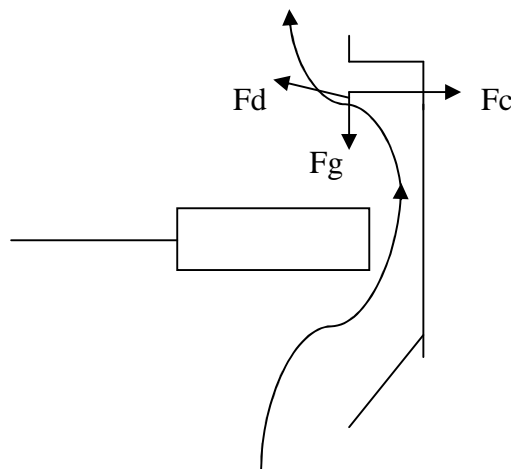
Ο διαχωριστής με ενσωματωμένο μέσα σε αυτόν ανεμιστήρα. Ο διαχωριστής αυτός που είναι και ο συνηθέστερος αποτελείται από ένα κυλινδροκωνικό σώμα που μέσα σε αυτό βρίσκεται ένα άλλο. Με αυτόν τον τρόπο τα δύο αυτά κυλινδροκωνικά σώματα σχηματίζουν μεταξύ τους ένα δακτυλοειδή χώρο. Ένας κάθετος άξονας που ξεκινά από την κορυφή του

διαχωριστή στο κέντρο του, φτάνει εκεί που αρχίζει ο εσωτερικός κώνος. Τον κάθετο αυτόν άξονα περιβάλλει ένας κύλινδρος που καθορίζει την διατομή μέσα από την οποία περνά το υλικό που πρόκειται να διαχωριστεί. Έξω από τον κύλινδρο είναι συναρμολογημένος ο ανεμιστήρας που κινείται με κινητήρα και μειωτή. Αυτοί βρίσκονται έξω και στην κορυφή του διαχωριστή. Κάτω από τον ανεμιστήρα, στερεωμένος στο κάτω μέρος του κάθετου άξονα βρίσκεται ο δίσκος διασκορπισμού στον οποίο πέφτει το υλικό. Κάτω από τον δίσκο διασκορπισμού, στην κορυφή της περιφέρειας του εσωτερικού κώνου, βρίσκονται σε σταθερούς κάθετους δακτύλιους τα πτερύγια του διαχωριστή που λέγονται περσίδες. Τα πτερύγια αυτά είναι στον χώρο μεταξύ των δακτυλίων και η θέση τους μπορεί να ρυθμιστεί χειροκίνητα ή με κινητήρα. Η θέση των πτερυγίων κατά την διεύθυνση της ακτίνας σημαίνει ότι αυτά είναι ανοικτά, ενώ κατά την διεύθυνση της εφαπτομένης σημαίνει ότι είναι κλειστά.

Η λειτουργία του στηρίζεται στην δημιουργία ενός εσωτερικού ρεύματος αέρα που ανακυκλώνεται συνεχώς από τον εσωτερικό προς τον εξωτερικό κώνο. Με τον τρόπο αυτόν απάγονται από τον εσωτερικό κύλινδρο οι λεπτότεροι κόκκοι που οδηγούνται στον εξωτερικό, ενώ οι χονδρότεροι παραμένουν στον εσωτερικό. Το υλικό όπως πέφτει στον δίσκο διασκορπισμού φυγοκεντρείται προς τα πλάγια.

Οι δυνάμεις που επιδρούν τον κόκκο υλικού είναι οι εξής :

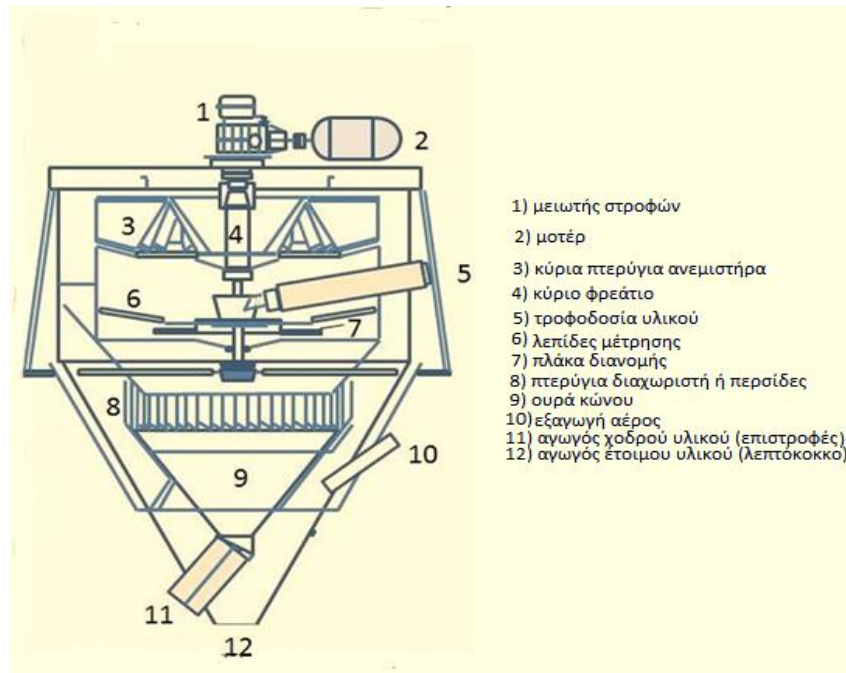
- Η φυγόκεντρος δύναμη F_c
- Η δύναμη ανερχόμενου αέριου ρεύματος F_d
- Η βαρύτητα F_g



Σχήμα 2.3: Δυνάμεις που επιδρούν στον κόκκο.

Με την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας του διαχωριστή όπως παροχή αέρα, ταχύτητα περιστροφής πτερωτής, επηρεάζονται και οι παραπάνω δυνάμεις F_c , F_d .

Οι κόκκοι έρχονται σε επαφή με τα τοιχώματα του εσωτερικού ή του εξωτερικού κώνου, χάνουν την κινητική τους ενέργεια καταρρέοντας στους αντίστοιχους χώρους. Στο τέλος υπάρχουν συστήματα στραγγαλισμού του αέρα, τα οποία αποτρέπουν την απομάκρυνση του αέριου ρεύματος και με τον τρόπο αυτό αναγκάζεται σε αέναη εσωτερική κυκλοφορία.



Εικόνα 2.4: Απεικόνιση διαχωριστή 1^{ης} γενιάς.

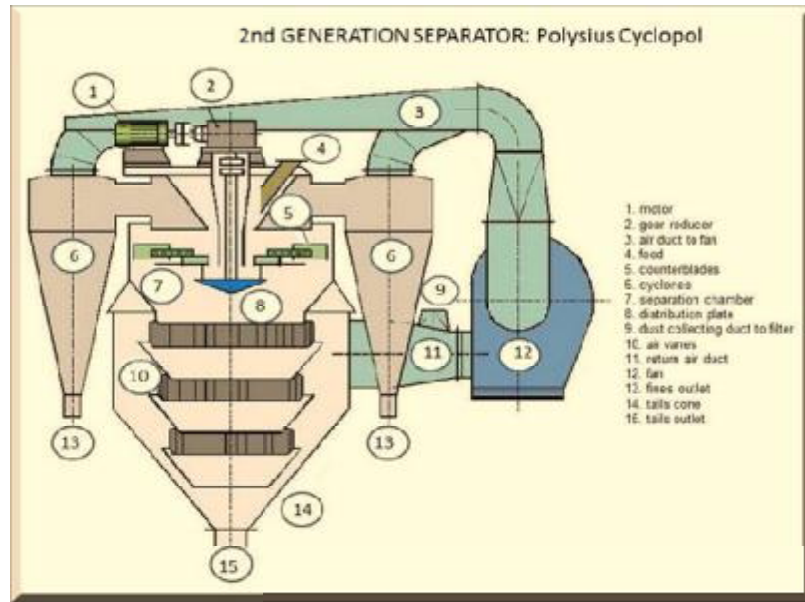
2.5.3 Διαχωριστές τύπου κυκλώνα

Στις δεύτερης γενιάς διαχωριστών ανήκουν οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα. Αυτοί έχουν ένα εξωτερικό κύκλωμα αέρα από τον ανεμιστήρα, μέσω του διαχωριστή και του κυκλώνα πίσω στο διαχωριστή και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη απόδοση διαχωρισμού, συγκρινόμενοι με τους συμβατικούς διαχωριστές.

Οι συμβατικοί διαχωριστές όπως και οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα έχουν τα εξής μειονεκτήματα :

- 1) Λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων ένα μεγάλο μέρος των σωματιδίων δρα ως μια ασθενώς συνδεδεμένη μάζα και αφού παρακάμπτει την ζώνη διαχωρισμού επιστρέφει στο μύλο μαζί με τα διαχωρισθέντα μεγάλου μεγέθους σωματίδια.
- 2) Τόσο οι δυνάμεις που εφαρμόζονται στα σωματίδια όσο και οι τροχιές των σωματιδίων λόγω της διασποράς δεν είναι καθορισμένες. Λόγω της ποικιλίας των δυνάμεων και της μεταβολής τους από σημείο μέσα στο διαχωριστή ο διαχωρισμός δεν είναι ικανοποιητικός.

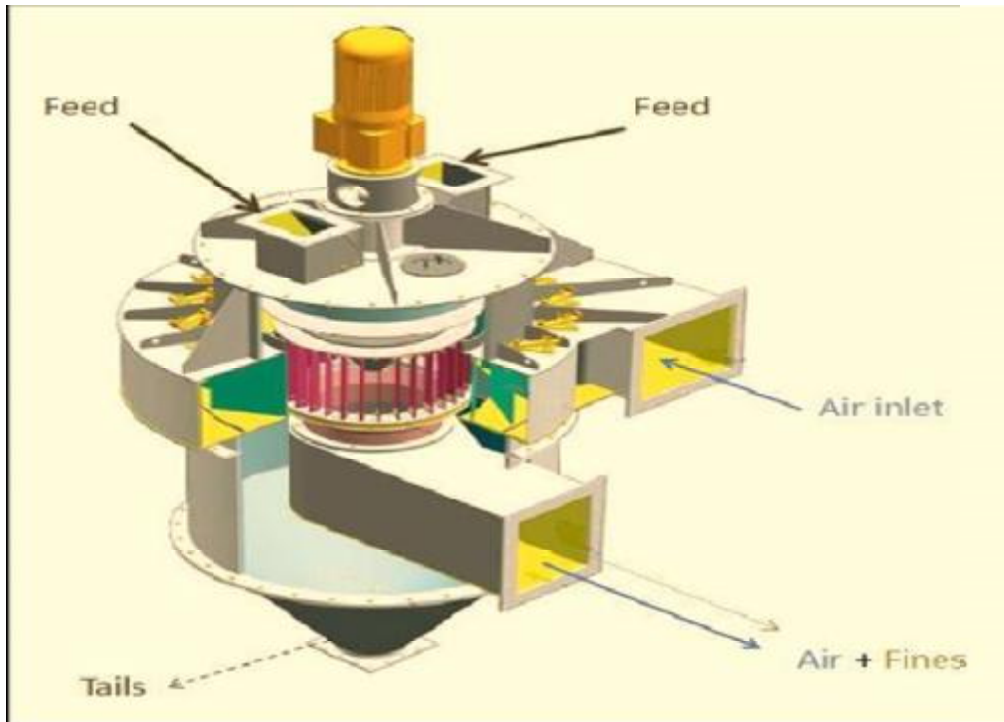
Με βάση τα παραπάνω η αυξανόμενη απαίτηση για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των κυκλωμάτων άλεσης οδήγησε στην κατασκευή και χρήση των διαχωριστών τρίτης γενιάς ή διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας (ΔΥΑ).



Εικόνα 2.5: Απεικόνιση διαχωριστή 2^{ης} γενιάς.

2.5.4 Διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας (ΔΥΑ)

Στους διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας, τα σωματίδια τροφοδοτούνται μέσω των αγωγών τροφοδοσίας, διασπείρονται μέσω του δίσκου διασποράς και έρχονται σε επαφή με τον αέρα διαχωρισμού, που εισέρχεται στον διαχωριστή από τους εφαπτομενικούς αγωγούς. Ο αέρας διαχωρισμού οδηγείται στη ζώνη διαχωρισμού μέσω ρυθμιστικών πτερυγίων. Έτσι, μια οριζόντια δίνη σχηματίζεται λόγω της ύπαρξης των πτερυγίων του ρότορα και του οριζόντιου δίσκου διαχωρισμού. Η στοιχειώδης ταξινόμηση γίνεται στον ομοιόμορφο στροβιλισμό ανάλογα με το ισοζύγιο των δυνάμεων (φυγόκεντρος και η αντίθετη δύναμη από τον αέρα). Έτσι, τα λεπτά σωματίδια διαχωρίζονται και απομακρύνονται. Τα μεγάλα μεγέθους σωματίδια δέχονται την επίδραση του δευτερεύοντος αέρα και ακολούθως του τριτεύοντος αέρα. Τα κυκλώματα άλεσης με ΔΥΑ διακρίνονται σε αυτά όπου ο χρησιμοποιούμενος αέρας ανακυκλώνεται και σε αυτά χωρίς ανακύκλωση του αέρα. Το πρώτο κύκλωμα εφαρμόζεται συνήθως για την αναβάθμιση υπαρχόντων συστημάτων άλεσης, ενώ το δεύτερο σε νέα συστήματα άλεσης και έχει το επιπρόσθετο πλεονέκτημα των υψηλών θερμοκρασιών τσιμέντου.



Εικόνα 2.6: Διαχωριστής υψηλής αποτελεσματικότητας

Πίνακας 2.3: Σύγκριση λειτουργίας διαφόρων τύπων διαχωριστών.

Χαρακτηριστικά	2 συμβατικοί Διαχωριστές (1)	1 διαχωριστής τύπου κυκλώνα (2)	1 διαχωριστής υψηλ. αποτελ. (3)
Δυναμικότητα (t/h)	85	98	105
Λεπτότητα (cm [^] /g)	3400	3300	3240
Αντοχή 28 ημερών(MPa)	40.0	40.0	41.2
Ειδική κατανάλωση μύλου (KWh/t)	37.1	32.9	31.0
Ειδική κατανάλωση συστήματος (KWh/t)	42.6	38.0	34.8
Υπόλειμμα στα 33 μm (%)	18.0	18.0	20.0
Υπόλειμμα στα 88 μm (%)	1.2	0.6	0.2
Θερμοκρασία τσιμέντου (C)	126	117	86

Συγκριτικά δεδομένα

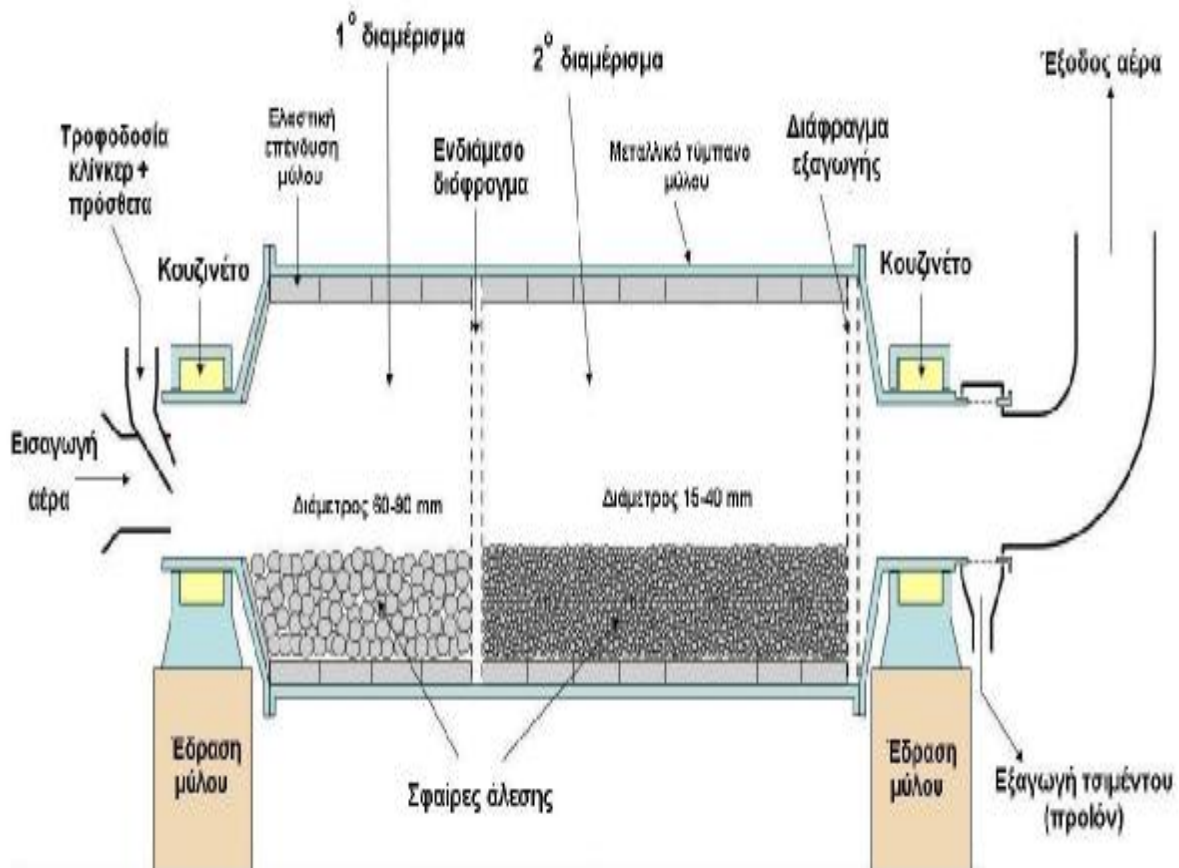
Μεταβολή δυναμικότητας (1,3)	23.5 %
Εξοικονόμηση ενέργειας (1,3)	18.3 %
Μεταβολή δυναμικότητας (2,3)	7.1 %
Εξοικονόμηση ενέργειας (2,3)	8.4 %

2.6 ΜΥΛΟΙ ΑΛΕΣΗΣ

Οι μύλοι άλεσης αποτελούν το κύριο μηχάνημα στην διάταξη της άλεσης. Υπάρχουν πολλά είδη μύλων, και διαφέρουν μεταξύ τους επειδή τα διάφορα υλικά δεν αλέθονται όλα με τον ίδιο τρόπο. Σε άλλα υλικά η μείωση του μεγέθους γίνεται με κρούση, σε άλλα με κοπή, σε άλλα με τριβή, και σε άλλα με σύνθλιψη. Στην βιομηχανία τσιμέντου ο καλύτερος τρόπος άλεσης τόσο των πρώτων υλών όσο και του κλίνκερ είναι η δράση δυνάμεων κρούσης και τριβής. Έτσι οι βιομηχανίες τσιμέντου προτιμούν τους σφαιρόμυλους (Ball mills), γιατί για τα συγκεκριμένα αυτά υλικά επιτυγχάνουν το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα με την μικρότερη κατανάλωσης ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται οι κάθετοι μύλοι ή μύλοι περιστρεφόμενων στροφών (Roller mills), οι οποίοι, ενώ είχαν εφαρμογή μόνο για την άλεση φαρίνας, χρησιμοποιούνται σε μικρότερο βαθμό και για την άλεση του τσιμέντου.

2.7 ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟΙ (BALL MILL)

Οι σφαιρόμυλοι είναι κυλινδρικοί χαλύβδινοι θάλαμοι που μπορούν να περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα. Για την αποφυγή της φθοράς του μανδύα από τις κρούσεις των αλεστικών σωμάτων, οι σφαιρόμυλοι είναι επενδεδυμένοι με ειδικές πλάκες από σκληρό χαλυβόκραμα και το εσωτερικό τους είναι γεμισμένο κατά το 1/3 περίπου με αλεστικά σώματα. Ο κύλινδρος αυτός καταλήγει μπρός και πίσω σε δύο στροφεία τα οποία εδράζονται σε κουζινέτα. Ο μύλος κινείται με ένα ηλεκτροκινητήρα πολλών στροφών, επειδή όμως ο μύλος για να άλεση χρειάζεται λίγες στροφές είναι αναγκαία η παρεμβολή ενός μειωτή στροφών (σύστημα οδοντωτών τροχών). Επίσης ο κύλινδρος είναι χωρισμένος εσωτερικά σε δύο ή και σε τρία διαμερίσματα με διαφράγματα, όπως και από ειδικές πλάκες με σχισμές που αφήνουν να περνά ο αέρας και το προς άλεση υλικό όχι όμως και τα αλεστικά σώματα.



Εικόνα 2.7: Απεικόνιση σφαιρόμυλου άλεσης.



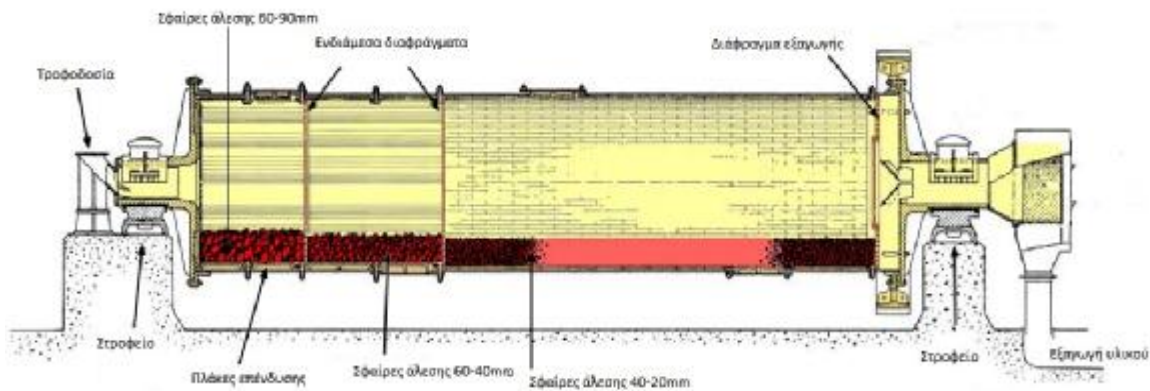
Εικόνα 2.8: Σφαιρόμυλος εργοστασίου TITAN Ελευσίνας.

Το μέγεθος των αλεστικών σωμάτων είναι διαφόρων μεγεθών από την αρχή ως το τέλος του μύλου. Στο πρώτο διαμέρισμα οι σφαίρες που αποτελούν τα αλεστικά σώματα είναι μεγαλύτερες και όσο προχωρούμε γίνονται μικρότερες. Αυτό γιατί στην αρχή, που υπάρχουν μεγαλύτερα τεμάχια από το προς άλεση υλικό, απαιτείται και μεγαλύτερη ενέργεια (άρα μεγαλύτερο μέγεθος αλεστικών) προκειμένου να πραγματοποιηθεί με κρούση ο τεμαχισμός του υλικού. Στα τελευταία όμως διαμερίσματα του μύλου όπου ήδη το υλικό έχει πολύ μικρότερες διαστάσεις, η δύναμη για την περαιτέρω ελάττωση του μεγέθους του είναι η τριβή, η οποία απαιτεί μεγαλύτερη επιφάνεια αλεστικών μέσων (μικρότερου μεγέθους αλεστικά) για να επιτευχθεί.



Εικόνα 2.9: Τα αλεστικά σώματα (σφαίρες).

Οι μύλοι τσιμέντου και φαρίνας όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο είναι ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος. Στην περίπτωση του κλειστού κυκλώματος ο μύλος είναι δύο διαμερισμάτων, ένα με μεγάλες σφαίρες 90-60mm για άλεση και ένα με μικρές σφαίρες 25-10mm για λεπτόνωση (μύλος εικόνας 2.4). Στο ανοιχτό κύκλωμα έχουμε μύλους με τρία διαμερίσματα, δύο για άλεση με μεγάλες σφαίρες και ένα για λεπτόνωση με μικρές σφαίρες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε μύλο τριών διαμερισμάτων τα περιεχόμενα αλεστικά έχουν μέγεθος (διάμετρο) 90-60mm, 60-40mm και 40-20mm αντίστοιχα.

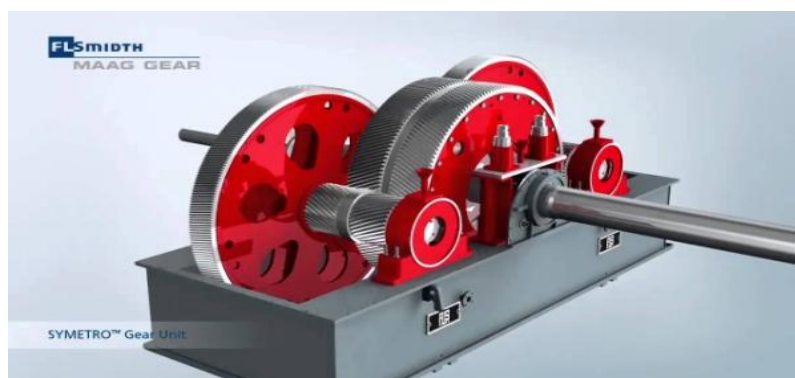


Εικόνα 2.10: Απεικόνιση σφαιρόμυλου τριών διαμερισμάτων

Ο μύλος κινείται με ένα ηλεκτροκινητήρα πολλών στροφών, επειδή όμως ο μύλος για να αλέσει χρειάζεται λίγες στροφές είναι αναγκαία η παρεμβολή ενός μειωτή στροφών (δηλαδή ένα σύστημα οδοντωτών στροφών). Υπάρχουν πολλά είδη μειωτών. Μία από τις καλύτερες ίσως λύσεις είναι κείνη της F.L.S που υπάρχει σε πολλά εργοστάσια τσιμέντου (δηλαδή το SYMETRO).



Εικόνα 2.11: Μειωτής στροφών (SYMETRO)



Εικόνα 2.12: Εσωτερικό μειωτή στροφών (SYMETRO)

Οι σημερινές υψηλές θερμοκρασίες αλέσεως σε σχέση με τις ανερχόμενες απαιτήσεις ποιότητας κάνουν την άλεση σε ανοικτό κύκλωμα όχι πάντα εφικτή. Για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα πρέπει η ψύξη να γίνεται στο κύκλωμα αλέσεως. Η ψύξη είναι μόνο τότε ενεργή όταν η θερμοκρασία δεν προσεγγίζει το σημείο αφυδατώσεως του γύψου. Αυτή η κρίσιμη θερμοκρασία προσεγγίζεται συχνά στην άλεση ανοικτού κυκλώματος. Η άλεση σε κλειστό κύκλωμα κάνει δυνατό ένα ενεργότερο έλεγχο θερμοκρασίας που εφαρμόζεται σε όλο το κύκλωμα.

Στην πράξη υπάρχουν οι εξής μέθοδοι ψύξεως :

- Αερισμός μύλου.

Κάτω από κανονικές συνθήκες, μέσα από ένα μύλο με ένα διαμέρισμα περνάει περίπου $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ αέρα ανά KW μύλου. Ο Lurje αναφέρει ότι για ενεργότερη ψύξη σε μύλους περισσότερων διαμερισμάτων χρειάζεται εναλλαγή αέρα 300 m^3 ανά ώρα και τόνο τσιμέντου. Άλλοι αναφέρουν (για ένα πιο ενεργό αερισμού μύλου) ποσότητες από 400 έως 1200 m^3 ανά τόνο τσιμέντου. Για τον αερισμό του μύλου μπορεί να ληφθεί σαν βάση ο όγκος του. Αυτός ο αριθμός είναι από 3 έως 4 φορές ο όγκος του μύλου εκφραζόμενος σε εναλλαγές αέρα ανά λεπτό.

- Ψύξη του μανδύα του μύλου με νερό.

Εάν δεν φθάνει ο αερισμός για πτώση της θερμοκρασίας, τότε μπορεί να γίνει ψύξη του μανδύα του μύλου με νερό. Δηλαδή κατά μήκος του άξονα του μύλου εγκαθίσταται μια εγκατάσταση ψεκασμού νερού η οποία ψεκάζει με νερό το μανδύα του μύλου. Αυτό το είδος ψύξης του μύλου μειώνει την θερμοκρασία του υλικού προς άλεση κατά 30 έως 40 C.

- Ψεκασμός νερού μέσα στον μύλο.

Αυτό το σύστημα ψύξης βασίζεται στο ψεκασμό μιας ορισμένης ποσότητας νερού στο θερμότερο μέρος του μύλου, όπου αμέσως εξατμίζεται.

Πεπιεσμένος αέρας φέρνει το νερό στο μύλο, όπου με την βοήθεια ενός απλού (μπέκ) ακροφυσίου ψεκασμού εκνεφώνεται. Σε μύλους με δύο διαμερίσματα το μπέκ ψεκασμού συνήθως μπαίνει στο δεύτερο διαμέρισμα. Το δημιουργούμενο μίγμα αέρα και υδρατμού φεύγει από τον μύλο και προχωρεί στην ατμόσφαιρα μέσω ενός φίλτρου. Οι αγωγοί αερισμού και το φίλτρο είναι μονωμένα για ν' αποφευχθεί η συμπύκνωση των υδρατμών.

- Ψύξη του τσιμέντου στο διαχωριστή.

Εδώ επιτυγχάνεται ψύξη με σχετικά χαμηλό κόστος. Ψύχεται με αέρα όχι μόνο το έτοιμο υλικό, αλλά συγχρόνως και το ανακυκλούμενο υλικό, έτσι ώστε να μην έχει την θερμοκρασία που αρχίζει η αφυδάτωση του γύψου (κρίσιμη θερμοκρασία). Η ποσότητα αέρα ψύξεως είναι περίπου $0.2-0.3 \text{ Kg/Kg}$ τσιμέντου (κυκλοφορούν και έτοιμο) εξαρτώμενο από την θερμοκρασία του αέρα ψύξεως, καθώς και από την θερμοκρασία του κυκλοφορούντος υλικού. Τα θερμοδυναμικά δεδομένα και η ποσότητα αέρα ψύξεως πρέπει για κάθε εγκατάσταση να υπολογίζονται με ένα ισοζύγιο θερμότητας.

- Ψύξη τσιμέντου με ψύκτη FULLER.

Είναι ένας ειδικός ψύκτης ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ μύλου και διαχωριστή και ψύχει ολόκληρο το ανακυκλοφορούν υλικό.

2.8 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟΥ

Για την τεχνολογικά σωστή λειτουργία ενός σφαιρόμυλου υπάρχουν κάποια βασικά στοιχεία όπως είναι ο βαθμός πλήρωσης (των αλεστικών), ο βαθμός πλήρωσης του υλικού, η κρίσιμη και πραγματική ταχύτητα, ο χρόνος παραμονής του υλικού στον μύλο και τέλος διάφοροι τύποι όπως η ισχύς του μύλου και η ειδική κατανάλωση ενέργειας του σφαιρόμυλου.

2.8.1 Ο βαθμός πλήρωσης.

Ορίζεται το ποσοστό του μύλου το οποίο καταλαμβάνεται από τα αλεστικά. Αυτός ποικίλλει από μύλο σε μύλο, σε συνάρτηση και με την προς άλεση ουσία που κυμαίνεται μεταξύ 20-40%, με πιο συνηθισμένα όρια στην περιοχή 28-33%. Ο υπολογισμός του βαθμού πλήρωσης προκύπτει, όταν είναι γνωστές η εσωτερική διάμετρος του μύλου (D) και η απόσταση της ελεύθερης επιφάνειας των αλεστικών από την οροφή του μύλου. Σε μύλους που λειτουργούν κατά παρτίδες, ο βαθμός πλήρωσης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές (45-50%). Οι μικρές τιμές του βαθμού πλήρωσης (<25%) προκαλούν ανωμαλίες στις τροχιές των αλεστικών εκτός του γεγονότος ότι δε γίνεται πλήρης εκμετάλλευση του μύλου, ενώ οι μεγάλες τιμές αποφεύγονται, διότι μειώνεται το ύψος πτώσης των αλεστικών και κατά συνέπεια η η αποτελεσματικότητα της άλεσης.

2.8.2 Βαθμός πλήρωσης σε υλικό.

Ορίζεται το ποσοστό του όγκου των κενών χώρων, που αφήνουν τα αλεστικά σε ηρεμία, που καταλαμβάνεται ως προς άλεση υλικό. Ένας μύλος λειτουργεί στις καλύτερες συνθήκες, όταν το αλεθόμενο υλικό γεμίζει τα κενά που αφήνουν τα αλεστικά σώματα μεταξύ τους (35-40% του φαινόμενου όγκου τους), έτσι ώστε, όταν σταματά ο μύλος, η ελεύθερη επιφάνεια αλεστικών και υλικού να βρίσκεται στο ίδιο ύψος και το υλικό να είναι το πολύ 10-20mm ψηλότερα. Μια άλλη έκφραση του βαθμού πλήρωσης σε υλικό είναι ο λόγος του βάρους των αλεστικών προς το βάρος της αλεθόμενης ουσίας. Για το κλίνκερ και για μέση διάσταση αλεστικών ο λόγος αυτός λαμβάνει την τιμή 9 (steel/clinker=S/C=9). Το ποσοστό των κενών που αφήνουν τα αλεστικά μεταξύ τους και ότι αυτά ανάλογα με τη διάσταση τους παρουσιάζουν διαφορετικές φαινόμενες πυκνότητες δίνεται στον παρακάτω πίνακα (για χαλύβδινα αλεστικά).

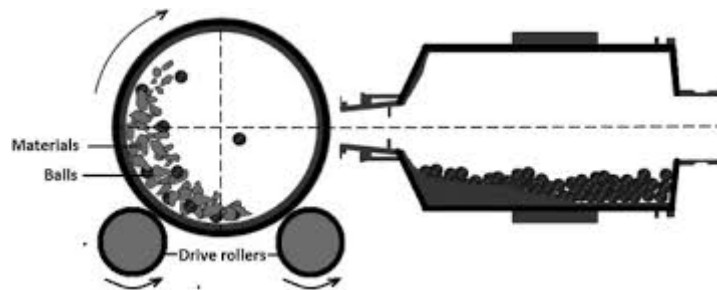
Πίνακας 2.4: Συσχέτιση διάστασης και φαινόμενης πυκνότητας.

Διάσταση αλεστικών (mm)	Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	Διάσταση αλεστικών(mm)	Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
30	4900	60	4560
40	4740	70	4490
50	4600	80	4400

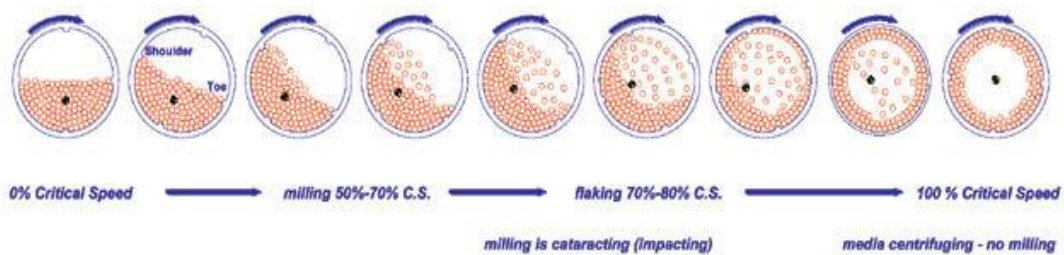
2.8.3 Κρίσιμη και πραγματική ταχύτητα περιστροφής.

Σαν κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής (U) ενός μύλου ορίζεται εκείνη η ταχύτητα κατά την οποία τα αλεστικά σώματα απλώς ολισθαίνουν στην εσωτερική επιφάνεια ενός μύλου. Εάν η ταχύτητα αυξηθεί κατά (d_u), τα αλεστικά σώματα θα περιστρέφονται φυγοκεντρούμενα στο εσωτερικό του μύλου, εάν ελαττωθεί κατά (d_u), τα αλεστικά θα πέφτουν αφού πρώτα φτάσουν στο ανώτατο σημείο της τροχιάς τους στο εσωτερικό του μύλου. Η κρίσιμη

ταχύτητα είναι ένα υποθετικό μέγεθος αφού στην πράξη κανένας μύλος δεν περιστρέφεται με την κρίσιμη ταχύτητα του αλλά με ποσοστό αυτής, που είναι συνήθως το 75% και το οποίο καλείται πραγματική ταχύτητα περιστροφής. Με την ταχύτητα αυτή διευκολύνεται η άνοδος των αλεστικών μέχρι ένα σημείο, από το οποίο και πέφτουν στο εσωτερικό του μύλου ακολουθώντας παραβολική τροχιά.



Εικόνα 2.13: Κίνηση των αλεστικών σωμάτων στον μύλο.



Εικόνα 2.14: Κίνηση αλεστικών και κρίσιμη ταχύτητα.

Η κρίσιμη ταχύτητα εξαρτάται μόνο από τη διάμετρο του μύλου και δίνεται από την σχέση:

$$U=42.3/\sqrt{D}$$

Όπου D: η διάμετρος του μύλου και

U: η κρίσιμη ταχύτητα (στροφές ανά λεπτό).

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, κυρίως στους μύλους μικρής διαμέτρου, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$U= 42.3/\text{sqrt}(D-d)$$

Όπου d: η μέση διάμετρος των αλεστικών.

2.8.4 Τα αλεστικά σώματα.

Τα αλεστικά σώματα που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση της αλέσεως διαφοροποιούνται μεταξύ τους σε 4 παράγοντες. Στο σχήμα, το μέγεθος, την ποιότητα και την σκληρότητα. Οι παράγοντες αυτοί επιδρούν άμεσα και στην φθορά των αλεστικών που με τη σειρά της έχει άμεση επίπτωση τόσο στην ποιότητα του αλεθόμενου υλικού όσο και στην οικονομικότητα της άλεσης.

- 1) Ως προς το σχήμα των αλεστικών, σήμερα τόσο για την άλεση της φαρίνας όσο και για την άλεση του τσιμέντου χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σφαίρες και μόνο στο τελευταίο διαμέρισμα του μύλου τοποθετείται ένα ποσοστό κυλινδρίσκων που προσφέρουν μεγαλύτερη επιφάνεια, η οποία χρειάζεται για την ελάττωση του μεγέθους του υλικού.
- 2) Όσον αφορά το μέγεθος που ήδη αναφέρθηκε παραπάνω (2.5.1) ότι τα μεγάλα αλεστικά (Φ100-Φ60) βρίσκονται στο διαμέρισμα που είναι κοντά στην είσοδο του μύλου, σε αντίθεση με τα μικρά (Φ30-Φ20) που βρίσκονται στο τελευταίο διαμέρισμα. Νεότερες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν δείξει ότι δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενδιάμεσου μεγέθους αλεστικών (Φ50-40mm), ενώ επιβάλλεται η χρησιμοποίηση μικρότερων ακόμη μεγεθών Φ15mm και Φ10mm ιδίως όταν απαιτούνται μεγάλες λεπτότητες. Η εισαγωγή των μικρότερων μεγεθών μπορεί να γίνει μόνο με κατάλληλες διαρρυθμίσεις των διαφραγμάτων.
- 3) Η σκληρότητα και η ποιότητα των αλεστικών σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους, με την έννοια ότι τα επιμέρους υλικά κατασκευής των αλεστικών έχουν διαφορετικές σκληρότητες που με την σειρά τους έχουν διαφορετική επίδραση στο αποτέλεσμα της άλεσης. Όσον αφορά την ποιότητα, στην συντριπτική πλειοψηφία χρησιμοποιούνται χαλύβδινα ή χυτοσίδηρα αλεστικά με κυριότερες προσμίξεις το χρώμιο, το νικέλιο, το μαγγάνιο και το χαλκό. Η σκληρότητα διαφοροποιείται από διαμέρισμα σε διαμέρισμα και μαζί με τη φθοροποιό δράση του υλικού διαμορφώνουν τις φθορές των αλεστικών.

Αποφασιστικής σημασίας για την σωστή άλεση τόσο της φαρίνας όσο και του τσιμέντου είναι η σωστή επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αλεστικών στο σφαιρόμυλο, που με τη σειρά τους στηρίζεται στο σωστό υπολογισμό της μέγιστης διάστασης αλεστικού (d_{max}) που θα χρησιμοποιηθεί. Χρησιμοποιείται ο τύπος του Bond και δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$D_{max} = 20.17 \sqrt{(F_{80} / K)} * \sqrt[3]{(W_i \rho / C_S \sqrt{D})}$$

Όπου :

d_{max} : μέγιστη διάσταση αλεστικών (mm).

F_{80} : μέγεθος κόσκινου από το οποίο διέρχεται το 80% της τροφοδοσίας (μm).

K : σταθερά με τιμή 335 για περιπτώσεις ξηρής άλεσης.

W_i : δείκτης έργου κατά Bond (kWh / short t).

ρ : η πυκνότητα του υλικού (g / cm^3).

C_S : ταχύτητα περιστροφής μύλου ως % ποσοστό της κρίσιμης ταχύτητας.

D : διάμετρος μύλου (m).

Καθώς οι κόκκοι αλέθονται, ελαττώνονται σε μέγεθος και διατρέχουν το μήκος του μύλου, θα πρέπει να ελαττώνεται αντίστοιχα και η εκάστοτε μεγαλύτερη διάσταση αλεστικών, που είναι σε κάθε δεδομένο σημείο του μύλου η καταλληλότερη άλεση. Έχουν επινοηθεί ειδικού σχεδιασμού εσωτερικές πλάκες στο μύλο (πλάκες ταξινόμησης), οι οποίες έως ένα σημείο επιτυγχάνουν την επιδιωκόμενη κατά μέγεθος διαβάθμιση των αλεστικών με τα μεγαλύτερα αλεστικά στην αρχή κάθε διαμερίσματος και τα μικρότερα στο τέλος. Η διαβάθμιση αυτή προκύπτει με τη χρησιμοποίηση διάφορων τύπων κατανομής που λαμβάνουν υπόψη το μικρότερο μέγεθος και την επιδιωκόμενη λεπτότητα.

Ο υπολογισμός του Bond οδηγεί στην εύρεση της καλύτερης διαμέτρου των αλεστικών, δηλαδή της διαμέτρου εκείνης όπου η αύξηση της ειδικής επιφάνειας του προς άλεση υλικού είναι η μεγαλύτερη δυνατή για μια καθορισμένη χρονική διάρκεια άλεσης. Επειδή όμως, όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, με την έναρξη της άλεσης αρχίζει η φθορά των αλεστικών, αρχικά χρησιμοποιούνται πάντοτε μεγαλύτερα αλεστικά από εκείνα που υπολογίζονται από τους τύπους, τα οποία σταδιακά φθειρόμενα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αποκτούν τη βέλτιστη διάσταση.

Επειδή οι πρώτες ύλες, και κυρίως το κλίνκερ, έχουν έντονη φθοροποιό δράση, η φθορά των αλεστικών σωμάτων κυρίως και δευτερευόντως των πλακών της επένδυσης είναι από τα σημαντικότερα προβλήματα στην διαδικασία άλεσης. Οι φθορές επιδρούν με δύο τρόπους στην οικονομικότητα της άλεσης. Άμεσα μεν επειδή μεταφράζονται σε δαπάνη για την αναπλήρωση τους, έμμεσα δε γιατί λόγω της μεταβολής της κοκκομετρικής σύνθεσης των αλεστικών, που επέρχεται από τις φθορές, μεταβάλλεται η λεπτότητα του παραγόμενου προϊόντος και δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό σοβαρές επιπτώσεις στην παραγωγή.

Οι βασικές αιτίες δημιουργίας φθορών των αλεστικών είναι τρεις. Η τριβή, η κρούση και η διάβρωση. Απ' αυτές η τελευταία παρατηρείται σε περιπτώσεις υγρής αλέσεως. Από τα αποτελέσματα διάφορων ερευνητών εξάγεται το συμπέρασμα ότι μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν τις φθορές των αλεστικών οι σημαντικότεροι είναι :

- Η διάμετρος των αλεστικών. Έχει διαπιστωθεί ότι τα μεγάλα αλεστικά, ιδίως αυτά που βρίσκονται στο πρώτο διαμέρισμα του μύλου, φθείρονται ταχύτερα. Αυτό συμβαίνει διότι αυτά υφίστανται μεγάλη καταπόνηση λόγω των συνεχών κρούσεων κατά την πτώση τους.
- Η σκληρότητα των αλεστικών σωμάτων. Όσο αυξάνεται η σκληρότητα, μειώνονται οι φθορές. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ειδικά σκληρά κράματα στα υλικά κατασκευής των αλεστικών, με προσθήκη χρωμίου (Cr) και μαγγανίου (Mn) με τα οποία επιτεύχθηκαν σημαντικές μειώσεις στην φθορά.
- Η σκληρότητα του προς άλεση υλικού. Αν αυτή είναι μεγαλύτερη από την σκληρότητα των αλεστικών, τότε τα τελευταία φθείρονται με ταχύτερο ρυθμό.
- Η επιδιωκόμενη λεπτότητα αλέσεως. Έχει διαπιστωθεί ότι αύξηση της λεπτότητας του προϊόντος από 2500 σε 4000 cm²/g κατά Blaine επιφέρει διπλασιασμό των φθορών.

Οι φθορές των αλεστικών είναι δυνατόν να αντικατασταθούν με δύο τρόπους :

- Με περιοδική προσθήκη των μεγαλύτερης διάστασης αλεστικών.
- Με διαλογή των φθαρμένων αλεστικών και αναπλήρωση όλου του κοκκομετρικού φάσματος. Η εργασία αυτή γίνεται λιγότερο συχνά απ'ότι η πρώτη, αφού απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο παύσης του μύλου.

Πίνακας 2.5: Φθορές αλεστικών σε συνάρτηση με το υλικό κατασκευής.

Είδος άλεσης	Είδος αλεστικών	Φθορά (g/kWh)			
		Κανονικός χάλυβας	Σκληρυμένος χάλυβας	Λευκός χυτοσίδηρος	Κραματοπ. χάλυβας
Υγρή	Μεγάλ σφαιρικά	25-50	15-40		10-20
	Μικρά σφαιρικά	40-80	20-50	30-60	15-30
	Κυλινδρίσκοι	40-80	20-50	30-60	15-30
Φαρίνα	Μεγάλ σφαιρικά	15-30	10-20		2-5
	Μικρά σφαιρικά	3-10	2-8	2-6	1-3
	Κυλινδρίσκοι	3-10	2-8	2-6	1-3
Τσιμέντο	Μεγάλ σφαιρικά	20-40	10-20		2-5
	Μικρά σφαιρικά	5-15	2-10	5-15	1-3
	Κυλινδρίσκοι	5-15	2-10	5-15	1-3

2.8.5 Χρόνος παραμονής υλικού.

Ως χρόνος παραμονής του υλικού ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να διατρέξει μια ορισμένη ποσότητα του υλικού (θεωρητικά ένας κόκκος) το μήκος του μύλου. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τη φύση των υλικών και μεταβάλλεται από μύλο σε μύλο. Ο χρόνος παραμονής για κλίνκερ είναι περίπου 10 λεπτά. Ο χρόνος παραμονής μετρείται με τη χρησιμοποίηση κατάλληλου δείκτη, όπως η φθοροσκείνη.

2.8.6 Δυναμικότητα σφαιρόμυλου.

Η παραγωγή ενός μύλου εξαρτάται, εκτός από τις διαστάσεις του μύλου, από τη φύση του προς άλεση υλικού και από την τελική λεπτότητα που επιζητείται για το τελικό προϊόν. Τη διαφοροποίηση μεταξύ των υλικών τη χαρακτηρίζει η ειδική κατανάλωση ενέργειας W που εκφράζεται σε Kwh/t παραγόμενου προϊόντος, ενώ το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει είτε ειδική επιφάνεια του μείγματος είτε το υπόλειμμα σε ένα συγκεκριμένο κόσκινο. Είναι ευνόητο ότι ο ίδιος μύλος, όταν αλέθει δύο υλικά στην ίδια λεπτότητα, θα παράγει μεγαλύτερες ποσότητες από το πιο ευάλεστο υλικό.

Η παραγωγή του μύλου (P) προκύπτει από την ισχύ του (N) και την ειδική κατανάλωση ενέργειας (W) κάθε αλεθόμενου υλικού.

$$P = N/W$$

Η ισχύς του σφαιρόμυλου (N) προκύπτει από τη σχέση του Blanc :

$$N = C * Q * D * N$$

Όπου N : η ισχύς του σφαιρόμυλου (W),

C : συντελεστής εξαρτώμενος από τον βαθμό πλήρωσης του μύλου,

D : η εσωτερική διάμετρος του μύλου (m),

Q : το βάρος των αλεστικών (t),

N : η πραγματική ταχύτητα περιστροφής (rpm)

Το φορτίο Q του μύλου προκύπτει από την σχέση :

$$Q = V_m * \rho_b * e_b$$

Όπου Q : το βάρος των αλεστικών,

V_m : ο όγκος του μύλου,

ρ_b : η φαινόμενη πυκνότητα των αλεστικών σωμάτων,

e_b : ο βαθμός πλήρωσης του μύλου ως κλάσμα της μονάδας

Με βάση τις παραδοχές $n = 0.75 n_c$, $L = D/2$ (για ball mills), και από προϋγούμενες σχέσεις προκύπτει η ισχύς του μύλου σε συνάρτηση της διαμέτρου του.

$$N = K * D^{3.5}$$

Όπου : $K = 12.56 c * e_b * \rho_b$

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από τη φύση του υλικού και ειδικότερα από την αλεστικότητα του. Ένα μέτρο ελαστικότητας είναι ο δείκτης έργου (W_i) που εκφράζεται σε (KWh/short t), ο οποίος είναι το πειραματικό αποτέλεσμα της πρότυπης δοκιμής Bond, με την οποία υπολογίζονται οι αλεστικότητες υλικών που είναι παρεμφερή με το τσιμέντο και τις πρώτες ύλες.

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας W βιομηχανικών μύλων προσδιορίζεται από το δείκτη έργου W_i με βάση τη σχέση :

$$W = (1.1) * B * W_i * (10\sqrt{P_{80}} - 10\sqrt{F_{80}}) * A * K$$

Όπου W : ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/t) ,

(1.1) συντελεστής μετατροπής του short t (907 Kg) σε t ,

B : λαμβάνει την τιμή 1 για υγρή άλεση και 1.33 για ξηρή άλεση ,

W_i : δείκτης έργου κατά Bond (kWh/short t) ,

P_{80} , F_{80} : μέγεθος οπής κόσκινων από το οποίο διέρχεται το 80% της παραγωγής και της τροφοδοσίας αντίστοιχα (μm),

A : συντελεστής λεπτότητας , $A=1$ όταν $P_{80} > 70 \mu\text{m}$,

$$A = (P_{80} + 10.3) / (1.145 P) \text{ όταν } P_{80} < 70 \mu\text{m}$$

K : συντελεστής διαμέτρου μύλου , $K = (2.45/D)^x$

$$X = 0.200 \text{ όταν } D < 3.65 \text{ m}$$

$$X = 0.175 \text{ όταν } 3.65 \text{ m} < D < 4.25 \text{ m}$$

$$X = 0.150 \text{ όταν } D > 4.25 \text{ m}$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται η επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για άλεση σε μεγάλες λεπτότητες και η θετική επίδραση της διαμέτρου του μύλου στην κατανάλωση ενέργειας.

Το F_{80} προκύπτει εύκολα αν πραγματοποιηθεί μια κοκκομετρική ανάλυση στο προς άλεση υλικό, ενώ σε περιπτώσεις όπου η λεπτότητα του προϊόντος εκφράζεται ως ειδική επιφάνεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσεγγιστική παραπάνω σχέση που συσχετίζει το P_{80} και την ειδική επιφάνεια.

$$P_{80} = 6 \cdot 10^7 / (S_B^{1.14} \cdot \rho^{2.50})$$

Όπου S_B : ειδική επιφάνεια υλικού κατά Blaine (cm^2/g) ,

ρ : η πυκνότητα του υλικού.

2.9 ΚΑΘΕΤΟΙ ΜΥΛΟΙ

Αν και οι σφαιρόμυλοι εξακολουθούν να έχουν κυρίαρχη θέση στην παραγωγή του τσιμέντου, δεν είναι λίγες οι βιομηχανίες που σταδιακά αντικαθιστούν με τους κάθετους μύλους.

Οι κάθετοι μύλοι ή μύλοι περιστρεφόμενων τροχών (**vertical roller mill-VRM**), πραγματοποιούν το έργο άλεσης με σύνθλιψη του προς άλεση υλικού μεταξύ μιας περιστρεφόμενης τράπεζας, πάνω στην οποία διαστρώνεται το υλικό, και 2 έως 4 ειδικών τροχών επενδυμένων με κατάλληλα χαλυβοκράματα, οι οποίοι μένουν σταθεροί στην κατάλληλη θέση για την αποτελεσματικότερη απομείωση του μεγέθους με ένα υδραυλικό πλαίσιο που απορροφά και τους κραδασμούς του μύλου. Ένα ρεύμα αέρα ή θερμών αερίων διέρχεται μέσα από ένα δακτυλίδι με ανοίγματα που περιβάλλει την τράπεζα και χρησιμεύει για τη μεταφορά του αλέσματος στο πάνω μέρος του μύλου όπου βρίσκεται τοποθετημένος ο διαχωριστής. Οι κόκκοι που έχουν εϊδη αποκτήσει την επιθυμητή λεπτότητα απομακρύνονται για τα περαιτέρω στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, ενώ το χονδρόκοκκο επιστρέφει με ελεύθερη πτώση προς την τράπεζα για συμπληρωματική άλεση. Τα σωματίδια του προς άλεση υλικού κάνουν πολλές φορές τη διαδρομή από την τράπεζα προς τον διαχωριστή μέχρις ότου αποκτήσουν την επιδιωκόμενη λεπτότητα τους και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ικανοποιητική ξήρανση τους, ιδίως όταν πρόκειται για άλεση φαρίνας. Θεωρητικά οι μύλοι αυτοί χρησιμοποιούνται για άλεση πρώτων υλών των οποίων η υγρασία φθάνει έως 20%.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ότι παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες πίεσης και απαιτούν μεγάλη ισχύ για τον ανεμιστήρα λόγω του γεγονότος ότι αυτός θα πρέπει συνεχώς να ανεβάζει προς το διαχωριστή αξιοσημείωτες ποσότητες από το προς άλεση υλικό, στις οποίες περιλαμβάνονται χονδρόκοκκα κλάσματα, ακόμα και απο την αρχική τροφοδότηση του μύλου, τα οποία ύστερα από λίγο θα επαναλεσθούν. Για τον λόγο αυτό ο σχεδιασμός των σύγχρονων VRM μύλων προβλέπει την πτώση του χονδρόκοκκου κλάσματος στον πυθμένα της διάταξης και την εν συνεχεία μεταφορά του στο χώρο άλεσης με μηχανικό μεταφορέα. Με τον τρόπο αυτό επέρχεται μία ενεργειακή εξοικονόμηση της τάξης του 20-30%.

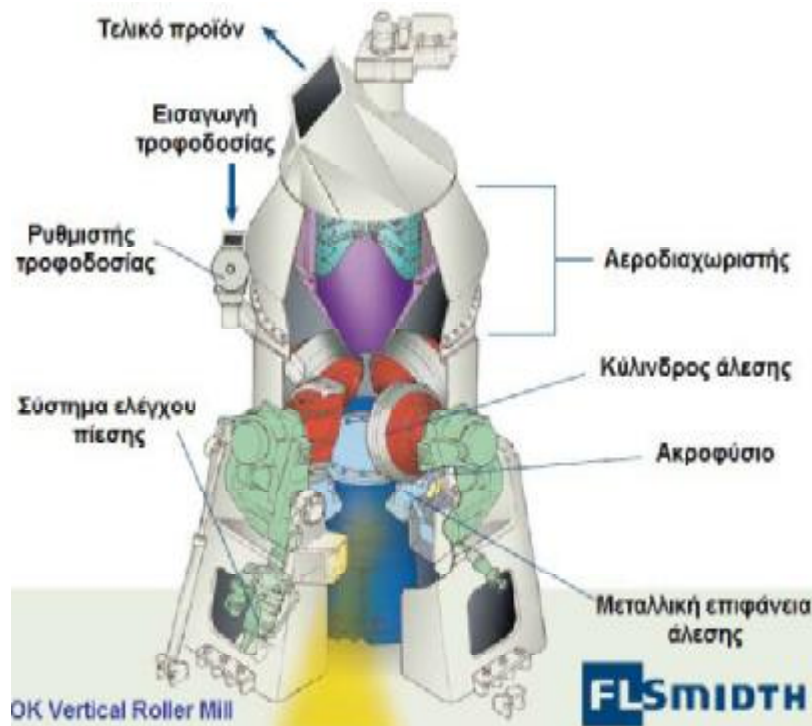
Πίνακας 2.6: Σύγκριση σφαιρόμυλων και κάθετων μύλων.

Χαρακτηριστικά	Σφαιρόμυλος	Κάθετος μύλος
Κατανάλωση ενέργειας (συγκριτική)	118	100
Απαίτηση χώρου (συγκριτική)	140	100
Εκμετάλλευση αερίων ΠΚ	Μερική	Ολική
Ανταπόκριση σε εντολές αυτόματου ελέγχου	Αργή	Γρήγορη
Κοκκομετρία τροφοδοσίας	200 mm	100 mm
Κόστος συντήρησης	Υψηλό	Χαμηλό
Ευελιξία διάταξης	Μικρή, ο μύλος θα πρέπει να λειτουργεί στο max της δυναμικότητας.	Μεγάλη, ο μύλος μπορεί να λειτουργεί με μικρότερα φορτία.
Μηχανισμός άλεσης	Κρούση και τριβή	Συμπίεση και τριβή
Υγρασία τροφοδοσίας	Έως 7%	Έως 20%
Φθορές	100	60
Χρόνος παραμονής	20 min	2.5 min
Επίπεδο θορύβου	Υψηλό	Λιγότερο υψηλό

Οι VRM βρίσκουν εφαρμογή στην άλεση των πρώτων υλών και του άνθρακα, που χρησιμοποιείται ως καύσιμο στις περιστροφικές κάμινους. Η αξιοποίηση τους στην άλεση του κλίνκερ, όπου χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρό βαθμό σήμερα, εμποδίζεται από το γεγονός ότι η πολύ στενή κοκκομετρική κατανομή του παραγόμενου τσιμέντου οδηγεί σε υψηλές απαιτήσεις σε νερό ενυδάτωσης, σε μειωμένες πρώιμες αντοχές και σε προβλήματα πήξης του τσιμέντου.

Πλέον έχουν ξεπερασθεί τόσο τα λειτουργικά προβλήματα όσο και αυτά που ήταν σχετικά με το στενό κοκκομετρικό φάσμα του προκύπτοντος τσιμέντου και ως εκ τούτου σταδιακά οι κάθετοι μύλοι χρησιμοποιούνται χωρίς κανένα πρόβλημα και στην άλεση του κλίνκερ. Το τσιμέντο σε σχέση με τις πρώτες ύλες αλέθεται σε μεγαλύτερη λεπτότητα, έχει πιο απαιτητικές ποιοτικές προδιαγραφές, δεν έχει υγρασία, έχει μεγαλύτερη φθοροποιό δράση και σχηματίζει δυσκολότερα την κλίνη άλεσης πάνω στην περιστρεφόμενη τράπεζα. Οι ιδιαιτερότητες αυτές αντιμετωπίστηκαν αφενός με τη χρήση χρωμίου για την ενίσχυση της επιφάνειας των τροχών και της τράπεζας, αφετέρου με την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων των κάθετων μύλων (κυρίως με την εισαγωγή ενός μικρότερου, δευτερεύοντος τροχού), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται πλέον ευρύτερο κοκκομετρικό φάσμα. Τα βασικά πλεονεκτήματα τους για την άλεση του κλίνκερ είναι : α) στην εξοικονόμηση ενέργειας, β) στην παραγωγή ενός ποιοτικότερου προϊόντος και γ) στην απλοποίηση της όλης διεργασίας.

Για τους παραπάνω λόγους οι κάθετοι μύλοι έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλείς στη βιομηχανία τσιμέντου, με αποτέλεσμα από τις αρχές του 20ού αιώνα η χρησιμοποίησή τους για την άλεση των πρώτων υλών και κλίνκερ να έχει ξεπεράσει σημαντικά αυτές των σφαιρόμυλων.



Εικόνα 2.15: Κάθετος μύλος (κατά FLSmidth)



Εικόνα 2.16: Διάταξη άλεσης κλίνκερ με κάθετο μύλο (κατά FLSmidth)

2.9.1 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα κάθετων μύλων.

Σαν μειονεκτήματα των κάθετων μύλων είναι τα εξής :

- Περιορισμός στην κοκκομετρία τροφοδοσίας (>40% κάτω από 5 mm δημιουργία δονήσεων).

- Απαραίτητη η θέρμανση των αερίων, το χειμώνα και όταν το κλίνκερ είναι κρύο.
- Υψηλότερο κόστος εξοπλισμού.
- Απαραίτητη η στεγανή λειτουργία για αποφυγή εισαγωγής ψεύτικου αέρα.
- Η φθορά επηρεάζει την παραγωγική απόδοση.
- Μεγαλύτερη ευαισθησία στον χειρισμό των λειτουργικών παραμέτρων.

Από την άλλη σαν πλεονεκτήματα των κάθετων μύλων έχουμε :

- Χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μια μηχανή για όλα (ξήρανση, άλεση, διαχωρισμός και μεταφορά).
- Γρήγορες αλλαγές ποιότητας (τύπος τσιμέντου).
- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης.
- Χαμηλή στάθμη θορύβου.
- Μέγιστη υγρασία υλικού έως και 20%.



Εικόνα 2.17: Κάθετος μύλος FLSmidth.

Στην **Εικόνα 2.17** φαίνεται ένας κάθετος μύλος της γνωστής εταιρίας FLSmidth με τα εξής χαρακτηριστικά :

- Ø Ονομαστική δυναμικότητα 120 t/h
- Ø Μέγιστη δυναμικότητα 170 t/h
- Ø Διάμετρος τράπεζας άλεσης 3 m
- Ø 4 ρόλοι διαμέτρου
- Ø Ταχύτητα περιστροφής τράπεζας 26.3 rpm
- Ø Κύριως κινητήρας 2350 KW
- Ø Κινητήρας A/M 1000 KW
- Ø Διαχωριστής ROKS 32.5 250 KW
- Ø Καυστήρας (hot gas generation)

2.10 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΑΛΕΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΝΚΕΡ ΚΑΙ ΑΛΕΣΗ ΦΑΡΙΝΑΣ

Η πιο βασική διαφορά ανάμεσα στην άλεση του κλίνκερ και των πρώτων υλών είναι η διαφορετική αλεστικότητα των υλικών αυτών. Συγκεκριμένα το κλίνκερ είναι πιο δυσάλεστο απ' ότι οι πρώτες ύλες. Αυτό έχει άμεση επίπτωση στην παραγωγή του μύλου σε τσιμέντο η οποία μειώνεται σε σύγκριση με την άλεση φαρίνας. Η παραγωγή των μύλων τσιμέντου διαφοροποιείται επίσης και ως προς την λεπτότητα καθ' όσον το τελικό προϊόν αλέθεται περισσότερο ή λιγότερο ανάλογα με την επιδιωκόμενη ποιότητα.

Άλλη διαφοροποίηση των υλικών αυτών είναι η φθοροποιός δράση με αποτέλεσμα το κλίνκερ να προκαλεί πολύ μεγαλύτερες φθορές τόσο στα αλεστικά σώματα όσο και στην επένδυση του μύλου. Λόγω του γεγονότος αυτού οι μύλοι τσιμέντου κατασκευάζονται από ανθεκτικότερα χαλυβδοκράμματα και χρησιμοποιούν σκληρότερα αλεστικά.

Εκτός των παραπάνω υπάρχει διαφορά στις θερμοκρασίες που επικρατούν μέσα στον μύλο. Συγκεκριμένα ενώ για τους μύλους φαρίνας είναι επιθυμητές σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (300-400 C^o) για την απομάκρυνση της υγρασίας των πρώτων υλών, στους μύλους τσιμέντου αντιθέτως αποφεύγονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 105-110 C^o, λόγω του κινδύνου της αφυδατώσεως του γύψου. Έτσι, ενώ οι μύλοι φαρίνας συνδέονται είτε με πυρεστία είτε με σωληνώσεις προσαγωγής των καπναερίων των περιστροφικών κλιβάνων, στους μύλους τσιμέντου υπάρχουν συστήματα πρόσθετου αερισμού, συστήματα διαβροχής του εξωτερικού μανδύα ή και συστήματα ψεκασμού νερού μέσα στο μύλο με σκοπό την απαγωγή της θερμότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στην τσιμεντοβιομηχανία απο την εξόρυξη μέχρι την εξαγωγή του τσιμέντου το προϊόν δέχεται μεταβολές και μεταφέρεται σε μορφή σκόνης.

Η δημιουργία σκόνης είναι αναπόφευκτη σε όλες τις διαδικασίες παραγωγής του τσιμέντου. Στην τσιμεντοβιομηχανία δημιουργούνται τα ακόλουθα είδη σκόνης :

- Σκόνη πρώτων υλών, δηλαδή σκόνη από ασβεστόλιθο, μάργες, αργιλόχωμα, σκουριά.
- Σκόνη φαρίνας.
- Σκόνη άνθρακα.
- Σκόνη κλιβάνου.
- Σκόνη κλίνκερ.
- Σκόνη γύψου.
- Σκόνη τσιμέντου.

Για να μην συνεχιστεί η διαφυγή της σκόνης στο περιβάλλον λειτουργούν οι διάφορες εγκαταστάσεις της τσιμεντοβιομηχανίας σε υποπίεση πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα την διακίνηση μεγάλων ποσοτήτων αέρα ή αερίων. Όλες αυτές οι ποσότητες αέρα ή αερίων καθαρίζονται με διατάξεις **αποκονιώσεως**.

Σκοπός του καθαρισμού του σκονερού αέρα πριν αυτός βγεί στην ατμόσφαιρα είναι:

- Το ότι η σκόνη ξαναεπιστρέφει στην παραγωγική διαδικασία για παρά πέρα χρησιμοποίηση.
- Το ότι στις περισσότερες χώρες τα επιτρεπτά όρια των εκπομπών σκόνης στην ατμόσφαιρα είναι αυστηρά.

Από τα πλέον απαραίτητα στοιχεία για την μελέτη μιας εγκατάστασης αποκονίωσης είναι η περιεχόμενη σκόνη του αέρα αλλά και η απαιτούμενη ποσότητα του αέρα. Αυτά τα στοιχεία αποκτούνται από την πείρα στην τσιμεντοβιομηχανία. Η ποσότητα αέρα ή αερίων που πρέπει να απορροφηθούν από τις διάφορες πηγές ρυπάνσεως για να αποκονιωθούν δίνεται σε $\mu^3/\mu\text{ιν}$.

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΩΝ

Η διαδικασία της αποκονίωσης είναι η τεχνολογία που ασχολείται με την συγκράτηση της σκόνης, που υπάρχει στα αέρια, που δημιουργούνται στις διάφορες διεργασίες μιας βιομηχανίας γενικότερα και στην τσιμεντοβιομηχανία ειδικότερα.

Η διαδικασία της αποκονίωσης έχει δύο κυρίως σκοπούς:

- Γίνεται για περιβαλλοντικούς λόγους (για την απαλλαγή του περιβάλλοντος από την σκόνη).
- Γίνεται για λειτουργικούς και οικονομικούς λόγους.

Για την κατακράτηση της σκόνης στην τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα είδη αποκονιωτών:

- Στους **μηχανικούς αποκονιωτές**, όπου η λειτουργία τους βασίζεται στην εκμετάλλευση όλων των χαρακτηριστικών της σκόνης (το βάρος, το σχήμα, το μέγεθος, η υγροσκοπιμότητα). Στους μηχανικούς αποκονιωτές ανήκουν οι κονιοθάλαμοι (θάλαμοι κατακαθήσεως), οι κυκλώνες (φυγοκεντρικοί αποκονιωτές), οι πολυκυκλώνες, οι πύργοι υγρής μεθόδου (πλυντρίδες) και τα σακκόφιλτρα.
- Στους **ηλεκτρικούς αποκονιωτές**, όπου η λειτουργία τους βασίζεται στην ηλεκτρική φόρτιση που μπορεί να δημιουργηθεί πάνω στα σωματίδια της σκόνης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (Η/Φ).

Οι κονιοθάλαμοι (θάλαμοι βαρυτικής καθίζησης) χρησιμοποιούν μόνο την δύναμη της βαρύτητας για την απομάκρυνση των σωματιδίων. Για το λόγο αυτό μπορούν να απομακρύνουν μόνο τα μεγάλα σωματίδια (περίπου $>50\mu\text{m}$).

Οι κυκλώνες λειτουργούν με τον μηχανισμό της αδράνειας. Αναγκάζουν το αέριο ρεύμα να περιστραφεί με κυκλωνικό τρόπο, το οποίο οδηγεί τα σωματίδια έξω από τη δίνη, χτυπούν στα τοιχώματα και μαζεύονται στον πυθμένα. Οι κυκλώνες μπορούν να απομακρύνουν αποδοτικά μόνο τα σωματίδια μεγέθους ($>5\mu\text{m}$).

Στις πλυντρίδες τα σωματίδια συλλέγονται στις σταγόνες με τους μηχανισμούς της αδρανειακής πρόσκρουσης και της ανάσχεσης. Η απόδοση εξαρτάται από τον τύπο της πλυντρίδας και της ισχύος που καταναλώνεται. Γενικά έχουν τουλάχιστον 95% απόδοση για σωματίδια μεγέθους ($> 3\mu\text{m}$).

Τα σακκόφιλτρα χρησιμοποιούν ποικιλία μηχανισμών (αδρανειακή πρόσκρουση, ανάσχεση, διάχυση brown, οι κυριότεροι. Αλλά και το συσσωρευμένο στρώμα λειτουργεί ως μέσο διήθησης. Λόγω των μηχανισμών αυτών οι συσκευές αυτές είναι ιδιαίτερα αποδοτικές για όλες τις περιοχές σωματιδίων.

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα χρησιμοποιούν ηλεκτρικά πεδία υψηλού δυναμικού για να φορτίσουν τα σωματίδια που κινούνται μέσα στο πεδίο. Τα κορεσμένα με φορτία σωματίδια κινούνται προς τις πλάκες συλλογής. Η απόδοση τους εξαρτάται από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση, από την θερμοκρασία και την χημική σύσταση τους και το μέγεθος της σκόνης. Μεγαλύτερη απόδοση τα σωματίδια με μέση ηλεκτρική αντίσταση.

Στην συνέχεια σε επόμενο υποκεφάλαιο του τρίτου κεφαλαίου θα αναλυθούν με περισσότερα στοιχεία όλες οι παραπάνω συσκευές αποκονίωσης.

Γενικότερα στην τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποιούνται όλες οι κατηγορίες αποκονιωτών, μηχανικών και ηλεκτρικών. Οι μηχανικοί αποκονιωτές κυκλώνες και κονιοθάλαμοι ενώ παλαιότερα χρησιμοποιούνταν σαν κανονικοί αποκονιωτές, σήμερα χρησιμοποιούνται σαν προαποκονιωτές ή παίρνουν μέρος στην παραγωγική διαδικασία.

Οι κανονισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος έχουν καθιερώσει το σακκόφιλτρο στους μηχανικούς αποκονιωτές και τα ηλεκτροστατικά φίλτρα στους ηλεκτρικούς αποκονιωτές. Επίσης οι αποκονιωτές κρίνονται σύμφωνα με τον βαθμό αποδόσεως. Σημαντικό στοιχείο για την εκλογή του αποκονιωτή είναι η καθαρότητα που πρέπει να έχει ο αέρας όταν βγαίνει από τον αποκονιωτή.

Ο βαθμός αποδόσεως των αποκονιωτών είναι ο λόγος της κατακρατούμενης σκόνης προς την ολική σκόνη που εισέρχεται στον αποκονιωτή. Αν για παράδειγμα από τα 100 γρ. Σκόνης που εισέρχονται στον αποκονιωτή κατακρατούνται τα 95 γρ. Τότε ο βαθμός αποδόσεως του αποκονιωτή είναι 95%.

3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΗ

Κατά την επιλογή του συστήματος συλλογής σωματιδίων οι παράμετροι που θεωρούνται είναι:

- Χαρακτηριστικά (σχήμα, μέγεθος, πυκνότητα) των σωματιδίων.
- Η συγκέντρωση (g/m^3) των σωματιδίων προς συλλογή (επίπεδο και διαταραχές).
- Η απαιτούμενη απόδοση της συλλογής.
- Η πτώση πίεσης στο σύστημα.
- Η φύση των σωματιδίων (εύφλεκτα, υδροσκοπικά, ηλεκτρικές ιδιότητες).
- Τοξικότητα των σωματιδίων.
- Θερμοκρασία του αέριου ρεύματος.
- Στα συστήματα που απαιτείται απομάκρυνση των συλλεγμένων σωματιδίων, κάθε πότε απαιτείται αυτή.
- Κόστος.
- Περιορισμός χώρων.

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι μια από τις κύριες μορφές ρύπανσης και εκπέμπονται από πολλές βιομηχανίες, κινητές, οικιακές, ακόμη και από φυσικές πηγές. Τα συστήματα αποκονιώσεις ποικίλουν, με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και με διαφορετικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

Οι θάλαμοι βαρυτικής καθίζησης (κονιοθάλαμοι), οι κυκλώνες και τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (H/Φ) ή ESP λειτουργούν με το να οδηγούν τα σωματίδια σε ένα στερεό τοίχο όπου δημιουργούν συσσωμάτωμα τα οποία μπορούν να συλλεχθούν ευκολότερα. Έχουν παρόμοιες σχεδιαστικές εξισώσεις. Τα σακόφιλτρα και οι πλυντρίδες υποδιαιρούν τη ροή. Έχουν διαφορετικές σχεδιαστικές εξισώσεις με τις προηγούμενες συσκευές, αλλά και μεταξύ τους. Για να συλλεχθούν τα λεπτότερα σωματίδια, μια πλυντρίδα θα πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη σχετική ταχύτητα μεταξύ του αερίου που θα πρέπει να καθαριστεί και των σταγόνων του νερού.

Αν τα αιωρούμενα σωματίδια είναι κολλώδη ή με υγρασία τότε χρησιμοποιούνται ως συλλέκτης υγρές πλυντρίδες και ηλεκτροστατικά φίλτρα, ενώ αν τα αιωρούμενα σωματίδια είναι αέρια ή ατμοί εκρηκτικοί τότε χρησιμοποιούνται υγρές πλυντρίδες και κυκλώνες. Επίσης ανάλογα με τα κριτήρια μεγέθους και απόδοσης συλλογής χρησιμοποιούνται:

- Σακόφιλτρα (**< 0.5 μm ιδιαίτερη υψηλή απόδοση**).
- Υγρές πλυντρίδες, σακόφιλτρα, ηλεκτροστατικά φίλτρα (**0.5-5 μm υψηλή απόδοση**).
- Υγρές πλυντρίδες, ηλεκτροστατικά φίλτρα, σακόφιλτρα και κυκλώνες (**>5 μέτρια πόδοση**).

3.4 ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Στα συστήματα αποκονίωσης εκτός από τα φίλτρα αποκονίωσης, σημαντικό ρόλο παίζει και ο βοηθητικός εξοπλισμός που απαιτείται να υπάρχει όπως οι αγωγοί και οι ανεμιστήρες μέσω των οποίων μεταφέρονται τα αιωρούμενα σωματίδια στα φίλτρα αποκονίωσης όπου καθαρίζεται ο αέρας και εξέρχεται στον περιβάλλον ή επιστρέφουν στην παραγωγική διαδικασία για παρά πέρα χρησιμοποίηση.

3.4.1 Αγωγοί.

Οι αγωγοί μεταφέρουν τον ρυπασμένο αέρα στον εξοπλισμό και από εκεί στον ανεμιστήρα και στην καπνοδόχο. Όλες οι τεχνολογίες αντιρύπανσης απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλο σύστημα αγωγών και εξαρτημάτων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αγωγών όπως είναι οι εξής :

- Ψυχόμενοι με νερό.
- Επενδεδυμένοι με πυρίμαχο υλικό.
- Ανοξειδωτού χάλυβα (για θερμοκρασίες αερίων 620-820 C° ή για διαβρωτικά αέρια).
- Ανθρακούχου χάλυβα (για θερμοκρασίες αερίων <620 C°).
- Πλαστικοί (σε χαμηλές θερμοκρασίες).

Επίσης κύρια παράμετρος είναι η πτώση πίεσης, κυρίως λόγω τριβής με τα τοιχώματα.

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{fr}} + \Delta P_{\text{acc}} + \Delta P_{\text{gr}} \quad (\Delta P_{\text{acc}} \text{ λόγω επιτάχυνσης και } \Delta P_{\text{gr}} \text{ λόγω βαρύτητας)}$$

Όπου:

Πτώση πίεσης λόγω τριβών σε ευθύγραμμο αγωγό ΔP_{fr} .

$$\Delta P = (2*f)*(p*u^2)/D*\Delta L$$

Πίνακας 3.1: Ισοδύναμο μήκος εξαρτημάτων για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης για τυρβώδη ροή σε κυκλικό αγωγό

Είδος εξαρτήματος	K	Ισοδύναμο μήκος ευθύγραμμου αγωγού, L_e / D
Γωνία 90°	0.9	20
Γωνία 45°	0.45	10
Ταυ	2.0	45
Διακλάδωση 45°	2	18
Βάνα τύπου πύλης(ανοιχτή)	0.3	9
Βάνα τύπου πύλης(μισο-ανοιχτή)	10	225
Μετρητικό ροής	15	350

3.4.1.1 Αρχές σχεδιασμού σωληνώσεων.

Επίσης σημαντικό ρόλο για την σωστή ροή του υλικού στους αγωγούς παίζουν κάποιες σχεδιαστικές παράμετροι των αγωγών, όπως είναι το μήκος των αγωγών, η διάμετρος του αγωγού, οι γωνίες που σχηματίζουν οι αγωγοί καθώς επίσης η τοποθέτηση και η σύνδεση τους.

Σύνδεση και τοποθέτηση των αγωγών έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η τύρβη και η αντίσταση στη ροή.



Σχήμα 3.1



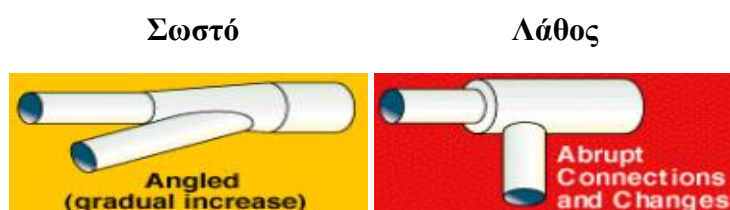
Σχήμα 3.2: Λείος, άκαμπτος αγωγός έχει λιγότερη αντίσταση από εύκαμπτο, τραχύ αγωγό.



Σχήμα 3.3: Τα μικρά τμήματα έχουν μικρότερη αντίσταση από τα επιμήκη τμήματα.



Σχήμα 3.4: Τα ευθύγραμμα τμήματα έχουν μικρότερη αντίσταση από τα λυγισμένα τμήματα.



Σχήμα 3.5: Οι παρακάμψεις να ενώνονται ομαλά (μικρή γωνία) και όχι με ορθή και δέν θα πρέπει να ενώνονται στον κύριο αγωγό στο ίδιο σημείο.



Σχήμα 3.6: Οι γωνίες με βαθμιαία κάμψη των αγωγών έχουν μικρότερη αντίσταση από τις ορθές γωνίες.



Σχήμα 3.7: Οι αγωγοί μεγάλης διαμέτρου έχουν μικρότερη πτώση πίεσης από τους αγωγούς μικρής διαμέτρου.



Σχήμα 3.8: Οι κυκλικής διατομής αγωγοί έχουν μικρότερη αντίσταση από αυτούς με τετραγωνική διατομή.

3.4.2 Ανεμιστήρες

Οι ανεμιστήρες παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια για την μετακίνηση του αέρα μέσω των αεριοσυλλεκτών, αγωγών και εξοπλισμού.

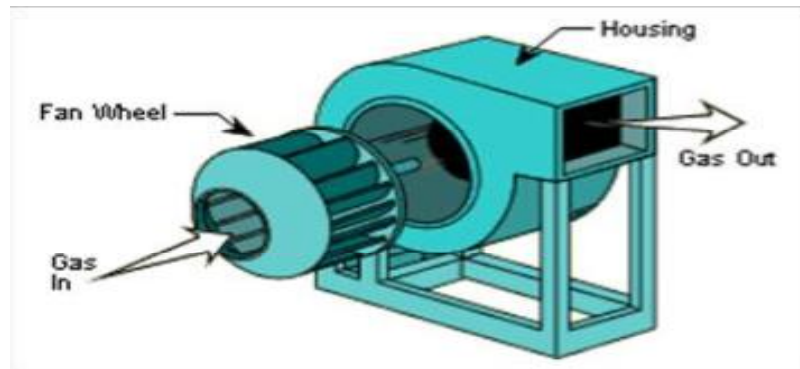
Ο ανεμιστήρας είναι μια συσκευή που έχει στόχο να μεταφέρει σε κάθε μονάδα βάρους ενός αερίου (κυρίως αέρα), που προσέρχεται σε αυτή τη μηχανική ενέργεια ενός περιστρεφόμενου τροφείου δημιουργώντας κίνηση του αερίου και αύξηση της ολικής πίεσής του. Η μεγάλη πλειοψηφία των τροφείων, που χρησιμοποιούνται, οδηγούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κινητήρες εσωτερικής καύσης ή, σπανίως, στρόβιλοι. Η ενέργεια που μεταφέρεται στο αέριο χρησιμοποιείται για την αύξηση της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας του αερίου, καθώς και για να αντιμετωπισθούν οι αντιστάσεις των αγωγών μέσα στους οποίους κινείται.

Δύο είναι οι κυριότεροι τύποι ανεμιστήρων : α) οι **φυγοκεντρικοί** ανεμιστήρες και β) οι **αξονικοί** ανεμιστήρες. Οι περισσότεροι ανεμιστήρες στις τεχνολογίες αντιρρύπανσης είναι φυγοκεντρικοί.

Στην επιλογή χρειάζεται η ογκομετρικοί παροχή του αέρα που θα μεταφερθεί, Q , και η πτώση πίεσης, ΔP ή «υψομετρική διαφορά», H που θα πρέπει να αναπτυχθεί για να ξεπεραστούν οι απώλειες της πίεσης της ροής.

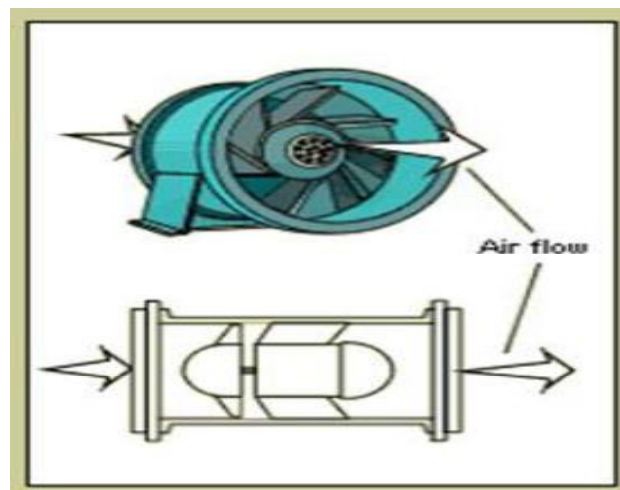
Με αυτές τις παραμέτρους υπολογίζεται η διάμετρος (D) και ο αριθμός στροφών (N).

Σε ένα **φυγοκεντρικό ανεμιστήρα**, ο αέρας εισέρχεται από την πλήμνη του τροφείου, περιστρέφεται σε ορθές γωνίες 90° και επιταχύνεται και συμπιέζεται από την φυγόκεντρο δύναμη στην εκροή. Τα κυριότερα τμήματα του είναι : ο τροχός (περιστρεφόμενο τμήμα), η κατασκευή, ο μηχανισμός οδήγησης και ο ρυθμιστής ροής στην είσοδο ή στην έξοδο (dampers).



Σχήμα 3.9: Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας.

Σε ένα **αξονικό ανεμιστήρα**, ο αέρας ρέει ευθύγραμμα μέσω της συσκευής κατά το μήκος του άξονα περιστροφής. Τα πτερύγια με αεροτομή έλκουν τον αέρα μέσα προς το χείλος πρόσπτωσης και τον εκτονώνουν από το χείλος εκφυγής.



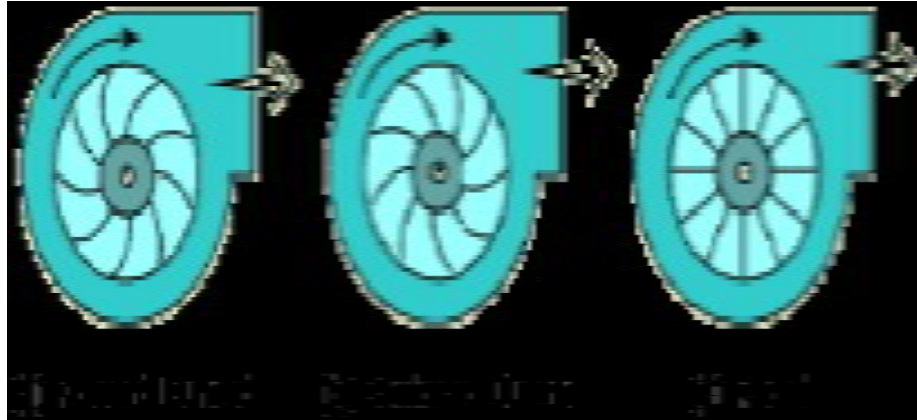
Σχήμα 3.10: Αξονικός ανεμιστήρας.

Στους ανεμιστήρες ο μηχανισμός οδήγησης καθορίζει την ταχύτητα του τροχού του ανεμιστήρα και της περιοχής που αυτή κυμαίνεται. Οι τύποι του μηχανισμού οδήγησης κατηγοριοποιούνται ως εξής :

- Άμεση οδήγηση (ταχύτητα του κινητήρα = ταχύτητα τροχού).
- Με μάντα.
- Μεταβλητής οδήγησης.

Ο τροχός αποτελείται από την πλήμνη και σειρά πτερυγίων, τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν με διαφορετικό τρόπο :

- Καμπυλομένα προς τα εμπρός.
- Καμπυλομένα προς τα πίσω.
- Ακτινικά.



Σχήμα 3.11: Πτερύγια (καμπυλόμενα προς τα εμπρός, προς τα πίσω, ακτινικά)

3.5 ΦΙΛΤΡΑ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, οι μηχανισμοί αποκονίωσης διακρίνονται στους μηχανικούς αποκονιωτές (όπου περιλαμβάνονται οι κωνιοθάλαμοι, οι κυκλώνες και οι πολυκυκλώνες, οι πύργοι υγρής μεθόδου (πλυντρίδες και τα σακκόφιλτρα) και στους ηλεκτρικούς αποκονιωτές (όπου περιλαμβάνονται τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (Η/Φ) ή ESP).

3.6 ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΕΣ

3.6.1 Κωνιοθάλαμοι.

Όπως είπαμε οι κωνιοθάλαμοι χρησιμοποιούνται σήμερα μόνο για προαποκονίωση. Ο τρόπος λειτουργίας των κωνιοθαλάμων στηρίζεται στην αρχή της πτώσεως, της ταχύτητας των αερίων, πράγμα που επιφέρει την κατακρήμνιση της σκόνης. Το αέριο με την περιεχόμενη σκόνη εισέρχεται από την πηγή σκόνης στον μεγάλο χώρο του κωνιοθαλάμου όπου η ταχύτητα πέφτει ανάλογα, ώστε τα μεγάλα τεμάχια σκόνης με την επίδραση της βαρύτητας κατακρημνίζονται. Με σκοπό την αλλαγή της διεύθυνσεως του αερίου που βελτιώνει την κατακρήμνιση των σωματιδίων τοποθετούνται πολλές φορές και εμπόδια.

Αυτό βελτιώνει τον βαθμό αποδόσεως του κωνιοθαλάμου. Οι κωνιοθάλαμοι είναι λόγω της απλής κατασκευής τους οι πιο φθηνοί αποκονιωτές, αλλά συγχρόνως έχουν και τον πιο χαμηλό βαθμό αποδόσεως.

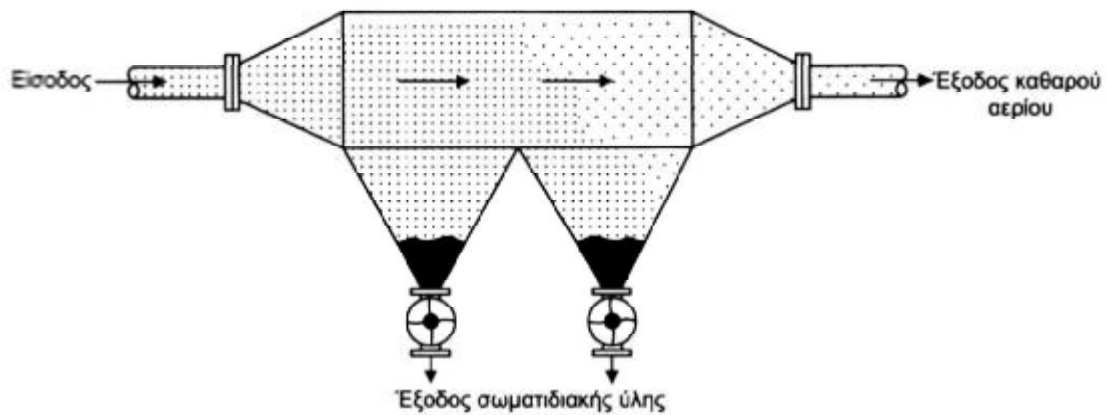
Σχετικά κατακρατούνται μόνο χονδρόκοκκα σωματίδια. Γενικά χρησιμοποιούνται για συλλογή σωματιδίων μεγαλύτερων από 50 μm . Για κατακράτηση λεπτών τεμαχίων π.χ. της περιοχής των 20 μm θα απαιτούντο μεγάλοι κωνιοθάλαμοι με ένα μήκος περίπου 35 μέτρων. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται όπως είπαμε σαν προαποκονιωτές πριν από έναν καλύτερο

αποκονιωτή π.χ. σακόφιλτρα (Σ/Φ) ή ηλεκτροστατικά φίλτρα (Η/Φ). Χρησιμοποιούμενος ο κονιοθάλαμος σε τυπική σκόνη τσιμέντου έχει βαθμό αποδόσεως 30-70 %.

Η ταχύτητα των αερίων στον κονιοθάλαμο δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.5 m/sec. Η πτώση (απώλεια) πίεσεως βρίσκεται στα 5-25 mm H₂O

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός βαρυντικού συλλέκτη δηλαδή ενός κονιοθάλαμου είναι:

- Πολύ μεγάλο μέγεθος.
- Χαμηλή πτώση πίεσης.
- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης.
- Πολύ χαμηλό ενεργειακό κόστος.
- Χαμηλό κόστος συντήρησης.
- Πολύ χαμηλή απόδοση.
- Εξαιρετική αξιοπιστία.
- Η απόδοση σε χαμηλά φορτία αυξάνεται.
- Η απόδοση σε υπερβολικά φορτία μειώνεται.



Σχημα 3.12: Κονιοθάλαμος.

Στο σχήμα παριστάνεται ένας τυπικός θάλαμος κατακράτησης με βαρύτητα. Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει την απόδοση του συλλέκτη είναι:

$$n_g = 1 - \exp(-u_t L / u H) \quad \text{ή}$$

$$n_g = 1 - \exp(-g d_p^2 \rho_p L / 18 \mu u H)$$

Όπου, n_g : η απόδοση κατακράτησης

L : το μήκος του συλλέκτη (m)

H : το ύψος του συλλέκτη (m)

U : οριζόντια ταχύτητα του αερίου και των σωματιδίων (msec^{-1})

U_t : τελική ταχύτητα των σωματιδίων (msec^{-1})

D_p : διάμετρος των σωματιδίων (m)

ρ_p : πυκνότητα των σωματιδίων (kg/m^3)

μ το ιξώδες του αερίου του μέσου (kg/ms)

3.6.1.1 Δυνάμεις που επιδρούν.

Επάνω στον κόκκο επιδρούν δύο δυνάμεις:

- Η δύναμη της βαρύτητας και
- Η δύναμη εξαιτίας της ταχύτητας των αερίων.

Συνεπώς η ταχύτητα του κόκκου αποτελείται από δύο συνιστώσες, τις u_s και u_g .

Αλλά για κοκκομετρίες 2-100 μm , η u_s ακολουθεί το νόμο του Stokes για σφαιρικά τεμαχίδια.

$$\text{Δηλαδή: } u_s = \frac{\rho_s g}{18\mu} d^2 \quad (1)$$

ρ_s πυκνότητα των κόκκων (kg/m^3), g επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2), d διάμετρος των κόκκων (m), και μ ιξώδες του αερίου ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$).

Από την (1) προκύπτει: $\ln u_s = \ln K + 2 \ln d$, όπου $K = \frac{\rho_s g}{18\mu}$

Συνεπώς, η σχέση μεταξύ $\ln u_s$ και $\ln d$, είναι ευθεία γραμμή με κλίση 2

Ο χρόνος πτώσης στον κονιοθάλαμο είναι: $t_s = h/u_s$ όπου h ύψος κονιοθαλάμου και

Ο χρόνος παραμονής στον κονιοθάλαμο είναι: $t_g = L/u_g$, όπου L το μήκος του κονιοθαλάμου

Ένας κόκκος παραμένει στον κονιοθάλαμο, μόνο αν: $t_s \leq t_g$

$$\frac{h}{u_s} \leq \frac{Lwh}{V_g} \quad (2)$$

Αλλά: $u_g = V_g/wh$, όπου V_g η παροχή των αερίων (m^3/s)

$$\text{Οπότε: } \frac{h}{u_s} \leq \frac{Lwh}{V_g} \quad \text{ή} \quad \frac{18\mu}{\rho_s g d^2} \leq \frac{S}{V_g} \quad \text{όπου } S = Lw \text{ (η επιφάνεια καθίζησης)}$$

Συνεπώς, το ελάχιστο μέγεθος κόκκου d_{\min} που μπορεί να συγκρατηθεί:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18\mu V_g}{S \rho_s g}} \quad (3)$$

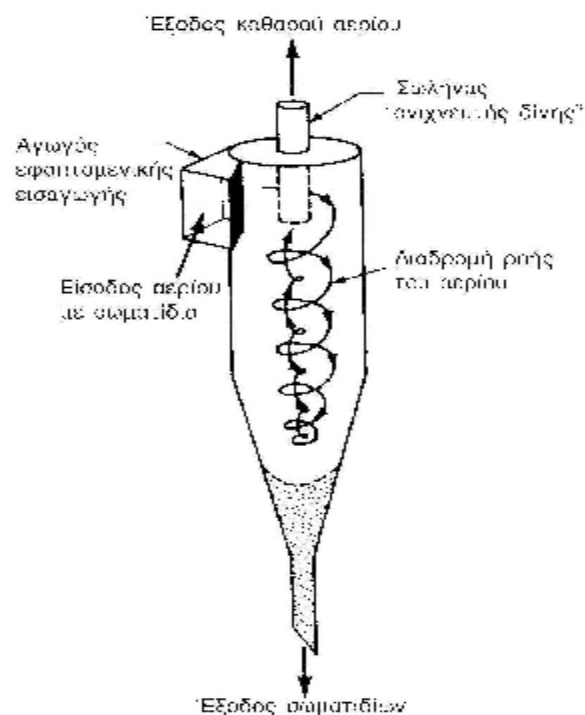
Η (3) δείχνει υπό πίες συνθήκες θα συγκρατηθεί ο κόκκος στον κονιοθάλαμο. Δηλαδή, θα πρέπει η διάμετρός του να είναι της τιμής του δεξιού μέρους της (3).

3.6.2 Κυκλώνες

Ο κυκλώνας αποτελείται βασικά από δύο μέρη, από ένα κυλινδρικό μέρος και από ένα κωνικό μέρος.

Το αέριο που πρέπει να καθαριστεί μπαίνει εφαπτομενικά στο πάνω μέρος δηλαδή 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 φυγόκεντρος 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. Τα περισσότερα σωματίδια πέφτουν σε ένα χώρο απ' όπου απομακρύνονται με ένα φράχτη ή ένα κοχλία.



Σχήμα 3.13: Σχηματική παράσταση κυκλώνα.

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 ή ουδέτερη ζώνη. Εάν αυτή η ζώνη είναι ευρεία, τότε ένα μέρος της σκόνης συμπαρασύρεται από τα αέρια. Όσο μεγαλύτερη λοιπόν είναι η διαδρομή που ένα σωματίδιο πρέπει να διανύσει για να φθάσει το οριακό στρώμα, τόσο λιγότερα σωματίδια κατακρατούνται στον κυκλώνα. Μπορεί λοιπόν να υποστηριχθεί ότι ο βαθμός απόδοσης ενός κυκλώνα είναι αντιστρόφως ανάλογος προς την διάμετρο του. Κυκλώνες με διάμετρο 225,400,600 και 3150 mm έχουν αντίστοιχους βαθμούς αποδόσεως 96.7,92.6,88.2 και 57.5 %.

Οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία για την αποκονίωση κλιβάνων, ψυχαντήρων κλίνκερ, θραυστήρων, ξηρατηρίων μύλων, εγκαταστάσεων μεταφοράς. Επίσης 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°.

Η πτώση πίεσεως των κυκλώνων κινείται στην περιοχή των 30 – 165 H₂O και εξαρτάται από την θερμοκρασία των αερίων, το μέγεθος των κυκλώνων και την ταχύτητα εισόδου των αερίων.

Υπάρχουν διάφορες κατασκευές κυκλώνων, όλες όμως εργάζονται με την ίδια αρχή της συγκράτησης της σκόνης με την φυγόκεντρο δύναμη.

3.6.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυκλώνων.

Τα πλεονεκτήματα ενός κυκλώνα είναι:

- Μικρό κόστος κατασκευής.
- Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης (λόγω της απουσίας κινούμενων μερών).
- Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Διάθεση των σωματιδίων σε ξηρή μορφή.

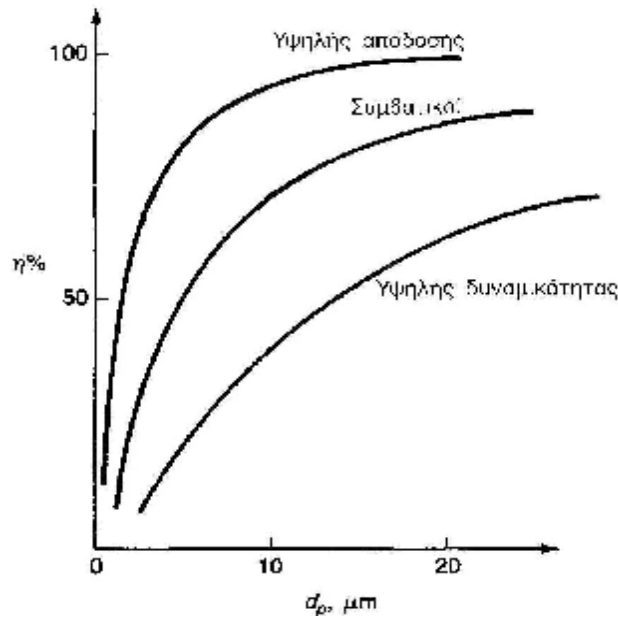
Ενώ τα μειονεκτήματα ενός κυκλώνα είναι:

- Χαμηλές αποδόσεις για $d < 10$ (d, η διάμετρος του κυκλώνα).
- Υψηλό κόστος λειτουργίας (υψηλή πτώση πίεσης).

3.6.2.2 Τύποι κυκλώνων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυκλώνων ανάλογα με την απόδοση συλλογής, την πτώση πίεσης και το μέγεθος τους. Ανάλογα με τον τύπους των κυκλώνων διακρίνουμε τους **συμβατικούς κυκλώνες**, τους **κυκλώνες υψηλής απόδοσης** και τους **κυκλώνες υψηλής δυναμικότητας** (μεγάλης ογκομετρικής παροχής).

Παρακάτω φαίνεται μια γενική σχέση της απόδοσης συλλογής έναντι του μεγέθους του σωματιδίου για κυκλώνες.



Σχήμα 3.14: Διάγραμμα απόδοσης συνάρτηση μεγέθους.

3.6.2.3 Διαστασιολόγηση κυκλώνα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχουν δύο κύριες παράμετροι που χαρακτηρίζουν την λειτουργία ενός κυκλώνα, όπως ο βαθμός απόδοσης συλλογή (η) και η πτώση πίεσης (ΔP) και σχετίζονται άμεσα με τις διαστάσεις ενός κυκλώνα, τις φυσικοχημικές ιδιότητες των σωματιδίων και του αερίου ρεύματος και της συνθήκες λειτουργίας όπως την ταχύτητα του αερίου στην είσοδο, την θερμοκρασία και την πίεση.

Ο σχεδιασμός των κυκλώνων βασίζεται σε κάποιες γεωμετρικές σχέσεις που προσδιορίζουν « τις βέλτιστες » διαστάσεις οι οποίες σχετίζονται με την διάμετρο του σώματος του κυκλώνα για τις τρεις μεγάλες κατηγορίες κυκλώνων : υψηλής απόδοσης, συμβατικούς και υψηλής δυναμικότητας.

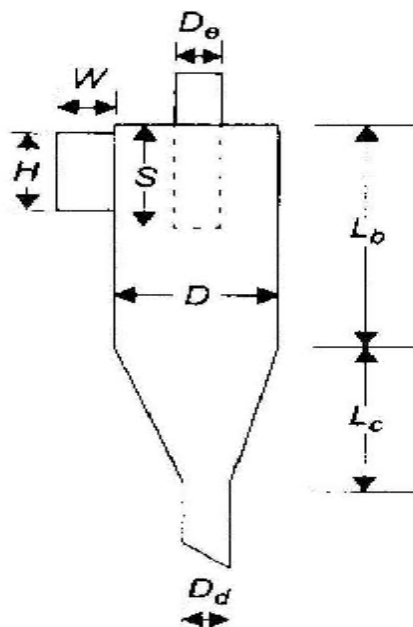
Η συνηθέστερη γεωμετρία που απαντάται στην πράξη είναι οι κυκλώνες αντιθέτου ροής με επαπτομενική εισαγωγή. Οι κυριότερες διαστάσεις του κυκλώνα είναι το κυλινδρικό σώμα που έχει διάμετρο D και ύψος L_b , το κωνικό τμήμα που έχει ύψος L_c και καταλήγει στην έξοδο των σωματιδίων με διάμετρο D_d , η είσοδος του αερίου που μπορεί να είναι είτε κυκλική (με διάμετρο D_{in}) είτε ορθογώνια (με ύψος H και πλάτος W), η διάμετρος εξόδου του αερίου (ανιχνευτής δίνης) με διάμετρο D_e και μήκος S και το συνολικό ύψος L του κυκλώνα.

Όλες οι διαστάσεις που σχετίζονται με την διάμετρο του σώματος του κυκλώνα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.2: Διαστάσεις τυπικού κυκλώνα.

	Τύπος Κυκλώνα					
	Υψηλής Απόδοσης		Συμβατικός		Υψηλής Δυναμικότητας	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Διάμετρος Σώματος D/D	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ύψος Στομίου Εισόδου H/D	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Πλάτος Στομίου Εισόδου W/D	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Διάμετρος Εξόδου Αερίου D_e/D	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Μήκος Ανιχνευτή Δίνης S/D	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Μήκος Σώματος L_b/D	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Μήκος Κώνου L_c/D	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Διάμ. Εξόδου Σωματιδίων D_d/D	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

Οι στήλες (1) και (5) προσαρμόστηκαν από τον Stairmand, 1951. Οι στήλες (2), (4) και (6) προσαρμόστηκαν από τον Swift, 1969. Η στήλη (3) προσαρμόστηκε από τον Lapple, 1951.



Σχήμα 3.15: Διαστάσεις τυπικού κυκλώνα.

3.6.2.4 Απόδοση συλλογής.

Για την απόδοση συλλογής (η) ενός κυκλώνα υπάρχουν αρκετές διαφορετικές θεωρίες. Αυτό διότι καμία θεωρία δεν μπορεί να καλύψει όλους τους διαφορετικούς τύπους κυκλώνων λόγω των τροποποιήσεων όπως στην είσοδο/έξοδο του αερίου ρεύματος, προσθέσεις ελίκων και άλλων παραμέτρων που δυσκολεύουν την θεωρητική προσέγγιση της απόδοσης συλλογής. Οι δημοφιλέστερες και πιο ακριβής μέθοδοι είναι αυτές των Lapple και Theodore & Paola.

Ο Lapple (1951) πρότεινε την διάμετρο αποκοπής 50 % (η διάμετρος σωματιδίων με απόδοση 50 %).

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\eta W}{2\rho_e V_i (r_p - r_g)}}$$

Όπου:

d_{pc} = η διάμετρος των σωματιδίων που συλλέγονται με απόδοση 50%

μ = το ιξώδες αερίου, kg/msec

W = πλάτος στομίου εισόδου, m

N_e = αριθμός πραγματικών περιστροφών, αδιάστατος

V_i = ταχύτητα εισαγωγής του αερίου, m/ sec

ρ_g = πυκνότητα αερίου, kg/m^3

ρ_p = πυκνότητα του σωματιδίου, kg/m^3

Ο αριθμός πραγματικών περιστροφών αναφέρεται στον στροβιλισμό του αερίου στην εξωτερική δίνη και εκφράζεται:

$$N_e = \frac{1}{H} \frac{L_b}{L_c} + \frac{L_c}{2H}$$

Όπου:

N_e = αριθμός πραγματικών περιστροφών

H = ύψος στομίου εισόδου, m

L_b = μήκος του σώματος του κυκλώνα, m

L_c = μήκος (κάθετο) του κυκλώνα, m

Ο Lapple αρχικά υπολόγισε το λόγο d_{pi}/d_{pc} , δηλαδή τη διάμετρο του σωματιδίου προς τη διάμετρο αποκοπής και συμπέρανε ότι για ένα τυπικό κυκλώνα, η απόδοση συλλογής αυξάνει με τη αύξηση του λόγου

Οι Theodore & DePaola προσάρμοσαν μια αλγεβρική εξίσωση καθιστώντας την προσέγγιση του Lapple περισσότερο ακριβή. Η απόδοση συλλογής οποιουδήποτε σωματιδίου μπορεί να υπολογιστεί από:

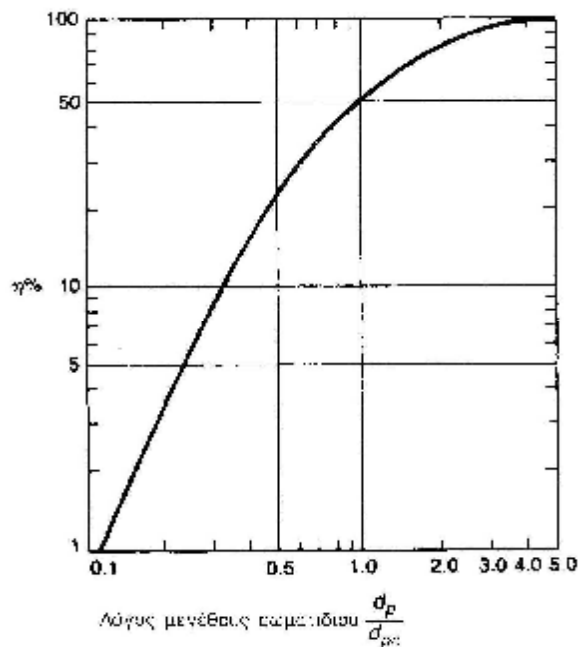
$$n_j = \frac{1}{1 + \frac{\zeta d_{pc}^2}{\epsilon d_{pj}^2}}$$

Όπου:

d_{pc} = η διάμετρος των σωματιδίων που συλλέχθηκαν με 50 % απόδοση, μm

n_j = απόδοση συλλογής για το j εύρος του μεγέθους των σωματιδίων

d_{pj} = χαρακτηριστική διάμετρος στο j εύρος του μεγέθους των σωματιδίων, μm

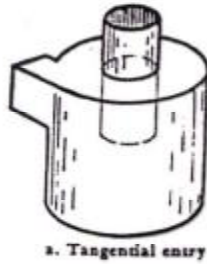


Διάγραμμα 3.1 Απόδοσης συλλογής έναντι του λόγου μεγέθους σωματιδίου για τυπικούς κυκλώνες.

3.6.2.5 Είσοδος σκόνης στον κυκλώνα και τρόποι συλλογή της.

Η είσοδος της σκόνης στον κυκλώνα επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους.

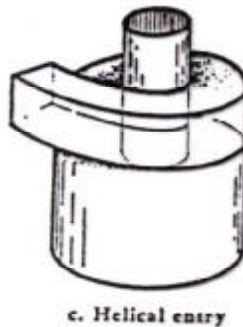
- 1) Εφαπτομενική είσοδος της σκόνης.
 - Απλός σχεδιασμό και κατασκευή.
 - Χαμηλό κόστος.
 - Χαμηλή απόδοση.
 - Σχετικά υψηλή πτώση πίεσης.



Σχήμα 3.16: Εφαπτομενική είσοδος.

2) Ελικοειδής είσοδος σκόνης.

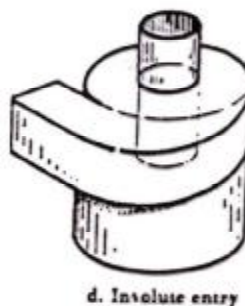
- Δίνει εφαπτομενική ταχύτητα στο αέριο.
- Σχετικά περίπλοκος σχεδιασμός.
- Υψηλότερο κόστος.



Σχήμα 3.17: Ελικοειδής είσοδος.

3) Ενεστραμένη είσοδος σκόνης.

- Επιτρέπει να εισέλθει το αέριο με την ελάχιστη τύρβη και χαμηλή πτώση πίεσης.
- Υψηλότερη απόδοση από την εφαπτομενική είσοδο.
- Μεγαλύτερες συσκευές-κόστος.



Σχήμα 3.18: Ενεστραμένη είσοδος.

Η απόρριψη ή η συλλογή της σκόνης επιτυγχάνεται με ποικίλους τρόπους, όπως χειρονακτικά, με κοχλία, μέσω περιστροφικής βάνας, με αυτόματη βάνα με επιστόμιο (κλαπέτο).

3.6.3 Πολυκυκλώνες

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι κυκλώνες με μικρή διάμετρο έχουν τον πιο καλό βαθμό απόδοσης και μάλιστα στην περιοχή διαμέτρου 150–300 mm. Αυτή η διάμετρος όμως των κυκλώνων έχει αναγκαστικά μικρή παροχή (παροχή είναι η ποσότητα των αερίων που περνούν σε ορισμένο χρόνο δια του χρόνου αυτού). Για μεγαλύτερες παροχές συνδέονται μαζί περισσότεροι κυκλώνες, με μικρή διάμετρο σε ομάδες κυκλώνων που λέγονται **πολυκυκλώνες** και η αρχή λειτουργίας του είναι ίδια ακριβώς με αυτήν του κυκλώνα.

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

Οι κυκλώνες μικρής διαμέτρου επιτυγχάνουν υψηλότερες αποδόσεις απομάκρυνσης σωματιδίων. Στα μειονεκτήματα τους συγκαταλέγονται η υψηλή πτώση πίεσης και η αδυναμία τους να χειριστούν μεγάλες ογκομετρικές παροχές. Όταν οι κυκλώνες τοποθετούνται σε σειρά ή εν παραλλήλω τα προβλήματα αυτά εξαλείφονται, όμως αυτού του είδους οι διατάξεις έχουν αυξημένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Επιπροσθέτως οι κυκλώνες που τοποθετούνται εν παραλλήλω τείνουν να «βουλώνουν» ευκολότερα.



Εικόνα 3.19: Πολυκυκλώνας.

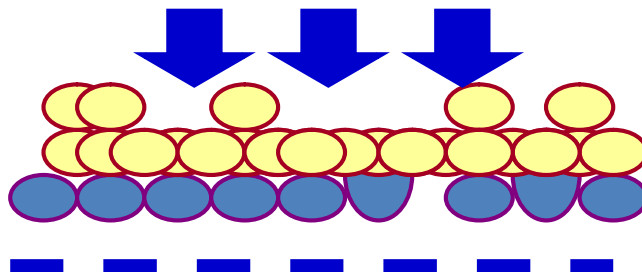
3.6.3.1 Κυκλώνες σε σειρά και εν παραλλήλω

Συνήθως στους κυκλώνες σε σειρά, ο πρώτος κυκλώνας στην διάταξη έχει μεγαλύτερη διάμετρο σώματος και συλλέγει τα μεγαλύτερα σωματίδια. Ο κυκλώνας που ακολουθεί έχει μικρότερη διάμετρο σώματος και είναι ο πιο αποδοτικός στην συλλογή των μικρότερων σωματιδίων. Σε αυτή τη διάταξη επιτυγχάνουμε μείωση της σωματιδιακής φόρτισης στην είσοδο του δεύτερου κυκλώνα και αποφεύγουμε προβλήματα από την τριβή των σωματιδίων στην συσκευή. Επίσης, στην περίπτωση που ο πρώτος κυκλώνας βουλώσει, ο δεύτερος θα απομακρύνει μέρος των σωματιδίων. Ένα μειονέκτημα είναι ότι η πτώση πίεσης που προκαλείται στον δεύτερο κυκλώνα προστίθεται σε αυτή του πρώτου, αυξάνοντας την συνολική πτώση πίεσης του συστήματος.

Στους κυκλώνες εν παραλλήλω καθώς οι συστοιχίες στην διάταξη αυτή έχουν μια κοινή είσοδο για το αέριο ρεύμα, μπορούν να χειριστούν μεγάλες παροχές σε σχετικά χαμηλές πτώσεις πίεσης.

3.6.4 Σακόφιλτρα.

Τα σακόφιλτρα (bag filters) είναι διατάξεις αποκονίωσης στις οποίες η απομάκρυνση της σκόνης πραγματοποιείται με το πέρασμα του προς καθαρισμό αερίου διαμέσου υφάσματος ενός συγκεκριμένου τύπου, όπου διαμορφώνεται σε κυλινδρικούς σάκους εγκατεστημένους σε ειδική κατασκευή. Το συλλεγόμενο στην επιφάνεια του φίλτρου υλικό σχηματίζει ένα στρώμα σκόνης το οποίο σταδιακά μετατρέπεται στο ουσιαστικό μέσο φιλτραρίσματος. Οι πόροι του μέσου (ιδιαίτερα όταν πρόκειται για πλεκτό ύφασμα) είναι αρκετές φορές μεγαλύτεροι από το μέγεθος των προς συλλογή σωματιδίων και συνεπώς ο βαθμός απόδοσης του σακόφιλτρου είναι χαμηλός έως ότου περισυλλέγει ικανοποιητικός αριθμός σωματιδίων που θα σχηματίσουν το λειτουργικό στρώμα σκόνης στους πόρους του υφάσματος.



Σχήμα 3.20

Εξαιτίας του ιδιαίτερα υψηλού βαθμού απόδοσης τους (της τάξης του 99.95%), τα σακόφιλτρα χρησιμοποιούνται για την συλλογή ιδιαίτερα λεπτόκοκκων κόνεων. Ο μεγαλύτερος περιορισμός στη λειτουργία των σακόφιλτρων προέρχεται από τις θερμοκρασιακές ανοχές των μέσων φιλτραρίσματος. Για φυσικές ίνες το άνω όριο λειτουργίας είναι περίπου 90 °C. Οι τεχνολογικές εξελίξεις και ιδιαίτερα η εισαγωγή συνθετικών ινών και ινών υάλου έχουν αυξήσει σημαντικά το άνω όριο λειτουργίας των σακόφιλτρων στους περίπου 230-260 °C.

Από τα 10-15 m³ αερίων που εκπέμπονται κατά την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου, το μεγαλύτερο μέρος είναι αέρια που εκπέμπονται από μύλους, ψυγεία κλίνκερ, ξηραντήρες και διατάξεις μεταφοράς που υφίστανται αποκονίωση μέσω σακόφιλτρων. Οι εκπομπές σκόνης καθώς επίσης τόσο το λειτουργικό όσο και το κόστος εγκατάστασης του σακόφιλτρου καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό απόδοσης και την απαιτούμενη πτώση πίεσης. Για μια συγκεκριμένη σκόνη και φέρον αέριο οι δύο αυτές παράμετροι με την σειρά τους

εξαρτώνται άμεσα από το μέσο φιλτραρίσματος, τη διάρθρωση του εξοπλισμού και τον τρόπο λειτουργίας του σακόφιλτρου.



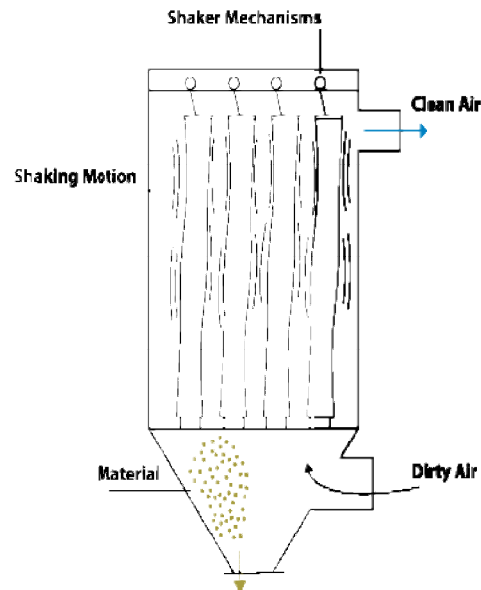
Εικόνα 3.1: Γενική εικόνα σακόφιλτρου.

Τα υπάρχοντα είδη σακόφιλτρων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες με βάση την μέθοδο καθαρισμού τους :

- Σε σακόφιλτρα δόνησης (shaker-cleaned).
- Σε σακόφιλτρα αντίστροφης ροής (reverse-flow-cleaned).
- Σε σακόφιλτρα πεπιεσμένου αέρα (reverse pulse cleaned).

3.6.4.1 Σακόφιλτρα δόνησης (shaker-cleaned).

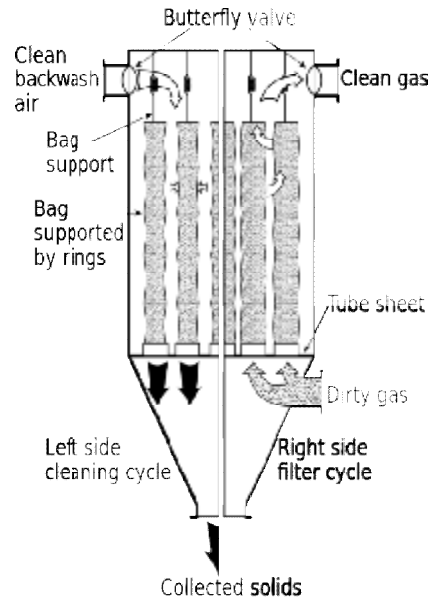
Τα σακόφιλτρα δόνησης είναι ο παλαιότερος τύπος σακόφιλτρων. Οι φέροντες σκελετοί στους οποίους προσαρμόζονται τα φίλτρα είναι συνδεδεμένοι με το μηχανισμό δόνησης. Το προς καθαρισμό αέριο κινείται προς τα πάνω μέσα στα φίλτρα και η σκόνη συλλέγεται στην εσωτερική επιφάνεια των φίλτρων. Όταν η πτώση πίεσης αγγίζει ένα προαποφασισμένο άνω όριο, ως αποτέλεσμα της συσσώρευσης σκόνης, η ροή του αερίου διακόπτεται και ο μηχανισμός δόνησης ενεργοποιείται παρέχοντας ένα δυνατό τράνταγμα στα φίλτρα απομακρύνοντας την σκόνη. Αν το σακόφιλτρο είναι συνεχούς λειτουργίας, θα πρέπει να αποτελείται από πολλαπλά διαμερίσματα, έτσι ώστε τα ξεχωριστά διαμερίσματα να είναι δυνατό να τίθεται διαδοχικά εκτός λειτουργίας για καθαρισμό, ενώ τα υπόλοιπα θα συνεχίζουν να λειτουργούν. Τα οβάλ ή κυκλικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται στις τυποποιημένες μονάδες έχουν συνήθως διαμέτρους 120-200 mm και μήκος 2.5-5 m. Τα μεγάλα βιομηχανικής χρήσης σακόφιλτρα είναι δυνατό να χρησιμοποιούν φίλτρα διαμέτρου μέχρι 300 mm και μήκος 9 m. Τα φίλτρα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από πλεκτό ύφασμα ώστε να αντίστανται στην κάμψη και την ένταση κατά την διάρκεια της δόνησης. Τα υφάσματα είναι δυνατό να έχουν κατασκευαστεί είτε από φυσικές ίνες (βαμβάκι ή μαλλί) είτε από συνθετικές. Υφάσματα από ίνες υάλου ή μεταλλικές ίνες είναι πολύ εύθραυστα για να υποστούν καθαρισμό με δόνηση και συνήθως χρησιμοποιούνται στα σακόφιλτρα αντίστροφης ροής.



Σχήμα 3.21: Σακόφιλτρο δόνησης.

3.6.4.2 Σακόφιλτρα αντίστροφης ροής (reverse-flow-cleaned).

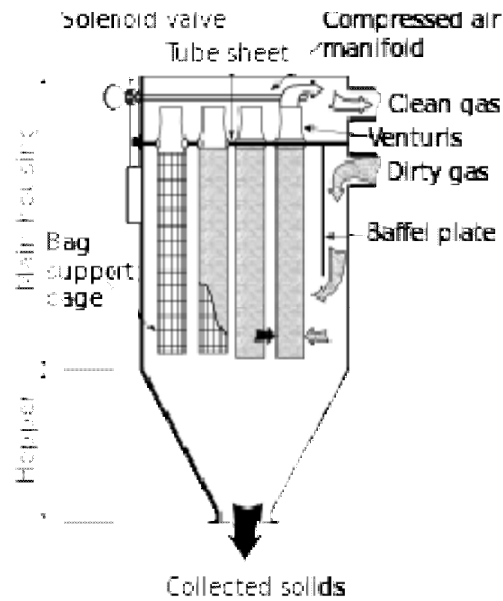
Τα σακόφιλτρα αντίστροφης ροής είναι γενικά όμοια με τα σακόφιλτρα δόνησης, με τη διαφορά ότι απουσιάζει ο μηχανισμός δόνησης. Αφού σταματήσει η ροή του προς καθαρισμό αέρα, ένας ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για τη διαβίβαση καθαρού αέρα διαμέσου των φίλτρων από την πλευρά του καθαρού αερίου. Αυτή η ροή αέρα συστέλλει μερικώς τα φίλτρα και εκτοπίζει τη συσσωρευμένη σκόνη στον κάδο συλλογής. Συνήθως κατά μήκος των φίλτρων προσαρμόζονται δακτύλιοι υποστήριξης, οι οποίοι εμποδίζουν την πλήρη συστολή των φίλτρων που θα εμπόδιζε την απόθεση της συσσωρευμένης σκόνης. Η κύρια εφαρμογή των σακόφιλτρων αντίστροφης ροής είναι συνδυασμένη με τη χρήση φίλτρων από ίνες υάλου για αποκονίωση σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 150 °C.



Σχήμα 2.22: Σακόφιλτρο αντίστροφης ροής.

3.6.4.3 Σακόφιλτρα πεπιεσμένου αέρα (reverse pulse cleaned).

Στα σακόφιλτρα πεπιεσμένου αέρα, το φίλτρο σχηματίζει ένα μακρόστενο σωλήνα, ο οποίος εφάπτεται σε ένα φέροντα σκελετό (support cage). Ο φέρων σκελετός ενισχύει το φίλτρο από την πλευρά του καθαρού αέρα, ενώ η σκόνη συλλέγεται στην εξωτερική επιφάνεια του φίλτρου. Ένα ακροφύσιο venturi τοποθετείται πάνω από την έξοδο του καθαρού αερίου σε κάθε φίλτρο. Για τον καθαρισμό μια ποσότητα αέρα υψηλής ταχύτητας οδηγείται μέσω των ακροφυσίων venturi στο εσωτερικό των φίλτρων, από όπου ρέει διαμέσου των φίλτρων. Η ποσότητα αέρα υψηλής ταχύτητας (jet) απελευθερώνεται με τη μορφή ενός ξαφνικού μικρής διάρκειας παλμού, από μια παροχή πεπιεσμένου αέρα μέσω μιας ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας. Η πίεση του παλμού είναι ικανή να εκτοπίσει τη συσσωρευμένη σκόνη χωρίς διακοπή της λειτουργίας του σακόφιλτρου.



Σχήμα 3.23: Σακόφιλτρο πεπιεσμένου αέρα.

Μια βασική παράμετρος σχεδιασμού και λειτουργίας ενός σακόφιλτρου είναι η ταχύτητα φιλτραρίσματος εκφρασμένη μέσω του λόγου της ροής του αερίου Q (m^3/h) προς την επιφάνεια του φίλτρου A (m^2).

$$V = \frac{Q}{A}$$

Ο βαθμός απόδοσης των σακόφιλτρων είναι στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ υψηλός ($> 99.95\%$) και εξαρτάται κυρίως από το είδος του φίλτρου, την ταχύτητα φιλτραρίσματος, τη μέθοδο καθαρισμού και τον κύκλο καθαρισμού.

3.7 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΑΠΟΚΟΝΙΩΤΕΣ – ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

Το ηλεκτρόφιλτρο χρησιμοποιεί ηλεκτρικές δυνάμεις για να αιχμαλωτίσει στερεά ή υγρά σωματίδια από ένα αέριο ρεύμα. Τα ηλεκτρόφιλτρα είναι διατάξεις αποκονίωσης πολύ υψηλής απόδοσης και ένας βαθμός απόδοσης της τάξης του 99.9%. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ηλεκτροστατικών φίλτρων, που ίσως και εξηγεί τους ιδιαίτερα υψηλούς βαθμούς απόδοσης τους, αποτελεί το γεγονός ότι συγκεντρώνουν την κύρια δύναμη δράσης τους στο προς συλλογή σωματίδιο και όχι στο φέρον αέριο. Παρ' όλα αυτά, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τόσο του φέροντος αερίου όσο και της ίδιας της διεργασίας καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό κατά πόσο τα προς συλλογή σωματίδια είναι εύκολο να απομακρυνθούν ή αν θα παρουσιαστούν προβλήματα κατά τη συλλογή τους.

Η βασική αρχή λειτουργίας των ηλεκτρόφιλτρων στηρίζεται στο αποτέλεσμα ιονισμού του αερίου λόγω σχηματισμού ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου από τα ηλεκτρόδια εκπομπής (CORONA, εκκένωση αρνητικά) και κατακρημνίσεως (θετικά). Εάν η ηλεκτρική τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι αρκετά υψηλή (υψηλής τάσεως συνεχές ρεύμα 40 – 80000 V), τότε αρχίζει το ηλεκτρόδιο εκπομπή να εκπέμπει ηλεκτρόνια και ακολουθεί μια φόρτιση των μορίων των αερίων που περιβάλλουν τα ηλεκτρόδια σε θετικά και αρνητικά ιόντα. Με την επίδραση της ισχύος του πεδίου μετακινούνται τα αρνητικά ιόντα προς τα θετικά ή

ηλεκτρόδια κατακρημνίσεως που έχουν γειωθεί. Εάν το αέριο είναι σκονερό δίδουν τα αρνητικά ιόντα τη φόρτιση τους στα σωματίδια που μετακινούνται μετά προς το θετικό ηλεκτρόδιο, εκεί εκφορτώνονται και γίνονται ουδέτερα.

Εκεί με χτύπημα (τίναγμα) των ηλεκτροδίων αποχωρίζεται η σκόνη και πέφτει στον κώνο συλλογής. Ένα ελάχιστο μέρος των σωματιδίων φορτίζεται θετικά και κατακρημνίζεται στο ηλεκτρόδιο εκπομπής, γι' αυτό πρέπει να χτυπιούνται και τα ηλεκτρόδια εκπομπής. Έτσι λοιπόν λαμβάνουν μέρος στον ηλεκτρικό καθαρισμό των αερίων α) η κορώνα εκκένωσης, β) η φόρτιση σωματιδίων και γ) η κατακρήμνιση των σωματιδίων .

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ηλεκτρόφιλτρων.

Πλεονεκτήματα :

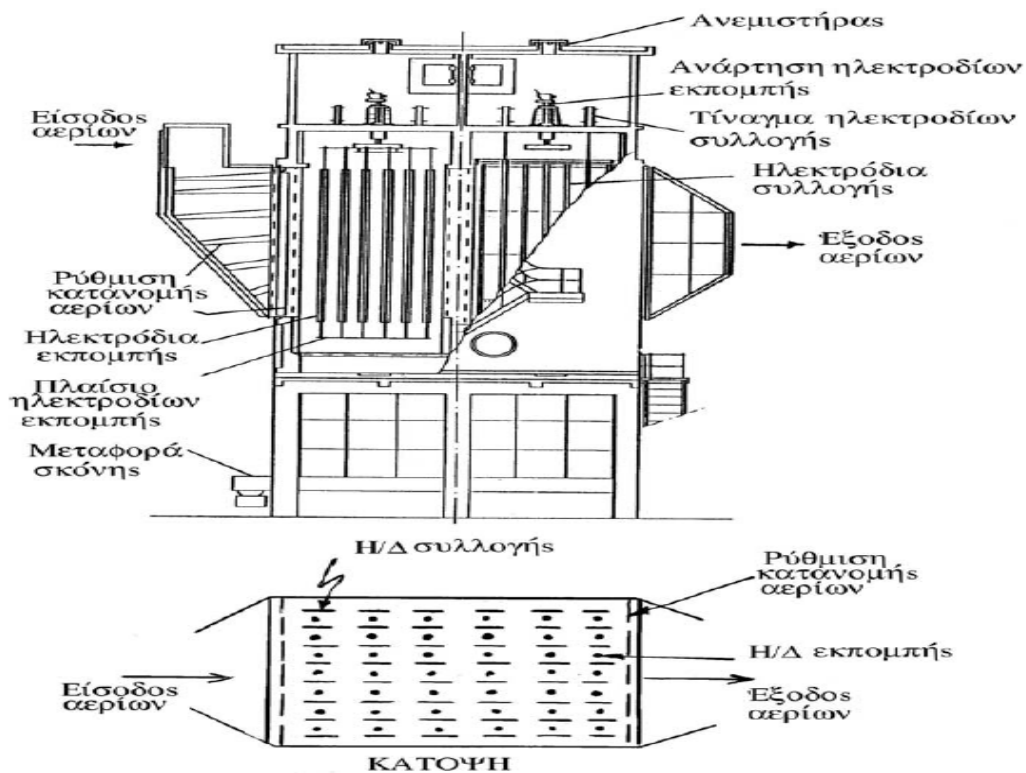
- Πολύ υψηλές αποδόσεις (99%), ακόμη και για μικρά σωματίδια (0.01 μm – 100 μm).
- Επεξεργάζονται μεγάλους όγκους αέριων ρευμάτων (25 – 1500 m^3/s).
- Ευρεία περιοχή θερμοκρασιών (μέχρι 650 $^{\circ}\text{C}$) και πίεσης λειτουργίας (10 atm).
- Λειτουργούν με υψηλές φορτίσεις, 500 g/m^3 .
- Χαμηλό ενεργειακό κόστος, 7 – 35 W/m^3 .
- Χαμηλή πτώση πίεσης.

Μειονεκτήματα :

- Υψηλό κόστος επένδυσης.
- Δεν μπορεί να γίνει ταυτόχρονος έλεγχος όξινων αερίων.
- Όχι ιδιαίτερα ευέλικτοι σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας μετά την εγκατάστασή τους.
- Καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο.
- Δεν λειτουργούν ικανοποιητικά με σωματίδια με πολύ υψηλή ηλεκτρική αντίσταση.



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση ηλεκτροστατικού φίλτρου (ESP).

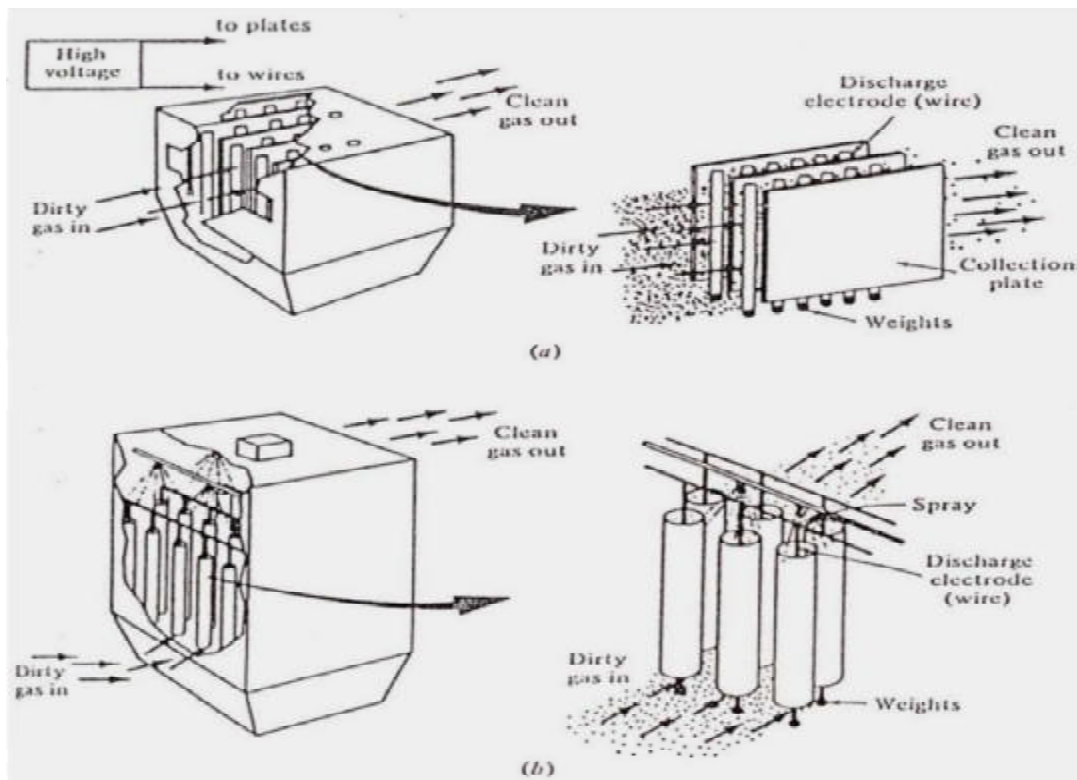


Σχήμα 3.24: Γενική εικόνα ηλεκτρόφιльтρου(ESP).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ηλεκτρικών αποκονιωτών :

- Κυλινδρικός αποκονιωτής (σωλήνας).
- Επίπεδος αποκονιωτής (πλάκες).

Ο κυλινδρικός αποκονιωτής εφαρμόζεται κυρίως για αποκονίωση με υγρά εκχυλίσματα αερίου. Για να ξαναχρησιμοποιηθεί η κατακρημνισθείσα σκόνη στην παραγωγή εφαρμόζεται στην τσιμεντοβιομηχανία μόνο ξηρή ηλεκτρική αποκονίωση, γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ο τύπος του επίπεδου ηλεκτρικού αποκονιωτή (με πλάκες).



Σχήμα 3.25: (α) κυλινδρικός αποκονιστής, (β) επίπεδος αποκονιστής (πλάκες).

Σε ένα ηλεκτρόφιλο εκτός από την κατακρήμνιση με την επιφάνεια του ηλεκτρικού πεδίου, επιτυγχάνεται και κατακρήμνιση ενός μέρους των σωματιδίων σκόνης με επενέργεια της βαρύτητας. Επίσης σε διακοπή και όταν πέφτει το ηλεκτρικό ρεύμα λειτουργεί ο ηλεκτρικός αποκονιστής σαν κωνοθάλαμος με βαθμό απόδοσης 85 – 90%. Λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης 85 – 90% είναι περιττός ο συνδυασμός του ηλεκτρόφιλου με ένα αποκονιστή, σε υψηλές περιεκτικότητες σκόνης όμως είναι αναγκαία η χρησιμοποίησή του για καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Για την αποφυγή σκόνης σήμερα στην τσιμεντοβιομηχανία πέραν των επιτρεπτών ορίων στην συνεχή λειτουργία του Η/Φ και λόγω των δυσκολιών που προκύπτουν από την διαφορετική ιδιότητα σκόνης και αερίου αναγκάζεται να λειτουργεί με ένα ηλεκτρόφιλο με μεγαλύτερες δαπάνες.

Τέλος ένα ηλεκτρόφιλο (Η/Φ) σε σύγκριση με άλλους αποκονιστές λειτουργεί με πολύ καλή πτώση πίεσης από 15 – 20 mm H₂O. Επίσης η ειδική κατανάλωση του ηλεκτρόφιλου είναι πολύ χαμηλή, βρίσκεται στην περιοχή περίπου 0.2 – 0.3 KWH/1000M³ αερίου ή γύρω στα 0.65 KWH/T κλίνκερ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

4.1 ΡΥΠΑΝΣΗ

Η ρύπανση αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά και μακροχρόνια περιβαλλοντικά προβλήματα. Αναφορικά με την ρύπανση υπάρχει πληθώρα αποδεκτών ορισμών.

Ρύπανση είναι η προσθήκη στο περιβάλλον (νερό, αέρα, έδαφος) ενός ή περισσότερων χημικών ή φυσικών παραγόντων σε ποσότητες που είναι ή μπορεί να είναι επιβλαβείς για τον άνθρωπο, τα ζώα και τα φυτά.

Υπάρχουν πολλές μορφές ρύπανσης όπως είναι :

- Η **υδάτινη, ατμοσφαιρική, ραδιενεργή** ρύπανση (αλλά και η ηχορύπανση, φωτορύπανση, θερμική ρύπανση).
- **Αέρια ρύπανση** : χημικοί παράγοντες, βιολογικοί παράγοντες.
- **Φυσικές πηγές ρύπανσης** : ηφαίστεια, σκόνη με τον άνεμο, καπνός από πυρκαγιές δασών.
- **Ανθρωπογενής πηγές ρύπανσης** : σκόνη από την γεωργία και τις μεταφορές, βιομηχανικές δραστηριότητες (καύση και επεξεργασία), πτητικά βαφών και κόλλες, αυτοκίνητα κ.α.

Οι ρύποι που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι οι ακόλουθοι :

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

Πίνακας 4.1: Φυσικές πηγές ρύπανσης.

Πηγή	Συνεισφορά
Ηφαίστεια	SO _x , σωματίδια
Πυρκαγιές δασών	CO, CO ₂ , NO _x ,
Φυτά	Υδρογονάνθρακες, γύρη
Αποσύνθεση φυτών	CH ₄ , H ₂ S
Έδαφος	Σκόνη (σωματίδια) και ιούς
Θάλασσα	Χλωριούχο νάτριο και θειικά άλατα

Πίνακας 4.2: Οι κυριότεροι ρύποι και οι πηγές τους.

Πηγή	Ρύπος (εκατομμύρια τόνοι / έτος)					
	CO	SO ₂ ,SO ₃	NO,NO ₂	H/C	Σωματίδια α	Σύνολο
Μεταφορές :						
Αυτοκίνητο	67.3	0.3	7.0	12.7	0.7	88.0
Άλλα	3.9	0.1	1.0	1.1	0.5	6.6
Σύνολο	71.2	0.4	8.0	13.8	1.2	94.6
Καύσεις						
Παρ.Ηλεκτρικής						
Ενέργειας	0.1	14.0	3.5	-	2.3	19.9
Βιομηχανία	0.3	5.5	3.1	0.1	3.0	12.0
Οικιακή θέρμανση	1.3	1.8	0.5	0.6	0.4	4.6
Άλλα	0.2	0.7	0.4	-	0.3	1.6
Σύνολο	1.9	22.0	7.5	0.7	6.0	38.1
Επεξεργασία Στερεών						
Αποβλήτων	4.5	0.1	0.7	1.4	1.2	7.9
Διάφορες κατεργασίες	7.8	7.2	0.2	3.5	5.9	24.6
Διάφορα	1.2	0.6	0.2	4.2	0.4	6.6
ΣΥΝΟΛΑ	86.6	30.3	30.3	23.6	14.6	172.8

Η ρύπανση του περιβάλλοντος φαίνεται αναπόφευκτη ως ένα βαθμό, αλλά μπορεί να ελαχιστοποιηθεί και να περιοριστούν σημαντικά οι επιπτώσεις της. Οι επιπτώσεις ρύπανσης από τον τομέα της ενέργειας επιδρά στα εξής φαινόμενα :

- ⊗ Φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εμφανίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο και οι αυξημένες εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου θεωρούνται υπεύθυνες για την προοδευτική αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης (κλιματική αλλαγή και υπερθέρμανση του πλανήτη). Τα κυριότερα αέρια είναι το CO₂, το μεθάνιο, τα NO_x, και το όζον στην ατμόσφαιρα. Η καύση των ορυκτών καυσίμων είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο μέρος του CO₂. Η ενέργεια είναι επίσης υπεύθυνη και για μέρος των εκπομπών μεθανίου και συνεισφέρει στην παραγωγή NO_x.
- ⊗ Όξινη βροχή. Εμφανίζεται σε περιφερειακό επίπεδο και οφείλεται σε εκπομπές οξειδίων θείου και αζώτου από την καύση του γαιάνθρακα και του πετρελαίου.
- ⊗ Φωτοχημικό νέφος. Δημιουργείται μόνο σε τοπικό επίπεδο και οφείλεται βασικά στις εκπομπές των αυτοκινήτων αλλά και των βιομηχανιών.
- ⊗ Ρύπανση των υδάτινων πόρων (πυρηνικά και άλλα υγρά απόβλητα στα υπόγεια νερά, σε τοπικό επίπεδο) και υποβάθμιση λιμνών, ποταμών και ωκεανών.
- ⊗ Πετρελαιοκηλίδες στη θάλασσα ή ποταμούς και διαρροές σε επιφανειακά νερά.
- ⊗ Θερμική ρύπανση. Παγκόσμια και τοπικά : θερμικά απόβλητα σε θάλασσα, άλλους υδάτινους αποδέκτες, ξηρά και ατμόσφαιρα.

Λόγω της όξινης βροχής και των άλλων φαινομένων μπορεί να υπάρξει υποβάθμιση βιότοπων, δασών κ.τ.λ.

Πίνακας 4.3: Σύνοψη περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας.

Καύσιμα	Ρυπαντής	Επίπτωση	Αντιμετώπιση
Άνθρακας	SO ₂ , SO ₃ Αιθάλη CO ₂	Όξινη βροχή Νέφος Αέριο θερμοκηπίου	Καταλυτική μετατροπή Καθαρότερα καύσιμα Ανακύκλωση ,προσωρινή δέσμευση
Πετρέλαιο/φυσικό αέριο	NO,NO ₂ ,CO Υδρογονάνθρακες CO ₂	Φωτοχημικό νέφος Αέριο θερμοκηπίου	Καταλυτική μετατροπή Ανακύκλωση
Πυρηνικά	Ραδιενεργά απόβλητα	Υγεία/Περιβάλλον	Ταφή/αποθήκευση υαλοποιημένων αποβλήτων

4.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

4.2.1 Γενικά

Σε μια βιομηχανία τσιμέντου δυναμικότητας 1000000 t/y διαχειρίζεται περίπου 1500000 t πρώτων υλών, 150000 t καρβούνου και 50000 t γύψου ετησίως. Τα υλικά αυτά υφίστανται μια σειρά διεργασιών που συνοδεύονται, αν δεν λειφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας, από πιθανή διάχυση στο περιβάλλον σκόνης. Επίσης οι διατάξεις ένησης παράγουν πάνω από 1.5 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα αερίων ετησίως. Τα αέρια καύσης περιέχουν SO₂ (θείο) και NO_x (άζωτο) όπως και άλλα επιβλαβή συστατικά, ειδικά στην περίπτωση χρήσης βιομηχανικών αποβλήτων ως καυσίμων.

Στο αυστηρό σήμερα νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία του περιβάλλοντος, η αντιμετώπιση των εκπομπών μιας βιομηχανίας τσιμέντου είναι απαραίτητη. Εκτιμάται ότι το 20% του πάγιου κόστους μιας νέας βιομηχανίας τσιμέντου απαιτείται για τις διατάξεις προστασίας του περιβάλλοντος, η λειτουργία των οποίων συμμετέχει σε ποσοστό 7-10% στο κόστος παραγωγής.

4.2.2 Λατομεία – Εξόρυξη

Από τα διάφορα στάδια της εκμετάλλευσης των λατομείων προκύπτουν διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η εξόρυξη των πετρωμάτων δημιουργεί θόρυβο, σκόνη και δονήσεις του εδάφους, η φόρτωση και μεταφορά των υλικών δημιουργεί πρόσθετη σκόνη και τέλος μετά την εξάντληση του λατομείου δημιουργείται πρόβλημα αποκατάστασης του περιβάλλοντος ώστε να μπορεί να αποδοθεί ο χώρος για μελλοντικές χρήσεις. Οι βιομηχανίες τσιμέντου εντοπίζουν τις προσπάθειες τους στην αποκατάσταση του περιβάλλοντος, ενώ λαμβάνονται μέτρα και για την αντιμετώπιση άλλων οχλήσεων.

4.2.3 Διατάξεις προομογενοποίησης

Η σκόνη που εκλύεται κατά την απόθεση και απόληψη του υλικού, όπως και κατά την μεταφορά του με τις μεταφορικές ταινίες είναι τα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα από τη λειτουργία των διατάξεων προομογενοποίησης. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για την αντιμετώπιση των παραπάνω επιπτώσεων, όπως απόθεση από χαμηλότερο ύψος στην σωρό, μερική απόληψη υλικού, ψεκασμός υλικών με νερό λίγο πριν την απόθεση τους για να αυξηθεί η υγρασία του και να ελαττωθεί το ποσοστό σκόνης.

4.2.4 Διατάξεις θραύσης

Κατά την λειτουργία ενός συγκροτήματος θραύσεως παράγεται θόρυβος και δονήσεις καθώς εκπέμπεται και σκόνη στο περιβάλλον. Ο παραγόμενος θόρυβος από τους σιαγωνιοθραυστήρες είναι 95-110 dB (A) από τους σπαστήρες με κυλίνδρους 90-105 dB (A) από τους σφυροθραυστήρες 100-110 dB (A) και από τους κρουστικούς θραυστήρες 85-100 dB (A).

Η σκόνη εκλύεται συνήθως κατά την ανατροπή των φορτηγών που μεταφέρουν την πρώτη ύλη από το λατομείο στην χοάνη τροφοδοσίας του σφυροθραυστήρα καθώς και από το θραυστήρα και τα μέσα μεταφοράς του θραυσμένου υλικού.

Για την ελαχιστοποίηση της διάδοσης του θορύβου, που παράγεται από την λειτουργία των θραυστήρων, θα πρέπει όλη η εγκατάσταση να βρίσκεται μέσα σε κλειστά ηχομονωμένα κτίρια και κατά προτίμηση κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η ανοιχτή πλευρά του κτιρίου εάν είναι δυνατόν θα πρέπει να μην βλέπει προς γειτονικές κατοικημένες περιοχές. Για τον περιορισμό της σκόνης κατά την ανατροπή των φορτηγών στην χοάνη του θραυστήρα θα πρέπει η χοάνη να είναι στεγασμένη. Επίσης μια καλή λύση του προβλήματος είναι ο ψεκασμός νερού στην χοάνη τροφοδοσίας κατά την ανατροπή των φορτηγών. Ο ψεκασμός θα πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο ώστε αφ' ενός να περιορίζεται η εκπομπή σκόνης, αφ' ετέρου να μην λασπώνει το υλικό και φρακάρει ο σπαστήρας. Τέλος χρησιμοποιούνται και οι κατάλληλες διατάξεις αποκονίωσης, όπως τα σακόφιλτρα τα οποία αναρροφώντας μια ορισμένη ποσότητα αέρα σε σκόνη, δημιουργούν μέσα σε αυτούς υποπίεση και δεν επιτρέπουν στην σκόνη να εκλυθεί στο περιβάλλον.

4.2.5 Διατάξεις άλεσης φαρίνας και τσιμέντου.

Από την λειτουργία των συγκροτημάτων του μύλων έχουμε τις εξής περιβαλλοντικές επιπτώσεις :

- Ρύπανση της ατμόσφαιρας με σκόνη που προέρχεται από τα τροφοδοτικά μηχανήματα, τον κυρίως μύλο και τα βοηθητικά μηχανήματα γενικά.
- Ηχητική ρύπανση του γύρω χώρου που προέρχεται κυρίως από τον ίδιο μύλο και τον αεροσυμπιεστή (όταν έχουμε πνευματική μεταφορά). Ηχητική ρύπανση σε μικρότερη κλίμακα προκαλούν και τα βοηθητικά μηχανήματα όπως ανεμιστήρες, αναβατήρες, αλυσίδες, μεταφορικές ταινίες.
- Κραδασμοί που προέρχονται από διάφορα μηχανήματα σε μικρό βαθμό όμως και που πολύ μεγάλο ρόλο παίζει η παλαιότητα τους.

Η εκπομπή σκόνης από τα τροφοδοτικά μηχανήματα, τον μύλο και τα βοηθητικά μηχανήματα γενικά αντιμετωπίζονται με τη χρήση διατάξεων αποκονίωσης πολύ μεγάλης αποτελεσματικότητας (σακόφιλτρα, ηλεκτρόφιλτρα). Ο θόρυβος που είναι εξίσου σημαντικό πρόβλημα, αφού σε απόσταση 1 m από ένα λειτουργικό μύλο ο εκπεμπόμενος θόρυβος είναι 115 dB (A), από ένα συμπιεστή 120 dB (A) και από έναν ανεμιστήρα υψηλής πίεσης 128 dB (A). Με την ηχομόνωση των μηχανημάτων και χώρων επιτυγχάνεται μείωση του θορύβου στο επίπεδο των 65 dB (A).

4.2.6 Διατάξεις ομογενοποίησης.

Η ομογενοποίηση επιτυγχάνεται με εμφύσηση αέρα από τον πυθμένα των σιλό ανάμειξης. Η έκλυση σκόνης στο περιβάλλον αποτρέπεται με την χρήση σακόφιλτρων.

4.2.7 Διατάξεις έμψησης.

Η περιβαλλοντική επίπτωση από τη λειτουργία της περιστροφικής καμίνου είναι η εκπομπή σκόνης με τα αέρια προϊόντα της καύσης όπως και η περιεκτικότητα των αερίων σε διάφορα βλαπτικά συστατικά (SO_2 , NO_x , CO_2). Τα αυξανόμενα προβλήματα που προκαλούνται από την όξινη βροχή (αποτέλεσμα των εκπομπών NO_x και SO_2) οδήγησαν στην επιβολή περιορισμών στην εκπομπή NO_x , οι οποίοι γίνονται όλοενα και αυστηρότεροι. Σχεδόν αποκλειστικά η αποκονίωση των αερίων επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρόφιλτρων υψηλής αποτελεσματικότητας.

Οι εκπομπές SO_2 αποτελούν πρόβλημα σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν καύσιμο με μεγάλη περιεκτικότητα σε S (μαζούτ), οπότε είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός conditioning tower. Στην περίπτωση που και οι πρώτες ύλες της βιομηχανίας έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε θειικά, η κατακράτηση των SO_2 γίνεται μέσω μιας ρευστοστερεάς κλίνης σωματιδίων. Με ψεκασμό νερού στα αέρια επιτυγχάνεται η μείωση της θερμοκρασίας τους, ενώ με διέλευση των αερίων μέσω μιας κλίνης με μείγμα πρώτων υλών και σβησμένου ασβέστη, τα SO_2 ενσωματώνονται στο υλικό ως SO_3 και το προϊόν επανατροφοδοτείται στην κάμινο.

Η περιεκτικότητα των απαερίων σε NO_x εξαρτάται από τη θερμοκρασία στη ζώνη κλινκεροποίησης, το μήκος φλόγας, τη χρησιμοποιούμενη περίσσεια αέρα και το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Στις σύγχρονες βιομηχανικές μονάδες η περιεκτικότητα των απαερίων σε NO_x είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, ιδιαίτερα σε συστήματα διπλής καύσης όπου η θερμοκρασία καύσης είναι χαμηλή.

Τα NO_x στην περιστροφική κάμινο δημιουργούνται από δύο αιτίες : α) τα θερμικά NO_x δημιουργούνται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, όπως αυτές της φλόγας, λόγω οξειδωσης του αζώτου του αέρα καύσης και β) τα καυσιμογενή NO_x δημιουργούνται από την οξειδωση των αζωτούχων ενώσεων του καυσίμου. Τα θερμικά NO_x δεν εξαρτώνται από το είδος του καυσίμου, αλλά από τις συνθήκες καύσης και επικρατούν στη ζώνη πρωτογενούς καύσης. Στην δευτερογενή καύση στον προασβεστοποιητή όμως, η οποία γίνεται στους 850-950 °C, επικρατούν τα καυσιμογενή NO_x που είναι ανάλογα με το ενωμένο άζωτο (N) που έχει το καύσιμο.

Η μείωση των NO_x είναι δυνατή με χρήση καυσίμου υψηλής ποιότητας, με ψεκασμό καυσίμου και με ψεκασμό αμμωνιούχων ενώσεων. Όσον αφορά τα καύσιμα η σειρά περιεκτικότητας σε (N) των διαφόρων καυσίμων είναι : κοκ, ανθρακίτης, λιθάνθρακας, λιγνίτης, βαριά και ελαφριά αποστάγματα πετρελαίου, φυσικό αέριο, με μείωση της περιεκτικότητας (N) από τα αριστερά προς τα δεξιά. Επίσης τα φθηνά καύσιμα είναι αυτά που προκαλούν τα περισσότερα NO_x .

4.2.8 Διατάξεις ψύξης κλίνκερ.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εντοπίζονται κυρίως στην περίπτωση χρήσης ψυγείων με εσχάρες, αφού στην περίπτωση πλανητικών ή περιστροφικών ψυγείων τυχόν διαφυγή σκόνης θα οφείλεται σε κάποια κατασκευαστική ή λειτουργική αστοχία όπως το τρύπημα σε κάποιο κέλυφος του ψυκραντήρα. Η αποκονίωση στα ψυγεία με εσχάρες επιτυγχάνεται με χρήση σακοφίλτρων. Τέλος στην περίπτωση του ψυκραντήρα με εσχάρα υπάρχουν περισσότερες πιθανότητες ρύπανσης του περιβάλλοντος με σκόνη κλίνκερ διότι η ψύξη του κλίνκερ γίνεται κατά κάποιο τρόπο εξαναγκασμένα με μεγάλες παροχές αέρα από ανεμιστήρες και έτσι το κλίνκερ έρχεται σε επαφή με πολλά κινούμενα εξαρτήματα (εσχάρα, ράουλα). Επίσης υπάρχουν και πολλά ανοίγματα προς το περιβάλλον (πόρτες). Για τους λόγους αυτούς επιβάλλεται αξιόπιστη στεγανοποίηση του συγκροτήματος και επιμελημένη συντήρηση αυτού, για να αποφεύγεται η διαρροή του υλικού στο περιβάλλον.

4.2.9 Αποθήκευση κλίνκερ και πρώτων υλών.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα δημιουργούνται λόγω της αποθήκευσης του κύριου όγκου των υλικών που διαχειρίζεται μια βιομηχανία τσιμέντου (εκτός της φαρίνας) υπαίθρια. Χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές απόθεσης και απόληψης των σωρών, οριοθέτηση των χώρων με αναχώματα, αντιανεμικά φράγματα ή δένδρα, ψεκασμός των υλικών, όπου αυτό είναι δυνατό, για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ριζική αντιμετώπιση των προβλημάτων προϋποθέτει τη χρήση κλειστών αποθηκευτικών χώρων, τάση που έχει επικρατήσει ειδικά για την αποθήκευση του κλίνκερ.

4.2.10 Αποθήκευση και διάθεση τσιμέντου.

Η αποθήκευση του τσιμέντου γίνεται σε σιλό κυλινδρικού σχήματος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (εκπομπές σκόνης) κατά την φόρτωση και εκφόρτωση του σιλό αποφεύγονται με απόλυτη στεγανότητα τόσο στον πυθμένα όσο και στην οροφή του σιλό, όπως και με συστηματικό έλεγχο και συντήρηση των συστημάτων αερισμού και εκκένωσης.

4.2.11 Μέσα μεταφοράς.

Τα μέσα μεταφοράς υλικών στη βιομηχανία τσιμέντου είναι οι κοχλιοφόροι μεταφορείς, οι μεταφορικές ταινίες, οι πνευματικοί μεταφορείς (αερογλυσιέρες), τα αναβατόρια και οι καδομεταφορείς. Λαμβάνονται γενικά μέτρα για την αποφυγή εκπομπών σκόνης, όπως η έμμεση αποκονίωση μέσω του συστήματος που τροφοδοτεί η μεταφορική διάταξη, ο έλεγχος της στεγανότητας των μεταφορικών συστημάτων, η χρήση κατάλληλων διατάξεων φόρτωσης.

4.3 ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Τα παλαιότερα χρόνια, μικρής κλίμακας εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα θεωρούνταν ακίνδυνες από τους εκάστοτε υπεύθυνους μιας βιομηχανικής εγκατάστασης, και η εύρεση λύσης σε τέτοιου είδους προβλήματα δεν ήταν από τις πρώτες προτεραιότητες τους. Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της κοινή γνώμης για περιβαλλοντικά προβλήματα έχει ενταθεί.

Περαιτέρω ώθηση έχει δοθεί από τις νέες διαρκώς αυστηρότερες νομοθεσίες σε θέματα περιβάλλοντος και δημόσιας υγιεινής. Σε ότι αφορά τη βιομηχανία τσιμέντου, η ΕΡΑ (Environmental Protection Agency) έχει θέσει όρια εκπομπών τόσο για τις νέες όσο και για τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις, στα οποία περιλαμβάνονται οι εκπομπές από τις καμίνους, τα ψυγεία κλίνκερ, τα συστήματα μεταφοράς και αποθήκευσης, τα συστήματα συσκευασίας και φόρτωσης του τελικού προϊόντος, καθώς και για κάθε άλλη πιθανή πηγή εκπομπών στα όρια της τσιμεντοβιομηχανίας.

Σε μια εγκατάσταση παραγωγής τσιμέντου τα σημεία συνεχούς μέτρησης των εκπομπών σκόνης διαιρούνται σε τέσσερις τομείς :

- Σύστημα καμίνου εφοδιασμένο με σύστημα μέτρησης τόσο της σκόνης όσο και των αέριων ρύπων (όπως SO₂,NO_x).
- Εγκατάσταση αποκονίωσης των αερίων του ψυγείου κλίνκερ, εφοδιασμένη με σύστημα μέτρησης εκπομπής σκόνης.
- Εγκαταστάσεις άλεσης (οι μονάδες άλεσης των πρώτων υλών, του τσιμέντου και του άνθρακα), εφοδιασμένες και αυτές μόνο με σύστημα μέτρησης των εκπομπών σκόνης.
- Διατάξεις αποκονίωσης των μηχανημάτων μηχανικής ή πνευματικής μεταφοράς υλικών, των σιλό καθώς και των θραυστήρων.

Επιπλέον υπάρχουν κάποιες ειδικές περιπτώσεις, που απαιτούν τη χρήση συστήματος μέτρησης των εκπομπών σκόνης, όπως η λειτουργία ανοικτών αποθηκευτικών χώρων για τις πρώτες ύλες και το κλίνκερ.

Πίνακας 4.4 Διαχρονική εξέλιξη εκπομπών σκόνης στην βιομηχανία τσιμέντου (ιστορικό στοιχείο).

Διάταξη	Εκπομπές σκόνης (mg/m ³)				
	Χρονική περίοδος				
	1967	1974	1979	1998	2005
Περιστ.κάμιнос	460	460-230	100	50	30-50
Μύλοι	460	230	150	50	
Ψυγεία κλίνκερ	460	230	150	100	

Στην Ελλάδα απαιτείται η συνεχείς μέτρηση των εκπομπών σκόνης από τις καμίνους. Επίσης, μετρήσεις των εκπομπών σκόνης (όχι συνεχείς) απαιτούνται για τους μύλους των πρώτων υλών, τους μύλους άνθρακα, τα ψυγεία κλίνκερ και του μύλους τσιμέντου. Καθορίζεται ότι οι μετρήσεις πρέπει να εκτελούνται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Τακτικοί έλεγχοι των εκπομπών των εγκαταστάσεων πραγματοποιούνται από τις περιφερειακές αρχές. Από τις υπόλοιπες χώρες της ΕΕ μόνο στην Γερμανία τα ισχύοντα όρια εκπομπών είναι συνδυασμένα με αυστηρά καθορισμένα προγράμματα εκτίμησης των εκπομπών. Οι σχετικές πηγές εκπομπών σκόνης στην βιομηχανία τσιμέντου όπως

αναφέρθηκε παραπάνω είναι η κάμινος, τα ψυγεία κλίνκερ και οι μύλοι. Στις καμίνοους επιβάλλεται συνεχής μέτρηση των εκπομπών σκόνης. Στα ψυγεία κλίνκερ και στους μύλους ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στο ρυθμό ροής της σκόνης. Για ρυθμούς μικρότερους από 2 kg/h δεν απαιτείται συνεχής μέτρηση των εκπομπών σκόνης. Για ρυθμούς 2 και 5 kg/h η μέτρηση της αδιαφάνειας είναι επαρκής, ενώ για ρύπους ροής πάνω από 5 kg/h απαιτείται συνεχής μέτρηση της σκόνης. Τα αποτελέσματα των συνεχών μετρήσεων πρέπει να εκτιμούνται αδιάκοπα μέσω ειδικά προγραμματισμένων Η/Υ σε συμφωνία με τις αυστηρά διατυπωμένες οδηγίες που εκδίδονται από διάφορους οργανισμούς. Ο εξοπλισμός ελέγχου των εκπομπών πρέπει να επιθεωρείται μια φορά το χρόνο, ώστε να διαπιστώνεται η αποτελεσματική λειτουργία του και να αξιολογείται κάθε πέντε χρόνια.

4.4 ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 89/106, από 01/04/01 τα τσιμέντα που κυκλοφορούν σε όλα τα κράτη μέλη πρέπει να είναι πιστοποιημένα, να φέρουν σήμανση CE και να είναι σύμφωνα με τα ισχύοντα Ευρωπαϊκά Πρότυπα,

EN 197-1 : Τσιμέντο Μέρος - 1 : "Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα" και

EN 197-2 : Τσιμέντο Μέρος - 2 : "Αξιολόγηση συμμόρφωσης"

Στη χώρα μας ισχύουν τα αντίστοιχα Ελληνικά Πρότυπα **ΕΛΟΤ EN 197-1** και **ΕΛΟΤ EN 197-2**

ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ - ΣΤΟΧΟΙ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Το τσιμέντο, βάσει της παραπάνω Οδηγίας, πρέπει να πληροί ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις, όσον αφορά τις ιδιότητές του και τη σταθερότητα παραγωγής του.

Στην σύνταξη των εν λόγω προτύπων συμπεριελήφθησαν και κωδικοποιήθηκαν όλα τα κοινής αποδοχής και ευρείας χρήσης τσιμέντα, που παράγονται στις χώρες μέλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοινής ορολογίας για όλους τους μελετητές - χρήστες - κατασκευαστές δομικών έργων της ΕΕ.

Η ποιότητα του τσιμέντου πιστοποιείται στο αυστηρότερο επίπεδο αξιολόγησης συμμόρφωσης, με εξωτερική δειγματοληψία, από ανεξάρτητο αναγνωρισμένο φορέα πιστοποίησης.

ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ

Για την παραγωγή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες αλλά και υλικά υποκατάστασης (ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα - πυριτική ή ασβεστολιθική, σκωρία υψικαμίνου κλπ.) που απαντούν σε κάθε χώρα. Με βάση τη διαθεσιμότητα των υλικών αλλά και τις απαιτήσεις των εφαρμογών, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, τσιμέντο με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, ασβεστόλιθο, πυριτική παιπάλη κλπ., τα οποία περιλαμβάνονται στο πρότυπο (Πίνακας 2). Προβλέπονται συνολικά 27 τύποι τσιμέντων τα οποία όμως δεν παράγονται ή δεν κυκλοφορούν κατ' ανάγκη σε κάθε χώρα μέλος, λόγω των ιδιαιτεροτήτων που προαναφέρθηκαν. Δεν είχαν περιληφθεί μέχρι σήμερα τσιμέντα ανθεκτικά στα θειικά (για

τα οποία παρέμενε σε ισχύ το ΠΔ 244/80), τα οποία όμως προστέθηκαν στην τελευταία αναθεώρηση του Προτύπου του 2011 σε 7 συνολικά τύπους.

Το πρότυπο EN 197-1 προδιαγράφει σε γενική μορφή τους εξής τύπους τσιμέντου :

Πίνακας 1: Βασικοί τύποι τσιμέντου

ΤΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο

Το είδος και το ποσοστό των συστατικών του τσιμέντου, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, σύμφωνα με το πρότυπο, καθορίζουν τους τύπους και τα 27 προϊόντα τσιμέντου που αναλυτικά αναφέρονται στον **Πίνακα 2**.

Επίσης προδιαγράφονται και 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες κατατάσσονται τα τσιμέντα, ανάλογα με την αντοχή σε θλίψη τσιμεντοκονιάματος, σύμφωνα με το πρότυπο **ΕΛΟΤ EN 196-1 Μέθοδοι δοκιμών τσιμέντου - Μέρος 1 : Προσδιορισμός αντοχών**.

Κάθε κατηγορία ορίζεται από ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής των 28 ημερών χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη κατηγορία. Κάθε μία από τις παραπάνω περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες ανάλογα με τον χρόνο ανάπτυξης της αντοχής : Κανονική (**N**) ή Ταχεία (**R**). (*Πίνακας 3*)

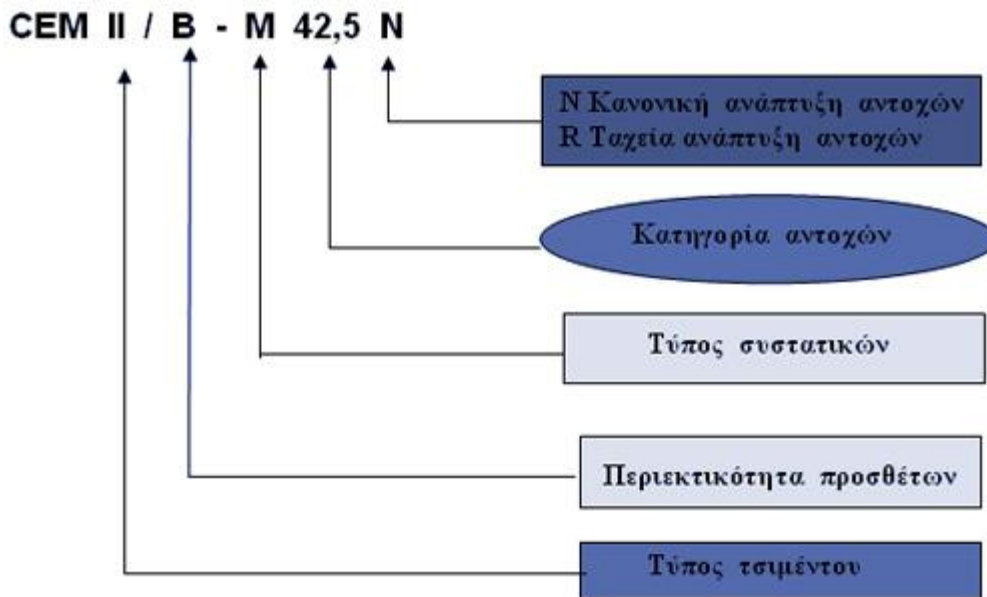
Πίνακας 3: Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή στη θλίψη MPa			Αρχικός χρόνος πήξης	Διόγκωση (Διαστολή)
	Αρχική αντοχή	Τυπική αντοχή			
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	Min	mm
32,5 N	-	≥ 16.0	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10.0	-			
42,5 N	≥ 10.0	-	≥ 42,5 ≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20.0	-			
52,5 N	≥ 20.0	-	≥ 52,5 -	≥ 45	
52,5 R	≥ 30.0	-			

Η συμμόρφωση των τσιμέντων ως προς τα όρια αντοχών είναι στατιστική και περιγράφεται στο πρότυπο.

Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, καθορίζεται από:

- τον κύριο τύπο τσιμέντου,
- το ποσοστό clinker,
- τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού,
- την κατηγορία αντοχής,
- το επίπεδο της πρώιμης αντοχής, όπως παραστατικά φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Ονοματολογία Τσιμέντων ΕΛΟΤ EN 197-1

ΑΝΑΓΡΑΦΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟΥΣ ΣΑΚΟΥΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό Τσιμέντου που εφαρμόστηκε στη χώρα μας την 1/4/2002 στους σάκους τσιμέντου πρέπει να αναγράφονται διάφορα στοιχεία που αφορούν το περιεχόμενο τσιμέντο, καθώς και οδηγίες προφύλαξης κατά τη χρήση του.

Τα στοιχεία που πρέπει να αναγράφονται είν

1. Η σήμανση συμμόρφωσης CE
2. Ο αριθμός αναγνώρισης του φορέα πιστοποίησης
3. Επωνυμία ή διακριτικό σήμα παραγωγού
4. Ονομασία ή διακριτικό σήμα εργοστασίου όπου παράχθηκε το τσιμέντο
5. Τα δύο τελευταία ψηφία του έτους κατά το οποίο τοποθετήθηκε η σήμανση στο σάκο
- 6.
7. Αριθμός του πιστοποιητικού συμμόρφωσης της ΕΕ
8. Ονομασία προτύπου σύμφωνα με το οποίο έγινε η παραγωγή, δηλ. EN 197-1
9. Τύπος τσιμέντου και κατηγορία αντοχής όπως ορίζεται στο EN 197-1
10. Πρόσθετες πληροφορίες αν απαιτούνται

11. Επισημάνσεις και οδηγίες ασφαλείας:

Σύμβολο	Περιγραφή
Xi	Ερεθιστικό
R 36/37/38	Ερεθίζει τα μάτια, το αναπνευστικό και το δέρμα
R43	Μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό σε επαφή με το δέρμα
S 2	Μακριά από παιδιά
S 22	Μην αναπνέετε την σκόνη
R 24/25	Αποφύγετε την επαφή με δέρμα και τα μάτια
S 26	Σε περίπτωση επαφής με τα μάτια πλύνετε τα αμέσως και ζητήστε ιατρική συμβουλή
S37	Να φοράτε τα κατάλληλα γάντια

Τα οφέλη που προκύπτουν για τον καταναλωτή :

Σημεία (1)-(2): Ο καταναλωτής θα γνωρίζει από ποιον φορέα της Ελλάδας ή του εξωτερικού είναι πιστοποιημένο με σήμα ποιότητας CE το τσιμέντο. Σύμφωνα με τον κανονισμό τσιμέντου είναι υποχρεωτική η λήψη Σήματος Ποιότητας CE για να πωλείται το τσιμέντο στην αγορά της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Σημεία (3)-(4): Γνωρίζει πλέον ο καταναλωτής όχι μόνο από ποια εταιρεία αγοράζει το προϊόν αλλά και από αλλά και από ποια μονάδα παραγωγής της.

Σημείο (5): Γνωρίζει το έτος κατά το οποίο το τσιμέντο σακκεύτηκε.

Σημείο (8): Όσον αφορά τον τύπο τσιμέντου αναφέρονται πλέον στην ονομασία και τα επιπλέον κύρια συστατικά εκτός του κλίνκερ. Έτσι ο καταναλωτής έχει πληρέστερα στοιχεία για την σύσταση του τσιμέντου που αγόρασε και για την ποιότητα του. Επιπλέον η κατηγορία αντοχής αναφέρεται στο κάτω όριο αντοχής και όχι στον μέσο όρο. Υπάρχει έτσι σημαντικότερη διασφάλιση όσον αφορά την αντοχή προϊόντος.

Σημείο(9) : Πιθανόν αναφέρονται επιπλέον χρήσιμα στοιχεία για ειδικές κατασκευές.

Σημείο(10) : Προειδοποιείται ο καταναλωτής για πιθανά προβλήματα κατά την χρήση του τσιμέντου και για τους τρόπους προφύλαξης.

4.4.1 Θεσμικό πλαίσιο για τη διακίνηση του τσιμέντου.

Σύμφωνα με όσα ορίζονται στην εθνική νομοθεσία, η διακίνηση στην Ελλάδα χύδην τσιμέντου ή σε σάκους, είτε παράγεται σε κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και διακινείται από άλλους φορείς εκτός των παραγωγών του είτε παράγεται σε τρίτες χώρες, γίνεται από κέντρα διανομής, τα οποία είναι εγκατεστημένα στην Ελλάδα. Ειδικά για τα τσιμέντα που παράγονται σε τρίτες χώρες, ο έλεγχος της συνδρομής των προϋποθέσεων διακίνησης τσιμέντου γίνεται πριν από την εισαγωγή του φορτίου τσιμέντου στην χώρα. Για τη διακίνηση τσιμέντου συσκευασμένου σε απλούς σάκους, δεν απαιτείται κέντρο διανομής αλλά αρκεί αποθηκευτικός χώρος.

Το χύδην τσιμέντο, το οποίο διακινείται διά θαλάσσης, μεταφέρεται κυρίως με ειδικά τσιμεντοφόρα πλοία (καλούμενα ως πνευματικά αυτοεκφορτώμενα πλοία), τα οποία διαθέτουν ειδικό εξοπλισμό έτσι ώστε να διασφαλίζεται η διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του τσιμέντου και η ασφαλής και περιβαλλοντικά ορθή διακίνηση. Σε περιπτώσεις που το πλοίο μεταφοράς είναι συμβατικό ξηρού φορτίου, τότε για την εκφόρτωση του χύδην τσιμέντου απαιτείται σχετικός εξοπλισμός, ο οποίος όμως κατά τη διεθνή πρακτική, δεν συνηθίζεται να αποτελεί εξοπλισμό του λιμανιού αλλά ευθύνη των διενεργούντων τη μεταφορά, οι οποίοι θα πρέπει να εφοδιαστούν με τον κατάλληλο κινητό εξοπλισμό εκφόρτωσης. Η μεταφορά του χύδην τσιμέντου στην ξηρά γίνεται με ειδικά σιλοφόρα οχήματα, τα οποία διαθέτουν καθαρούς, υδατοστεγείς και σφραγισμένους χώρους προκειμένου να παρέχουν πλήρη προστασία από την υγρασία. Για τη μεταφορά τσιμέντου σε μεγασάκκο δεν απαιτείται ειδική υποδομή. Ωστόσο, και η μεταφορά του τσιμέντου σε σάκους θα πρέπει να εξασφαλίζει εξίσου αποτελεσματικά την προστασία του τσιμέντου από την υγρασία, χωρίς ωστόσο να απαιτείται ειδικό όχημα.

4.4.2 Θεσμικό πλαίσιο για την ίδρυση και τη λειτουργία του κέντρου διανομής.

Η σχετική νομοθεσία καθορίζει τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για την ίδρυση και λειτουργία κέντρων διανομής τσιμέντου, προκειμένου να διασφαλίζεται η διατήρηση της ποιότητας, της ταυτότητας, της σύνθεσης, των ιδιοτήτων και της συμμόρφωσης των ήδη πιστοποιημένων από τον παραγωγό τσιμέντων, που παραλαμβάνονται από τους ενδιάμεσους, αποθηκεύονται και διακινούνται από τα κέντρα διανομής, καθώς και η ορθή χρήση της σήμανσης συμμόρφωσης CE που φέρει το ήδη πιστοποιημένο τσιμέντο. Ειδικότερα, τα κέντρα διανομής πρέπει να πληρούν τις προϋποθέσεις που ορίζουν ο Ν. 3325/200547, ο Ν. 3982/201148, ο Ν. 4014/201149 και οι κατ' εξουσιοδότηση εκδοθείσες νομοθετικές διατάξεις, καθώς και τις απαιτήσεις που προβλέπονται στο άρθρο 9 του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-2 και στον Ειδικό Κανονισμό Ελέγχου Κέντρων Διανομής Τσιμέντου για τη διασφάλιση της ποιότητας, της ταυτότητας και της συμμόρφωσης των πιστοποιημένων τσιμέντων. Βάσει της προαναφερόμενης νομοθεσίας, για τη λειτουργία τους απαιτείται η έκδοση άδειας εγκατάστασης και λειτουργίας, η οποία κατά περίπτωση εκδίδεται είτε με κατάθεση προηγούμενης αίτησης από τον ενδιαφερόμενο είτε με τη διαδικασία της αναγγελίας, που συνοδεύεται από εγγυητική επιστολή σημαντικού ύψους. Τα κέντρα διανομής τσιμέντου πρέπει να έχουν ικανή χωρητικότητα, ώστε να εξασφαλίζουν τη

δυνατότητα παραλαβής του συνόλου των διακινούμενων ποσοτήτων με το ίδιο μεταφορικό μέσο, και χωριστούς χώρους παραλαβής και αποθήκευσης διαφορετικών τύπων τσιμέντων.

Η συμμόρφωση του κέντρου διανομής τσιμέντων με τις απαιτήσεις της σχετικής νομοθεσίας αποδεικνύεται με Βεβαίωση Συμμόρφωσης Κέντρου Διανομής Τσιμέντου, η οποία χορηγείται από την αρμόδια υπηρεσία του Υπουργείου Ανάπτυξης και Ανταγωνιστικότητας, αφού προηγηθεί απόφαση έγκρισης περιβαλλοντικών όρων από το Γενικό Γραμματέα της Αποκεντρωμένης Διοίκησης και σχετική βεβαίωση της ΕΒΕΤΑΜ (πρώην ΕΛΟΤ). Σχετικά με τα ανωτέρω, θα πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των κέντρων διανομής, τα οποία λειτουργούν ενδιάμεσοι, και των αποθηκών, οι οποίες λειτουργούν υπό εγχώριους παραγωγούς για τη διακίνηση των παραγόμενων από τους ίδιους τσιμέντων. Η συμμόρφωση μιας τέτοιας αποθήκης προς τις απαιτήσεις της σχετικής νομοθεσίας περί σήμανσης CE εμπίπτει στο σύστημα ελέγχου και αξιολόγησης της συμμόρφωσης και πιστοποίησης που εφαρμόζεται υποχρεωτικά από τον παραγωγό για όλους τους τύπους τσιμέντου που παράγει ο ίδιος. Σε περίπτωση που μέσω μιας αποθήκης διακινηθούν και τσιμέντα παραγωγών από τρίτες χώρες ή από κράτη μέλη, θα πρέπει να χορηγηθεί άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας κέντρου διανομής κατά ενιαίο τρόπο, ως επέκταση της δραστηριότητας για όλη την εγκατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση, ο εγχώριος παραγωγός δρα ως ενδιάμεσος ως προς το τσιμέντο που παραλαμβάνει και διακινεί από τρίτες χώρες ή από παραγωγούς κρατών μελών, εμπίπτει στην αντίστοιχη νομοθεσία και αναλαμβάνει την πλήρη ευθύνη για τη διατήρηση της ποιότητας του τσιμέντου που διακινεί. Αντίστοιχα, εταιρίες οι οποίες δραστηριοποιούνται στην παραγωγή σκυροδέματος ή την κατασκευή δομικών υλικών, οι οποίες έχουν ήδη άδεια ίδρυσης και λειτουργίας συγκεκριμένης παραγωγικής δραστηριότητας και είναι ήδη εφοδιασμένες με πιστοποιημένους αποθηκευτικούς χώρους προκειμένου να αποθηκεύουν το τσιμέντο το οποίο προμηθεύονται από τους εγχώριους παραγωγούς για ίδια χρήση (παρασκευή των προϊόντων τους), υποχρεούνται, σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία είτε να χρησιμοποιήσουν ένα κέντρο διανομής τρίτου, είτε να εφοδιαστούν με άδεια ίδρυσης κέντρου διανομής είτε να τροποποιήσουν την υφιστάμενη άδειά τους προκειμένου να προμηθευτούν χύδην τσιμέντο από μη παραγωγούς κρατών μελών και ή παραγωγούς τρίτων χωρών, ακόμα και αν το προμηθεύονται για ίδια χρήση.

4.4.3 Θεσμικό πλαίσιο για τον έλεγχο του τσιμέντου.

Προκειμένου το τσιμέντο να θεωρείται κατάλληλο προς χρήση πρέπει να φέρει τη σήμανση CE, η οποία υποδηλώνει ότι το προϊόν πληροί το σύνολο των διατάξεων του Κανονισμού 305/2011 και του Π.Δ. 334/199459.

Σύμφωνα με τον Κανονισμό, όλοι οι οικονομικοί φορείς που παρεμβαίνουν στην αλυσίδα προσφοράς και διανομής θα πρέπει να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα για να διασφαλίσουν ότι καθιστούν διαθέσιμα στην αγορά μόνο προϊόντα του τομέα δομικών κατασκευών, τα οποία ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του προς το σκοπό της εγγύησης της απόδοσης των προϊόντων του τομέα των δομικών κατασκευών, συμπεριλαμβανομένου και του τσιμέντου και της εκπλήρωσης των βασικών απαιτήσεων των δομικών κατασκευών.

Σύμφωνα με τις σχετικές ρυθμίσεις του Κανονισμού, κατ' αρχήν υπεύθυνος για τη βεβαίωση ότι το τσιμέντο συμφωνεί με τις τεχνικές προδιαγραφές που ορίζονται στην ως άνω νομοθεσία είναι ο κατασκευαστής/ παραγωγός, ο οποίος πρέπει να καταρτίσει δήλωση απόδοσης/επιδόσεων, ενώ παράλληλα αναγνωρισμένος φορέας πιστοποίησης εκδίδει πιστοποιητικό σταθερότητας της απόδοσης του προϊόντος. Η σήμανση CE τοποθετείται στο τσιμέντο, προτού διατεθεί το προϊόν στην αγορά και εφόσον ο κατασκευαστής έχει καταρτίσει δήλωση απόδοσης και έχει εκδοθεί το σχετικό πιστοποιητικό σταθερότητας. Η επίθεση της σήμανσης CE καταδεικνύει ότι το τσιμέντο καλύπτεται από σχετικό εναρμονισμένο πρότυπο ή ανταποκρίνεται προς σχετική ευρωπαϊκή τεχνική αξιολόγηση και

ότι έτυχε εφαρμογής το σύστημα αξιολόγησης και επαλήθευσης της σταθερότητας της απόδοσης του τσιμέντου που όρισε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Επιπλέον, επί της συσκευασίας ή των παραστατικών πρέπει να καταχωρούνται οι προβλεπόμενες επισημάνσεις για τον έλεγχο ορθής ταξινόμησης και συσκευασίας επικίνδυνων χημικών ουσιών σύμφωνα με τον Κανονισμό 1907/2006/ΕΚ. Το τσιμέντο που φέρει τη σήμανση CE κυκλοφορεί και διατίθεται ελεύθερο στην αγορά, όταν οι δηλωθείσες αποδόσεις αντιστοιχούν στις απαιτήσεις για τη χρήση αυτή στο συγκεκριμένο κράτος μέλος.

Οι εισαγωγείς τσιμέντου, πριν διαθέσουν το προϊόν στην αγορά, οφείλουν να εξασφαλίσουν, μεταξύ άλλων, ότι (α) έχει διενεργηθεί από τον κατασκευαστή η αξιολόγηση και επαλήθευση της σταθερότητας της απόδοσης, (β) έχει καταρτισθεί από τον κατασκευαστή η τεχνική τεκμηρίωση και η δήλωση απόδοσης και (γ) ότι το προϊόν φέρει τη σήμανση CE. Εφόσον ο εισαγωγέας θεωρεί ότι το τσιμέντο δεν πληροί τις ανωτέρω προδιαγραφές, οφείλει να μην διαθέσει το προϊόν στην αγορά, μέχρις ότου αυτό συμφωνεί με τη δήλωση απόδοσης του κατασκευαστή και τις λοιπές διατάξεις περί δομικών προϊόντων. Δοκιμές με δειγματοληψία διενεργούν οι εισαγωγείς για το τσιμέντο που έχει τοποθετηθεί ή καταστεί διαθέσιμο στην αγορά, και εφόσον κρίνεται σκόπιμο για την εξασφάλιση της ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της σταθερότητας της δηλωθείσας απόδοσης του τσιμέντου. Αντίστοιχες είναι και οι υποχρεώσεις του διανομέα.

Επιπροσθέτως, όλοι οι φορείς στην αλυσίδα προσφοράς και διανομής του τσιμέντου, όταν το προϊόν είναι υπό την ευθύνη τους, πρέπει να διασφαλίζουν ότι οι συνθήκες αποθήκευσης και μεταφοράς του δεν θέτουν σε κίνδυνο τη συμμόρφωση του προϊόντος με την σήμανση CE, με τη δήλωση απόδοσης του κατασκευαστή και με τις λοιπές διατάξεις περί δομικών προϊόντων. Για το λόγο αυτό σύμφωνα με σχετική πρόβλεψη στα άρθρα 13 παρ. 5 και 14 παρ. 3 του Κανονισμού, η ανωτέρω υποχρέωση βαρύνει ρητά τους εισαγωγείς και τους διανομείς.

Βάσει των εθνικών προβλέψεων, για κάθε πιστοποιημένο τσιμέντο, ο ενδιάμεσος ενός κέντρου διανομής πρέπει να διεξάγει δοκιμές αυτοελέγχου επιβεβαίωσης σε δείγματα προκειμένου να επαληθεύει ότι το πιστοποιημένο τσιμέντο διατηρεί τις ιδιότητές του. Οι δοκιμές αυτοελέγχου μπορούν να διεξαχθούν στο εργαστήριο του ενδιάμεσου ή σε εξωτερικό εργαστήριο. Πέραν των δοκιμών αυτοελέγχου, ο κοινοποιημένος οργανισμός πιστοποίησης διεξάγει μια αρχική επιθεώρηση και κατόπιν περιοδικά αξιολόγηση και επιτήρηση των μέτρων για τη διατήρηση από τον ενδιάμεσο της ποιότητας του πιστοποιημένου τσιμέντου. Ο κοινοποιημένος οργανισμός πιστοποίησης ελέγχει, επίσης, τουλάχιστον δύο φορές ετησίως τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτοελέγχου επιβεβαίωσης. Κάθε νέος τύπος τσιμέντου ο οποίος εισέρχεται σε ένα κέντρο διανομής ή ίδιος τύπος τσιμέντου από διαφορετικό όμως εργοστάσιο παραγωγής ελέγχεται εκ νέου από τον οργανισμό πιστοποίησης. Η δειγματοληψία του τσιμέντου για τον έλεγχο δύναται να γίνει επάνω στο μέσο μεταφοράς ή στη θέση αποθήκευσης. Στην περίπτωση, δε, εργοστασίου παραγωγής ο έλεγχος γίνεται στη θέση φόρτωσης, επάνω στο μέσο μεταφοράς. Ο έλεγχος της ποιότητας τελικής αντοχής γίνεται το αργότερο εντός τεσσάρων εβδομάδων από τη λήψη του δείγματος και δύναται να διενεργείται από τους κοινοποιημένους φορείς, ενώ μόλις ολοκληρωθεί ο αρχικός έλεγχος για την πρώτη αντοχή και ο ενδιάμεσος λάβει τα αποτελέσματα μπορεί να αποδεσμεύσει το προϊόν και να προχωρήσει στην πώλησή του με ελεγχόμενο τρόπο, μέχρις ότου λάβει και τα αποτελέσματα της τελικής αντοχής.

Οι απλοί σάκοι τσιμέντου που προέρχονται από κράτη – μέλη της ΕΕ, εφόσον είναι πιστοποιημένοι και φέρουν την σήμανση CE, κυκλοφορούν και διατίθενται ελεύθερα στην αγορά, χωρίς να υφίσταται υποχρέωση επανελέγχου τους ως προς την ποιότητά τους και τα χαρακτηριστικά τους. Έλεγχοι δύναται να διενεργηθούν από τις αρμόδιες υπηρεσίες στους αποθηκευτικούς χώρους του εργοστασίου ή εκτός αυτού, στα σημεία παράδοσης στα οποία παραδίδει το τσιμέντο ο παραγωγός ή ο κοινοποιημένος αντιπρόσωπός του.

Σύμφωνα με την νομοθεσία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) και από το Παράρτημα 1 του (ΦΕΚ125/Α/5-6-2002) εκφράζονται οι οριακές τιμές για το διοξείδιο του θείου (SO₂), καθώς και για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και οξείδια του αζώτου (NO_x).

Πίνακας 4.5: Οριακές τιμές διοξείδιο του θείου

	Περίοδος αναφοράς	Οριακή τιμή	Περιθώριο ανοχής	Προθεσμία συμμόρφωσης προς την οριακή τιμή.
Ωριαία οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας.	1 ώρα	350μg/m ³ των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 24 φορές ανά ημερολογιακό έτος.	150μg/m ³ (43%) κατά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας μειούμενο από 1 ^{ης} Ιανουαρίου 2001 και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσο ετήσιο ποσοστό ώστε να φτάσει το 0% την 1 ^η Ιανουαρίου 2005	1 ^η Ιανουαρίου 2005
Ημερήσια οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινη υγείας.	24 ώρες	125μg/m ³ των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 3 φορές ανά ημερολογιακό έτος.	Κανένα	1 ^η Ιανουαρίου 2005
Οριακή τιμή για την προστασία των οικοσυστημάτων.	Ημερολογιακό έτος χειμώνας (1 Οκτωμβρίου έως 31 Μαρτίου)	20μg/m ³	Κανένα	19 Ιουλίου 2001

Πίνακας 4.6: Οριακές τιμές διοξειδίου του αζώτου

	Περίοδος αναφοράς	Οριακή τιμή	Περιθώριο ανοχής	Προθεσμία συμπόρφωσης προς την οριακή τιμή.
Ωριαία οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας.	1 ώρα	200μg/m ³ NO ₂ των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 18 φορές ανά ημερολογιακό έτος.	50% κατά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας μειούμενο από 1 ^{ης} Ιανουαρίου 2001 και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσο ετήσιο ποσοστό ώστε να φτάσει το 0% την 1 ^η Ιανουαρίου 2010	1 ^η Ιανουαρίου 2010
Ετήσια οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινη υγείας.	Ημερολογιακό έτος.	40μg/m ³ NO ₂ .	50% κατά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας μειούμενο από 1 ^{ης} Ιανουαρίου 2001 και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσο ετήσιο ποσοστό ώστε να φτάσει το 0% την 1 ^η Ιανουαρίου 2010	1 ^η Ιανουαρίου 2010
Ετήσια οριακή τιμή για την προστασία της βλάστησης.	Ημερολογιακό έτος .	30μg/m ³ NO _x	Κανένα	19 Ιουλίου 2001

Σύμφωνα με την νομοθεσία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) και από τον Πίνακα Α4 του (ΦΕΚ 1634/Β'/14.8.2008) εκφράζονται οι οριακές τιμές για το διοξείδιο του θείου (SO₂), καθώς και για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και οξείδια του αζώτου (NO_x).

Πίνακας 4.7: Προσδιορισμός των απαραίτητων μειώσεων εκπομπών για επίτευξη στόχων.

Παράμετρος	Περίοδος εφαρμογής	Εκπομπές (t/y)		
		SO ₂	NO _x	Κονιορτός
Τελευταίες εκπομπές των εγκαταστάσεων που συμμετέχουν στο Εθνικό Σχέδιο Μείωσης Εκπομπών (ΕΣΜΕ) .		264.410	68.140	34.635
Ελάχιστα επίπεδα μείωσης των ετησίων εκπομπών που πρέπει να επιτευχθούν σε χέση με τις τελευταίες εκπομπές, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι	Από 1/01/2008 έως 31/12/2015	159.020	23.980	16.584
	Από 1/01/2016 έως 31/12/2017	159.020	23.360	16.584
	Από 1/01/2018	159.020	23.360	16.584
Στόχοι εκπομπών	Από 1/01/2008 έως 31/12/2015	105.390	92.120	18.051
	Από 1/01/2016 έως 31/12/2017	105.390	44.780	18.051
	Από 1/01/2018	105.390	44.780	18.051

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ανδρίτσος, Ν. «Εισαγωγή στις τεχνολογίες ελέγχου αέριας ρύπανσης», Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
2. Ανδρίτσος, Ν. «Ελεγχος σωματιδιακών εκπομπών - Κυκλώνες», Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
3. Ανδρίτσος, Ν. «2^η ΕΝΟΤΗΤΑ, Μέρος 4, Επιλογή συλλέκτη», Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
4. Ανδρίτσος, Ν. «2^η ΕΝΟΤΗΤΑ, Μέρος 2, Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές», Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
5. Ανδρίτσος, Ν. «2^η ΕΝΟΤΗΤΑ, Μέρος 3, Σακόφιλτρα », Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
6. Γκούντρα, Κ., Ρέλλα, Π., Συμεωνίδη, Κ. & Χαλκίδη, Δ. ([χ.χ.]). *Η ρύπανση του περιβάλλοντος και η προστασία του*. [χ.τ.]: [χ.ε.].
7. Κατσιάμπουλας, Α. Προϊστ. Υπ. Ποιοτικού Ελέγχου Εργοστασίου. Καμαρίου (TITAN), «Εναλλακτικά καύσιμα και πρώτες ύλες», Θεσσαλονίκη 2007.
8. Νικολάου, Κ. (2011). Τεχνολογία άλεσης: Κάθετοι μύλοι – Οριζόντιοι μύλοι. Παρουσιάστηκε στο Career Pre-Heater- TITAN.
9. Ξενίδης, Α. «Τεχνολογία επεξεργασίας αέριων αποβλήτων, Υπολογισμός κυκλώνων», Σημειώσεις, Ε .Μ .Πολυτεχνείο.
10. Ξενίδης, Α. «Τεχνολογία επεξεργασίας αέριων αποβλήτων, Ηλεκτροστατικά Φίλτρα », Σημειώσεις, Ε .Μ .Πολυτεχνείο.
11. Ξενίδης, Α. «ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ », Σημειώσεις, Ε .Μ .Πολυτεχνείο
12. Παρισάκης, Γ., Κασελούρη, Β., Τσίμας, Σ. & Φτίκος, Χ. (1981). *Χημεία και τεχνολογία τσιμέντου*. Αθήνα: [χ.ε.].
13. Τσακαλάκης, Κ. Γ., & Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Σ. Μ. (2010). Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος. *ΕΜΠ, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων–Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων*.
14. Τσακαλάκης, Κ.Γ., « Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος (2013) ».
15. Τσίμας, Σ., & Τσιβιλής, Σ. (2011). Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου. Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ.

16. Υ.Α. Η.Π. 33437/1904/Ε103/2008 (ΦΕΚ 1634/Β`/14.8.2008) Έγκριση Εθνικού Προγράμματος Μείωσης των Εκπομπών στην ατμόσφαιρα, ορισμένων ρύπων, από υφιστάμενες μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης, σύμφωνα με το άρθρο 4 (παραγ. Γ' εδ. 8) της υπ. αριθ. Η.Π. 29457/1511/2005.
17. Υ.Π.Ε.Κ.Α. (ΦΕΚ 308/Β, 2015) Γνωμοδότηση της Επιτροπής Ανταγωνισμού, βάσει του άρθρου 23 παρ. 1 του Ν. 3959/2011, με δική της πρωτοβουλία, επί του νομοθετικού πλαισίου που διέπει την παραγωγή, τον έλεγχο, την πιστοποίηση και την εμπορία στην αγορά τσιμέντου, χύδην και συσκευασμένου.
18. Υ.Π.Ε.Κ.Α. (ΦΕΚ125/Α/ 5-6-02) Εναρμόνιση της Οδηγίας 1999/30/ΕΚ για τις οριακές τιμές διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μολύβδου, στον αέρα του περιβάλλοντος.
19. Cooper C.D. & Alley F.C., «Έλεγχος Αέριας Ρύπανσης», Τρίτη Έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2004.
20. Duda, W. H. (1985). Cement-Data-Book, Volume 1, International Process Engineering in the Cement Industry. Bauverlag Gmbh.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- 21 <http://www.hcia.gr/el/> (Ένωση τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος).
- 22 <http://www.titan-cement.com> (Α.Ε. ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΤΙΤΑΝ).
- 23 <http://www.orykta.gr> (Ελληνική τσιμεντοβιομηχανία).
- 24 <http://old-2017.metal.ntua.gr> (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών)
- 25 <http://www.thecementgrindingoffice.com/> (Διαχωριστές)
- 26 https://en.wikipedia.org/wiki/Baghouse#Mechanical_shakers (Σακόφιλτρα)

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

1. <http://www.orykta.gr> (Εικόνα 1.1 ,1.2,1.3,1.9).
2. <http://www.thecementgrindingoffice.com/> (Εικόνα 2.4, 2.5, 2.6)
3. <http://old-2017.metal.ntua.gr/uploads/3298/467/katatmisi.pdf> (Εικόνα 1.4, 1.5).
4. <http://www.heidelbergcement.com> (Εικόνα 1.6).
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Cement_kiln (Εικόνα 1.8 ,1.11)
6. <http://www.flsmidth.com> (Εικόνα 1.12, 2.12, 2.13, 2.14)

7. <http://old-2017.metal.ntua.gr/uploads/4622/1124/course1.pdf> (Εικόνα 1.7,1.10).
8. ΜΟΥΡΙΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ (Εικόνα 2.1, 2.2, 2.8), λείψεις από το εργοστάσιο ΤΙΤΑΝ στην Ελευσίνα.
9. http://old2017.metal.ntua.gr/uploads/1432/Cement_Concrete_Notes_May_2010_v2.pdf (Εικόνα 2.3, 2.7)
10. http://www.cementkilns.co.uk/ck_rmp.html (Εικόνα 2.10)
11. <https://www.911metallurgist.com/blog/ball-mill-critical-speed> (Εικόνα 2.11).