

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ:
ΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΓΕΡΟΥΜΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΤΣΑΜΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
DR. ΒΑΡΒΑΡΑ ΣΥΓΓΟΥΝΗ**

ΠΑΤΡΑ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών και αναφέρεται στην Διαδικασία Παραγωγής του Τσιμέντου και στον ρόλο του Μηχανολόγου σ' αυτή. Το τσιμέντο ως γνωστό έχει μπει για τα καλά στην ζωή του ανθρώπου καθώς όπως γνωρίζουμε οι περισσότερες κατασκευές κτιρίων και έργων (πεζοδρόμια, λιμάνια) στηρίζονται στην παραγωγή αυτού.

Στην αρχή κάνουμε μια ιστορική αναφορά για το τσιμέντο. Στην συνέχεια αναφερόμαστε στα στάδια που ακολουθούνται για την διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου καθώς και στα μηχανήματα τα οποία λαμβάνουν μέρος. Ακόμα αναφερόμαστε στα μέτρα που παίρνουμε για την προστασία του περιβάλλοντος καθώς και στην παρασκευή διαφόρων ειδικών τσιμέντων όπως αποκαλούνται. Τέλος αναφερόμαστε στο ρόλο του Μηχανολόγου στην Διαδικασία Παραγωγής του Τσιμέντου.

Ευχαριστούμε θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μας κ. Dr Βαρβάρα Συγγούνη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας πρόσφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Γερόλυμος Γεώργιος

Τσάμης Γεώργιος

Σεπτέμβριος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία περιγράφει την Διαδικασία Παραγωγής του Τσιμέντου και τον ρόλο του Μηχανολόγου σ' αυτή.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε οκτώ κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στην ιστορία του τσιμέντου, στην λατόμευση των πρώτων υλών, στην προετοιμασία των πρώτων υλών και στην διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην θραύση των πρώτων υλών, στους θραυστήρες, στην προομογενοποίηση και ομογενοποίηση καθώς και στα μηχανήματα αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η άλεση της φαρίνας, οι τεχνικές και τα πλεονεκτήματα κάθε μίας, οι στόχοι που επιδιώκουμε από αυτή την διεργασία, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται στην άλεση της φαρίνας (μύλοι) καθώς και τα λειτουργικά στοιχεία αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η έψηση. Αναφερόμαστε στους στόχους της έψησης, στις αντιδράσεις που γίνονται κατά τις θερμοκρασιακές αλλαγές, στις αντιδράσεις κατά την ψύξη, στο κλίνκερ όπου είναι και η βασική μονάδα του τσιμέντου. Γίνεται αναφορά στους παράγοντες που επιδρούν στην εψισιμότητα, στην τεχνολογία έψησης, στις περιστροφικές καμίνους (λειτουργικά χαρακτηριστικά, πυρίμαχη επένδυση) και στα συστήματα ψύξης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η άλεση του τσιμέντου, περιγράφονται συνθήκες αποθήκευσης του τσιμέντου και τα μηχανήματα τα οποία γίνεται η άλεση (κυλινδροπρέσες). Ακόμα αναφερόμαστε στην επίδραση των κυλινδροπρεσών στην ποιότητα του προϊόντος, στα προβλήματα που δημιουργούνται στην παραγωγική διαδικασία από την χρήση αυτών, στους διαχωριστές και γίνεται σύγκριση με τα κλειστά κυκλώματα άλεσης.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της τσιμεντοβιομηχανίας και το καθεστώς εκπομπών σκόνης στην βιομηχανία τσιμέντου. Τέλος περιγράφονται και συγκρίνονται οι διατάξεις αποκονίωσης (Σακόφιλτρα, ηλεκτρόφιλτρα).

Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου

Στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα ειδικά τσιμέντα, οι διάφοροι τύποι ειδικών τσιμέντων και η χρήση τους.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο αναφερόμαστε στο ρόλο του Μηχανολόγου στη διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου. Γίνεται αναφορά στο που μπορεί να λάβει μέρος σε ένα τέτοιο εργοστάσιο.

Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία είναι ότι ο Μηχανολόγος είναι πολύ βασικός παράγοντας στην λειτουργία μιας τσιμεντοβιομηχανίας τόσο στην διαδικασία της παραγωγής όσο και στην συντήρηση των μηχανημάτων αυτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	vii
1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	1
1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ	1
1.2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΟΥ.....	5
1.3. Η ΛΑΤΟΜΕΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ	9
1.3.1. Γενικά κριτήρια επιλογής της τοποθεσίας του λατομείου.....	9
1.3.2. Η εκμετάλλευση του λατομείου.....	12
1.3.3. Η προετοιμασία του μείγματος πρώτων υλών	15
2. ΘΡΑΥΣΗ	17
2.1.ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΡΑΥΣΤΗΡΩΝ.....	17
2.2 ΛΟΓΟΣ ΣΜΙΚΡΥΝΣΗΣ	19
2.3 ΕΙΔΗ ΘΡΑΥΣΤΗΡΩΝ.....	20
2.4 ΠΡΟΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ.....	25
2.4.1 Θεωρία της προομογενοποίησης.....	26
2.4.2 Συστήματα προομογενοποίησης	28
2.4.3 Τεχνικές απόθεσης.....	29
2.4.4 Μηχανήματα προομογενοποίησης.....	31
2.4.5. Ομογενοποίηση	32
3. ΑΛΕΣΗ ΦΑΡΙΝΑΣ	35
3.1 Η ΑΛΕΣΗ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	35
3.2 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΛΕΣΗΣ	36

3.3 ΑΝΟΙΚΤΟ ΚΑΙ ΚΛΕΙΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....	38
3.4 ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟΙ	43
3.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟΥΣ ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟΥΣ	48
3.6 ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΩΝ.....	53
3.7 ΑΛΕΣΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ	56
3.8 ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΕΣ	62
3.9 ΆΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΥΛΩΝ. ΚΑΘΕΤΟΙ ΜΥΛΟΙ	65
3.10 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΑΛΕΣΗ ΤΗΣ ΦΑΡΙΝΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΛΙΝΚΕΡ	70
4. Η ΕΨΗΣΗ.....	73
4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΨΗΣΗ	73
4.2 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΨΗΣΗΣ.....	73
4.3. ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΨΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ.....	76
4.3.1 Αντιδράσεις κάτω των 1300°C	78
4.3.2 Αντιδράσεις στην περιοχή των 1300-1450°C	80
4.3.3 Αντιδράσεις κατά την ψύξη.....	81
4.4. ΚΛΙΝΚΕΡ: Η ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	82
4.4.1 Πυριτικό τριασβέστιο	83
4.4.2. Πυριτικό διασβέστιο	85
4.4.3. Αργιλικό τριασβέστιο	87
4.4.4. Σιδηραργιλικό τετρασβέστιο ή φάση του φερρίτη	88
4.5. ΕΨΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ	88
4.5.1. Παράγοντες που επιδρούν στην εψησιμότητα	88
4.5.2 Ποσοτική έκφραση της εψησιμότητας	92

4.6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΨΗΣΗΣ.....	94
4.6.1 Συστήματα έψησης	94
4.6.2. Λειτουργικά χαρακτηριστικά περιστροφικής καμίνου	99
4.6.3. Τα καύσιμα.....	101
4.6.4. Η πυρίμαχη επένδυση της περιστροφικής καμίνου.....	105
4.6.5 Συστήματα ψύξης.....	106
4.7. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΨΗΣΗΣ..	109
5. Η ΑΛΕΣΗ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	113
5.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΕΣΗ	113
5.2. ΟΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	113
5.3. ΚΥΛΙΝΔΡΟΠΡΕΣΕΣ	115
5.3.1. Κυκλώματα άλεσης με κυλινδρόπρεσα.....	117
5.3.2 Επίδραση της χρήσης κυλινδρόπρεσας στην παραγωγική διαδικασία και στην ποιότητα του προϊόντος	120
5.3.3 Προβλήματα από τη χρήση κυλινδρόπρεσας στην παραγωγική διαδικασία	122
5.4. ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	122
5.5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΑΛΕΣΗΣ	128
6. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	135
ΓΕΝΙΚΑ.....	135
6.1. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	135
6.2. ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ. ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	140
6.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ	144
6.3.1 Σακόφιλτρα	144

6.3.2 Ηλεκτρόφιτρα	148
6.3.3 Συγκριτική μελέτη σακόφιλτρων - ηλεκτρόφιλτρων	149
7. ΕΙΔΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ.....	153
7.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΕΙΔΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ	153
7.2. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΪΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ	153
7.3. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ	154
7.4. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΥΨΗΛΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ.....	154
7.5. ΛΕΥΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND	155
7.6 ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ.....	155
7.7. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ.....	156
7.7.1. Βελιτικά Τσιμέντα	157
7.7.2. Θειοασβεσταργυλικά Τσιμέντα.....	157
7.7.3. Αλινιτικά Τσιμέντα	158
7.8. ΤΣΙΜΕΝΤΑ OILWELL.....	158
8. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	161

1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Από τότε που ο άνθρωπος αποφάσισε να αφήσει τα φυσικά σημεία διαβίωσής του είχε το βασικό μέλημα να βρει και να χρησιμοποιήσει κατά το δυνατόν ανθεκτικότερα υλικά προκειμένου να κατασκευάσει τις κατοικίες που θα έμενε αυτός και η οικογένειά του. Από την αρχή επικέντρωσε τις προσπάθειές του στο να ανακαλύψει τα κατάλληλα υλικά που θα συνέδεαν τα δομικά στοιχεία, κυρίως λίθους, που χρησιμοποιούσε για την κατοικία του. Εδώ και 12 εκατομμύρια χρόνια κατά τη διάρκεια γεωλογικών μεταβολών πραγματοποιούνταν αντιδράσεις μεταξύ ασβεστόλιθου και αργίλου, που είχαν ως αποτέλεσμα το πρώτο φυσικό τσιμέντο. Περί το 3000 π.Χ. οι Αιγύπτιοι χρησιμοποίησαν μείγμα λάσπης με άχυρο προκειμένου να ενώσουν τούβλα της εποχής εκείνης, ενώ αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκαν κονιάματα με γύψο και ασβέστη στις πυραμίδες. Στην πόλη της Καμείρου στη Ρόδο και σε μία δεξαμενή αποθήκευσης νερού εντοπίζεται το αρχαιότερο (ηλικίας 3000 ετών) ελληνικό σκυρόδεμα. Το συνδετικό υλικό που είχε χρησιμοποιηθεί ήταν ένα μείγμα θηραϊκής γης και ασβέστου. Γύρω στο 800 π.Χ. χρησιμοποιήθηκαν από τους Έλληνες κονιάματα ασβέστου, τα οποία αποδείχθηκαν περισσότερο ανθεκτικά από τα Ρωμαϊκά κονιάματα που κατασκευάστηκαν πολύ αργότερα. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

Ο όρος τσιμέντο (cement) φαίνεται ότι πρωτοχρησιμοποιήθηκε κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους και στις αρχές του Μεσαίωνα. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζονταν υλικά με συνδετικές ιδιότητες και κυρίως κονιάματα ή μείγματα ασβέστου, ποζολάνης, νερού κ.λπ., που χρησιμοποιούσαν οι τότε κατασκευαστές για να συνδέσουν τους λίθους στις κατασκευές τους. Η κονία που αποκτούσε συνδετικές ιδιότητες κάτω από την επίδραση του νερού ονομαζόταν υδραυλικό τσιμέντο (hydraulic cement). Μερικές φορές στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν οι όροι rozzolana cement ή Santorin cement σε ένδειξη της φύσης του μείγματος. Το πρώτο αναφερόταν σε μείγμα ποζολάνης και ασβέστου και το δεύτερο ειδικότερα σε ποζολάνη από τη Σαντορίνη (θηραϊκή γη) και άσβεστο. Κατά τη διάρκεια των Ρωμαϊκών Χρόνων αναφέρονται αρκετά έργα στα οποία χρησιμοποιήθηκε μείγμα

ασβέστη και ηφαιστειακής τέφρας που είχε βρεθεί στο χωριό Pozzuoli κοντά στο Βεζούβιο. Σημαντικότερα από τα έργα αυτά τα οποία σώζονται έως τις μέρες μας είναι η Αππία οδός και το Κολοσσαίο. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Το Μεσαίωνα παρατηρείται μία υποβάθμιση στην ποιότητα και στη χρήση παρόμοιων υλικών, σε αντίθεση με το δεύτερο ήμισυ του 18ου αιώνα οπότε και αναφέρεται έντονη δραστηριότητα στην Ευρώπη για την ανακάλυψη ενός ανόργανου συνδετικού υλικού που θα μπορούσε να πήξει και να σκληρυνθεί με το νερό. Οι πρώτες ανακαλύψεις αφορούσαν κύρια την άσβεστο. Παρατηρήθηκε ότι κατά το ψήσιμο (ασβεστοποίηση) του καθαρού ασβεστόλιθου προέκυπτε ένα υλικό που με την προσθήκη νερού μετασχηματιζόταν σε μια παχύρρευστη μάζα που είχε συνδετικές ιδιότητες. Η άσβεστος αυτή ήταν γνωστή ως «παχιά άσβεστος». Όταν αυξάνονταν οι ποσότητες των προσμείξεων, που ήταν κυρίως αργλικές ή πυριτικές, τότε το προϊόν της ασβεστοποίησης δεν ενυδατωνόταν εύκολα και η εκλυόμενη θερμότητα ήταν πολύ μικρή. Το 1758 ο Smeaton διαπίστωσε ότι οι άσβεστοι που περιείχαν μεγάλες ποσότητες (20-25%) αργλικών υλικών είχαν την ιδιότητα να σκληρύνονται κάτω από το νερό, χαρακτηριστικό που δεν είχε παρατηρηθεί με τις καθαρότερες άσβεστους. Παρατηρήθηκε μάλιστα ότι το φαινόμενο αυτό ήταν πιο έντονο όταν χρησιμοποιούνταν μια πόζολάνη από μια περιοχή (Pozzuoli) κοντά στη Ρώμη. Οι καθαρές άσβεστοι παρατηρήθηκε ότι Σκληραίνονταν στον αέρα, με την επίδραση του CO₂, για να ξανασχηματίσουν ανθρακικό ασβέστιο. Οι άσβεστοι που δεν ήταν καθαρές αντιδρούσαν μέσα στο νερό με τις πυριτικές και αργλικές ενώσεις που περιείχαν ως προσμείξεις, για να σχηματίσουν ένυδρες ασβεσταργλικές και ασβεστοπυριτικές ενώσεις, που είχαν ισχυρές συνδετικές ικανότητες και δεν χρειάζονταν διοξείδιο του άνθρακα για να σκληρυνθούν. Έτσι, η μεν καθαρή άσβεστος δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως τσιμέντο, μπορούσε όμως να χρησιμοποιηθεί η μη καθαρή. Για να τις διαφοροποιήσει ο Smeaton χαρακτήρισε την καθαρή άσβεστο ως μη υδραυλική, ενώ τη μη καθαρή ως υδραυλική. Κατά την έψηση των υδραυλικών ασβέστων μερικά τεμάχια του ορυκτού, που χρησιμοποιούνταν ως πρώτη ύλη, δέχονταν πολύ υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να συντήκονται. Τα τεμάχια αυτά θεωρούνταν άχρηστα και απορρίπτονταν. Παρατηρήθηκε όμως ότι το προϊόν της άλεσης αυτών των τεμαχίων ήταν ένα πολύ καλό συνδετικό υλικό που οι Γάλλοι χρησιμοποίησαν με το όνομα

"Grappier cement". Αποτέλεσμα των ερευνών του Smeaton ήταν να γίνει γνωστό ότι εάν προστεθούν στον ασβεστόλιθο, πριν από την έψηση, ποσότητες αργιλικών υλικών, οι υδραυλικές ιδιότητες βελτιώνονται. Έτσι επιτεύχθηκε η παρασκευή των υδραυλικών ασβέστων (hydraulic limes). (Τσιμας Μ., 2005)

Το 1800 ο Parker ανακάλυψε το "Roman cement", με θέρμανση, σε θερμοκρασία υαλοποίησης, αργίλων που περιείχαν μικρούς κρυστάλλους ασβεστολιθικής ύλης. Το 1822 κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το "British Cement", ενώ το 1824 ο Άγγλος J. Aspdin ανακάλυψε, πειραματιζόμενος στην κουζίνα του, ότι ήταν δυνατό να παρασκευασθεί τσιμέντο με πολύ καλύτερες ιδιότητες από τις υδραυλικές ασβέστους, εάν το μείγμα ασβέστου και αργίλου θερμαινόταν μέχρι επίτηξης. Το προϊόν της επίτηξης κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας με το όνομα Portland cement, για διαφοροποίηση από τις διάφορες ασβέστους. Το συγκεκριμένο όνομα δόθηκε από τον Aspdin, καθόσον το χρώμα του προϊόντος που παρήγαγε του θύμιζε το χρώμα μιας πέτρας που εξορυσσόταν στο νησί Portland, ανοικτά των βρετανικών ακτών. Το 1845 ο I.C. Jonson υπέδειξε ακριβέστερες αναλογίες για τις πρώτες ύλες και καταλληλότερες θερμοκρασίες για την έψηση. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι ο Jonson εργάστηκε στην τσιμεντοβιομηχανία από το 1827 σε ηλικία 16 ετών. Πέθανε σε ηλικία 100 ετών το 1911 και θεωρείται ο πρώτος παρασκευαστής στην ιστορία του τσιμέντου. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

Το 1850 ιδρύεται στη Γαλλία το πρώτο εργοστάσιο τσιμέντου, το 1855 στη Γερμανία, το 1875 στην Αμερική και το 1902 στην Ελλάδα.

Το 1859 μετρήθηκαν οι πρώτες αντοχές τσιμέντου από τον J. Grant, ενώ το 1887 ο H. Le Chatelier ανέπτυξε τις πρώτες θεωρίες για την ενυδάτωση του τσιμέντου. Το 1895 ο W. Michaelis εισήγαγε τη δοκιμή της σταθερότητας όγκου, το 1904 έγιναν οι πρώτες προδιαγραφές για το τσιμέντο από την Αμερικανική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών και το 1924 ο R. Bogue, με τους ομώνυμους τύπους του, προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την ορυκτολογική σύσταση του τσιμέντου.

Αντίστοιχες ημερομηνίες σταθμοί αναφέρονται για τις τεχνολογικές εξελίξεις κατά την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου (μύλοι, συστήματα έψησης κ.λπ.), εξελίξεις που συνεχίζονται μέχρι σήμερα. Βασική ώθηση στη μαζική παραγωγή του τσιμέντου

έδωσε η εισαγωγή του περιστροφικού φούρνου το 1877. Στην Ελλάδα οι φούρνοι του τύπου αυτού εισήχθησαν το 1912.

Τον 20ό αιώνα οι εξελίξεις ήταν ραγδαίες τόσο στις μεθόδους παρασκευής του τσιμέντου όσο και στη χρησιμοποίησή του για πρωτοποριακά (για κάθε εποχή) έργα. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα σε θέματα τσιμέντου και σκυροδέματος προχωρά με ασύλληπτους ρυθμούς, ενώ έχει δοθεί μεγάλη προσοχή παγκοσμίως στην προσθήκη βιομηχανικών παραπροϊόντων σε διάφορους τύπους τσιμέντου, στην ταυτοποίηση και αποκατάσταση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε ιστορικά κτίσματα καθώς και στην προτυποποίηση του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Δεν είναι υπερβολή να λεχθεί ότι ετησίως γίνονται περί τα 500 σχετικά συνέδρια στον κόσμο.

Η Ελλάδα που παρήγαγε τσιμέντο με βάση τους τύπους που προέβλεπε το ΠΔ του 1980, από τις αρχές του 2002 ακολουθεί το σχετικό ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 για το τσιμέντο, ενώ επίκειται η εφαρμογή του προτύπου EN 206-1 για το σκυρόδεμα. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ (2009)

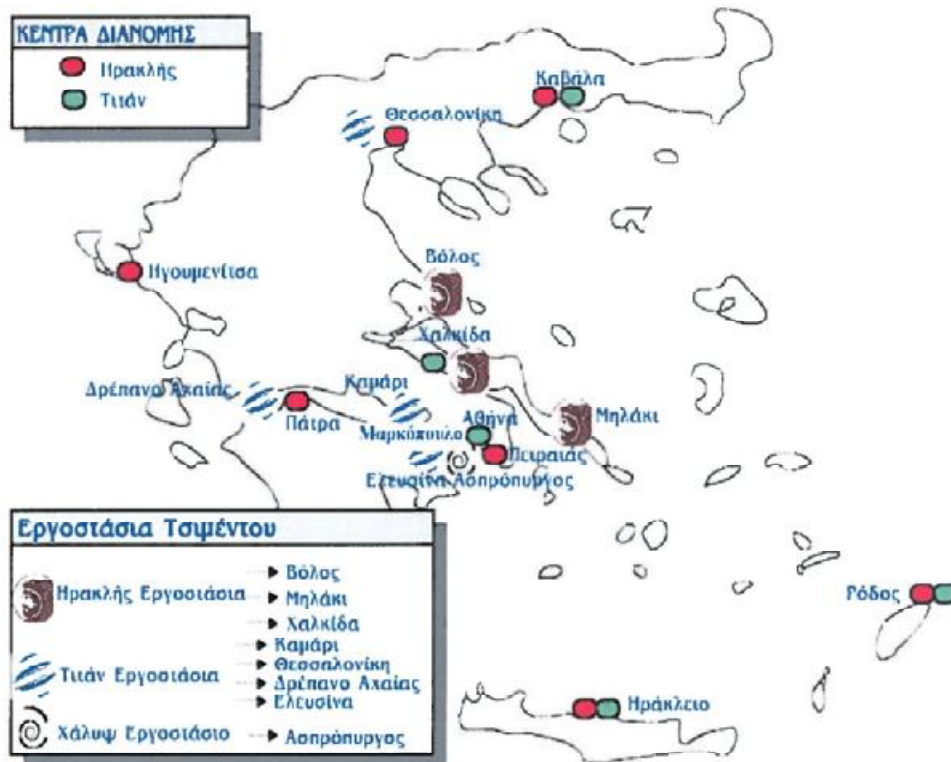
*** Παρούσα κατάσταση**

Εργοστάσια τσιμέντου: Οκτώ (-8-) στην Ελλάδα και επτά (-7-) της εταιρείας TITAN A.E. στο εξωτερικό.

1. TITAN στην Ελλάδα (Καμάρι Βοιωτίας 1, Ελευσίνα 1, Θεσσαλονίκη 1, Δρέπανο Αχαΐας 1) + εξωτερικό (U.S.A. 2, Αίγυπτος 2, Σκόπια 1, Βουλγαρία 1, Σερβία 1)

2. ΑΓΕΤ "ΗΡΑΚΛΗΣ" (Lafarge Group) στην Ελλάδα (Βόλος 1, Χαλκίδα 1, Μηλάκι Αλιβερίου 1)

3. Τσιμέντα "ΧΑΛΥΨ" (Italcementi Group) στην Ελλάδα (Απρόπυργος 1)



Σχήμα: Κατανομή Ελληνικών εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου

1.2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΟΥ

Θα παρατεθούν τα επιμέρους στάδια της παραγωγικής διαδικασίας και όλες οι τεχνολογικές εξελίξεις που οριοθετούν μία σύγχρονη θεώρηση της βιομηχανίας τσιμέντου. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στοχεύουν αφενός μεν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και αφετέρου στη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων. Οι προσπάθειες για την αναβάθμιση της αποτελεσματικότητας του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού συνεχίζονται μέχρι σήμερα, με όχι τόσο έντονους ρυθμούς όπως την εικοσαετία 1970-1990, λόγω του γεγονότος ότι οι βαθμοί απόδοσης κάποιων διεργασιών έχουν φθάσει σε οριακά σημεία και η έρευνα στρέφεται πλέον σε άλλες κατευθύνσεις. Επομένως, κάτω από το πρίσμα μιας σύγχρονης θεώρησης της τεχνολογίας τσιμέντου, θα αναλυθούν τα σύγχρονα δεδομένα σχετικά με τα επιμέρους μηχανήματα, ενώ η αναφορά σε τεχνολογίες, που έχουν εκλείψει ή τείνουν να εκλείψουν, θα έχουν περισσότερο ιστορικό χαρακτήρα, υποδηλώνοντας ταυτόχρονα την ανάγκη για τον εκσυγχρονισμό του μηχανήματος.

Τα κύρια στάδια της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου είναι: **α. προετοιμασία του μείγματος των πρώτων υλών, β. έψηση του μείγματος των πρώτων υλών και γ. άλεση του τσιμέντου.** Η κατηγοριοποίηση αυτή διακρίνει την παραγωγική διαδικασία στις διεργασίες που προηγούνται της κυρίως διεργασίας μετασχηματισμού των πρώτων υλών σε προϊόν, που είναι η έψηση, και στις διεργασίες που έπονται και προσδίδουν στο προϊόν επιμέρους ιδιότητες. Όσο και εάν τα μηχανήματα με τα οποία γίνεται η έψηση (περιστροφικές κάμινοι) αποτελούν την καρδιά της τσιμεντοβιομηχανίας, καθορίζοντας και τη δυναμικότητά της, τα μηχανήματα των δύο άλλων σταδίων είναι εξίσου σημαντικά για την ορθολογική λειτουργία της βιομηχανικής μονάδας. (Peray K. E., Waddell J. J., 1972)

Στο σχήμα 1 δίνονται οι επιμέρους διεργασίες μιας βιομηχανίας τσιμέντου, ενώ στο σχήμα 2 παρουσιάζεται αναλυτικά η παραγωγική διαδικασία.

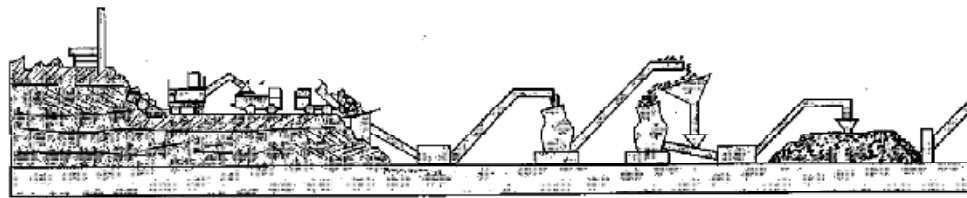
Στην προετοιμασία περιλαμβάνονται η θραύση και η άλεση του μείγματος των πρώτων υλών καθώς και η προομογενοποίηση και η ομογενοποίησή τους, διαδικασίες που στοχεύουν στην καλύτερη προετοιμασία του μείγματος για την έψηση τόσο από πλευράς ελάττωσης μεγέθους (οι δύο πρώτες διεργασίες), όσο και ομοιογένειας (οι δύο δεύτερες). Οι διεργασίες αυτές αντιμετωπίζονται χωριστά στην συνέχεια, καθόσον κάθε μία έχει τη δική της τεχνολογία και τα δικά της προβλήματα.

Η λατόμευση των πρώτων υλών αντιμετωπίζεται στα πλαίσια της παραγωγικής διαδικασίας, αν και πολλές φορές τα διάφορα λατομεία δεν ανήκουν χωροταξικά στο εργοστάσιο. Η ορθή όμως επιλογή τους, η εκτίμηση των αποθεμάτων τους και ο προγραμματισμός της εκμετάλλευσής τους είναι πρωταρχικής σημασίας για τη βιωσιμότητα μιας τσιμεντοβιομηχανίας. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

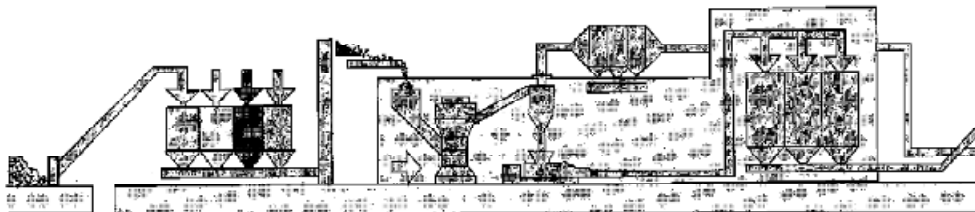
Αν και ιστορικά διακρίνονται δύο κύριες μεθοδολογίες (υγρή και ξηρή), που ακολουθούνται για την προετοιμασία του μείγματος των πρώτων υλών και οι οποίες σχετίζονται και με το είδος της περιστροφικής καμίνου που θα εφαρμοσθεί στην συνέχεια, εντούτοις η μεθοδολογία που έχει εκτοπίσει όλες τις άλλες και που δεσπόζει τα τελευταία 30 χρόνια, συγκεντρώνοντας παράλληλα το σύνολο των ερευνητικών προσπαθειών, είναι η ξηρή. Ακόμη και η ημιυγρή μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε προς τα τέλη του 1950, σταδιακά διεθνώς εγκαταλείπεται και στην

Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου
Ελλάδα πλέον δε λειτουργεί καμία κάμινος της τεχνολογίας αυτής. (Λαμπρόπουλος
Δ.,, 2007)

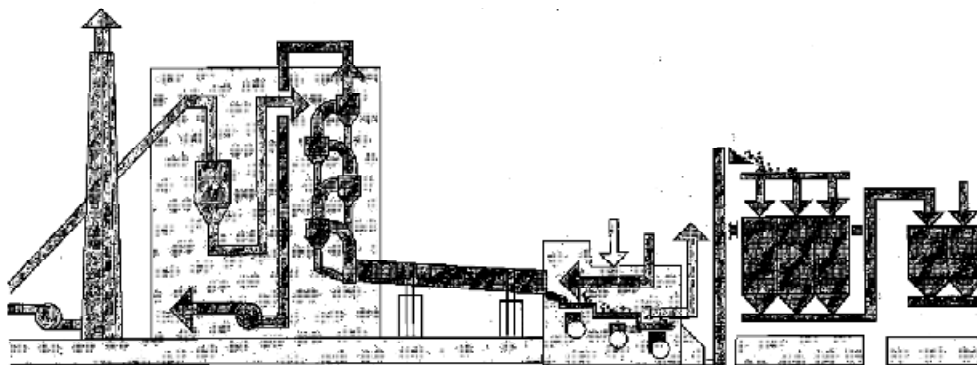
Σχήμα 1: Επιμέρους διεργασίες βιομηχανίας τσιμέντου



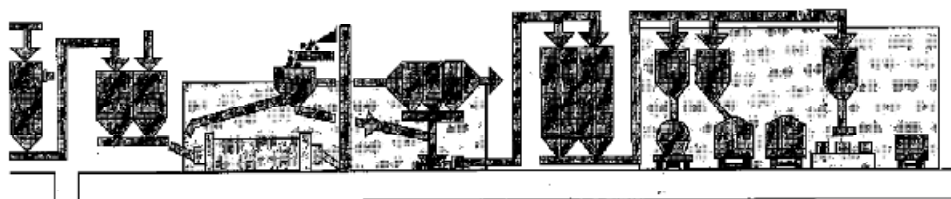
Λατόμευση, θραύση, προομογενοποίηση



Ανάμιξη, άλεση και ομογενοποίηση Π.Υ.



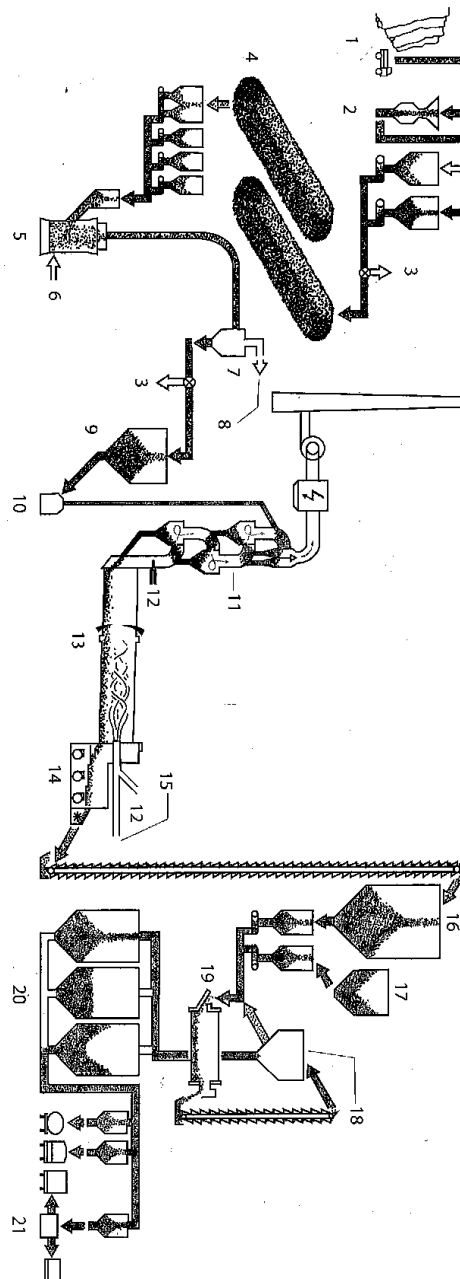
Έψηση φαρίνας



Τελική άλεση τσιμέντου

Σχήμα 2: Αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας παραγωγής του τσιμέντου

1: λατόμευση, 2: θραυστήρας ασβεστόλιθου, 3: δειγματοληψία, 4: προομογενοποίηση ασβεστόλιθου, 5: μύλος άλεσης Π.Υ., 6: αέρας ξήρανσης, 7: στατικός διαχωριστής, 8: αέριο ρεύμα προς αποκονιωτή, 9: σιλό ομογενοποίησης μείγματος Π.Υ., 10: αναβατήριο, 11: προθερμαντές καμίνου, 12: καύσιμο, 13: περιστροφική κάμινος, 14: ψυγείο κλίνκερ, 15: πρωτογενής αέρας καύσης, 16: σιλό κλίνκερ, 17: σιλό γύψου, 18: αεροδιαχωριστής διάταξης άλεσης, 19: σφαιρόμυλος, 20: σιλό αποθήκευσης τσιμέντου, 21: διανομή τσιμέντου (στο διάγραμμα δεν εμφανίζονται οι διατάξεις αποκονίωσης του ψυγείου του κλίνκερ και των διατάξεων ελάττωσης μεγέθους)



Η υγρή μέθοδος εφαρμόζεται σε χώρες (πχ. χώρες της Βαλτικής, Ρωσία) όπου αφενός οι πρώτες ύλες εξορύσσονται με σημαντικό ποσοστό υγρασίας και το υλικό πηγαίνει για έψηση με ποσοστό υγρασίας 35-40% και αφετέρου διαθέτουν φθηνή ηλεκτρική ενέργεια (Σκανδιναβικές χώρες). Η διαφοροποίηση στην παραγωγική διαδικασία αφορά στα στάδια που είναι μετά την θραύση, όπου στο μείγμα των πρώτων υλών προστίθεται νερό και ο πολτός που προκύπτει ανακατεύεται σε μεγάλες ειδικές δεξαμενές. Η άλεση που ακολουθεί γίνεται επίσης σε υγρή φάση και το έτοιμο προς έψηση μείγμα αποθηκεύεται σε δεξαμενές όπου συνεχώς αναδεύεται. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη ομοιογένεια του μείγματος, αλλά η σημαντικά μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στη φάση της έψησης καθιστά αντισυμβατική την εφαρμογή της.

Το υλικό, διατρέχοντας τα διάφορα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, έχει επιμέρους ονομασίες που αναφέρονται στο σημείο αυτό, καθόσον στη συνέχεια θα χρησιμοποιούνται συνεχώς οι αντίστοιχοι όροι. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

Πέτρωμα ή χώμα: Το υλικό μέχρι την άλεση του μείγματος των πρώτων υλών

Φαρίνα: Το προϊόν της άλεσης των πρώτων υλών έως την έψηση

Κλίνκερ: Το προϊόν της έψησης έως την άλεση του τσιμέντου

Τσιμέντο: Το τελικό προϊόν που προκύπτει από την άλεση του κλίνκερ

1.3. Η ΛΑΤΟΜΕΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

1.3.1. Γενικά κριτήρια επιλογής της τοποθεσίας του λατομείου

Οι πρώτες ύλες για την παρασκευή του τσιμέντου πρέπει κύρια να λαμβάνονται με φθινό τρόπο. Η σύστασή τους πρέπει να είναι τέτοια που να δικαιολογεί και να επιτρέπει την εύκολη προετοιμασία τους (δηλαδή να θραύονται και να αλέθονται εύκολα), για να αναπτύξουν απρόσκοπτα την επιδιωκόμενη δραστηριότητα κατά τη θερμική κατεργασία τους.

Στις πρώτες ύλες όπου τα απαραίτητα οξείδια βρίσκονται στην επιθυμητή αναλογία για την άμεση παρασκευή «φυσικού τσιμέντου» είναι σπάνια, με επακόλουθο σχεδόν όλες τις φορές παράλληλα με τη λατόμευση του ασβεστόλιθου να λαμβάνεται μέριμνα για την προμήθεια του εργοστασίου με άργιλο ή ακόμα και με

άλλα πυριτικά υλικά. Ευνόητο είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πρώτων υλών, τόσο δαπανηρότερη θα είναι και η προετοιμασία τους για να δώσουν ένα μείγμα κατάλληλο για έψηση. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή της θέσης ενός λατομείου είναι η ποιότητα και η ποσότητα του προς εκμετάλλευση υλικού και κυρίως του ασβεστόλιθου που συνήθως συμμετέχει σε ποσοστό περίπου 75% στο μείγμα. Όταν αυτά ισχύουν, τότε λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως η τοποθεσία του, η ευκολία εκμετάλλευσής του, ο διαθέσιμος μηχανολογικός εξοπλισμός καθώς επίσης και το διατιθέμενο προσωπικό. Ευνόητο είναι ότι το λατομείο δε θα είναι σε περιοχές που για διάφορους λόγους (αρχαιολογικοί χώροι, περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους, άμεση γειννίαση με μεγάλα αστικά κέντρα κ.λπ.) αποκλείονται για ανάπτυξη λατομικών δραστηριοτήτων.

Ένα γενικό πλάνο εργασίας στο οποίο βασίζεται η συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών και στοιχείων για την καταλληλότητα ή μη μιας περιοχής ως τόπου εγκατάστασης ενός λατομείου περιλαμβάνει τη συγκέντρωση των παρακάτω δεδομένων.

- Υπάρχοντα στοιχεία. Αρχική αναγνώριση
- Παρατηρήσεις επιφανείας. Εργοταξιακή αναγνώριση
- Διερεύνηση σε βάθος
- Μελέτη των δεδομένων και συλλογική αξιολόγησή τους

Με τον όρο αρχική αναγνώριση νοείται η συγκέντρωση όλων των σχετικών πληροφοριών για την περιοχή όπου υπάρχουν ενδείξεις ότι η σύσταση των πετρωμάτων της την καθιστά κατάλληλη για πρώτη ύλη τσιμεντοβιομηχανίας. Στις σχετικές πληροφορίες περιλαμβάνονται γεωλογικοί και τοπογραφικοί χάρτες, αεροφωτογραφίες, εκθέσεις, γνωματεύσεις και γενικά κάθε στοιχείο που υπάρχει και είναι σχετικό με την υποψήφια περιοχή.

Η εργοταξιακή αναγνώριση περιλαμβάνει επιτόπιες επισκέψεις προκειμένου να γίνει μελέτη των επιφανειακών ενδείξεων και να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητα των υλικών. Σημαντικά στοιχεία λαμβάνονται από τυχόν υπάρχοντα παλαιότερα λατομεία, από τομές εδάφους οι οποίες έχουν γίνει για τη διάνοιξη

δρόμων καθώς και από βραχώδεις εμφανίσεις, διότι σε αυτές είναι εμφανή τα χαρακτηριστικά της ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση των πετρωμάτων. Στο στάδιο αυτό γίνονται παρατηρήσεις σχετικά με την παρουσία ή μη υπόγειων νερών, την υδατοπερατότητα, τη δράση των επιφανειακών νερών, η οποία αποτελεί βασικό παράγοντα για τις κατολισθήσεις, τις διογκώσεις, τις αποσαθρώσεις και τις διαβρώσεις των πετρωμάτων και τέλος για τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Το κομβικό σημείο για την επιλογή της θέσης του λατομείου και για την εξακρίβωση της ποιότητας και της ποσότητας του υλικού είναι η διερεύνηση σε βάθος με τη μορφή γεωτρήσεων σε όλη την έκταση του λατομείου. Οι οπές οι οποίες έχουν διάμετρο 40-80 mm πρέπει να εκτείνονται σε ικανοποιητικό βάθος, προκειμένου να σχηματίζεται όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερη εικόνα του λατομείου. Η συχνότητα των γεωτρήσεων εξαρτάται από την ανομοιομορφία του υπό εξέταση πετρώματος. Τούτο σημαίνει ότι σε πρώτη φάση γίνονται οπές σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις (50-80 m) και αργότερα ανάλογα με τα αποτελέσματα γίνονται και άλλες ενδιάμεσες. Οι χημικές αναλύσεις γίνονται σε αντιπροσωπευτικά δείγματα της ποσότητας που συνολικά συλλέγεται, καθώς και σε διάφορα καθ' ύψος τμήματα (ανά 50 cm μήκος) του «καρότου» της γεώτρησης, ώστε να αποτυπωθεί η συνολική εικόνα του λατομείου. Έτσι τελικά σχηματίζεται ένας κάρναβος, δηλαδή μία αντιπροσωπευτική εικόνα της υπό εξέταση περιοχής, όπου αποτυπώνονται οι ισοϋψείς (της ίδιας περιεκτικότητας) τόσο του βασικού στοιχείου που ενδιαφέρει (κυρίως CaCO_3), όσο και των πλέον σημαντικών προσμείξεων (MgCO_3 , αλκάλια) που υπάρχουν στον ασβεστόλιθο. Από την αρχική αυτή χαρτογράφηση του λατομείου, θα οργανωθεί αργότερα η εκ- μετάλλευσή του με τον ορθολογικό συνδυασμό των μετώπων εκείνων που σε ορισμένες αναλογίες θα δίνουν πάντοτε σταθερή και αποδεκτή ποιότητα. Παράλληλα, με εκλεκτική εκμετάλλευση ορισμένων μετώπων θα αντιμετωπίζονται προβλήματα αυξημένης συγκέντρωσης κάποιου ανεπιθύμητου συστατικού, που έχει εντοπισθεί κατά τη φάση των γεωτρήσεων. Για όλους αυτούς τους λόγους το κόστος των γεωτρήσεων μαζί με το κόστος των αναλύσεων καλύπτει το 10-15% του συνολικού κόστους του λατομείου. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

Εκτός από την ποιότητα και την ποσότητα του υλικού πρέπει να ελέγχονται ως κριτήρια η θέση του λατομείου και η ευκολία της εκμετάλλευσής του. Όσον αφορά

τον πρώτο παράγοντα, αναφέρθηκε και σε προηγούμενο σημείο ότι είναι σχεδόν απαραίτητο να βρίσκεται το εργοστάσιο δίπλα στο λατομείο του ασβεστόλιθου, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα έξοδα προσαγωγής του πετρώματος στο εργοστάσιο. Εκτός τούτου και δεδομένου ότι το έτοιμο προϊόν σε μεγάλο ποσοστό διατίθεται χύδην με ειδικά πλοία, πρέπει το εργοστάσιο και κατ' επέκταση το λατομείο να μη βρίσκονται μακριά από λιμενικές εγκαταστάσεις ή οδικό δίκτυο.

Οι σπουδαιότεροι παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν στην ευκολία εκμετάλλευσης, είναι το πάχος του υλικού αποκάλυψης που δεν πρέπει να είναι μεγάλο, η δυνατότητα αποστράγγισης, η ύπαρξη κλιτύων οι οποίες αποτελούν θετικό στοιχείο για την επιλογή και τέλος η εύκολη πρόσβαση σε εγκαταστάσεις κοινής ωφέλειας όπως είναι το νερό και ο ηλεκτρισμός. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

1.3.2. Η εκμετάλλευση του λατομείου

Οι πρώτες ύλες μίας βιομηχανίας τσιμέντου κατατάσσονται στην κατηγορία των ημισκληρών έως σκληρών υλικών. Με αυτόν το διαχωρισμό νοείται ότι για την εξόρυξή τους, ιδίως του ασβεστόλιθου, απαιτείται διάτρηση και ανατίναξη. Μερικά όμως άλλα υλικά (όπως η κιμωλία και οι άργιλοι) είναι αρκετά μαλακά, ώστε μπορούν να εξορυχθούν με τη βοήθεια σκαπτικών μηχανημάτων, ενώ άλλα που είναι σχετικά σκληρότερα (όπως μερικοί σχιστόλιθοι) εξορύσσονται με τη βοήθεια ερπυστριοφόρων (rippers).

Τα λατομεία ασβεστόλιθου είναι ανοικτού υπαίθριου μετώπου και έχουν εκτεθειμένη σχεδόν κατακόρυφα την επιφάνεια του πετρώματος. Αναπτύσσονται με τη μέθοδο των πολλαπλών δαπέδων, σύμφωνα με την οποία η εκμετάλλευση γίνεται σε σειρά δαπέδων που βρίσκονται σε διαφορετική υψομετρική στάθμη. Για τον ασβεστόλιθο, όπου ενδεχόμενες διαφοροποιήσεις στη σύσταση των πρώτων υλών είναι ανεπιθύμητες στην περαιτέρω παραγωγική διαδικασία, επιδιώκεται η παράλληλη εκμετάλλευση πολλών μετώπων για να υπάρχει δυνατότητα ανάμειξης των παραγόμενων πετρωμάτων, που θα συμβάλει στη μείωση των αποκλίσεων από τους κατά περίπτωση επιθυμητούς στόχους.

Η συνηθισμένη σειρά ενεργειών που λαμβάνουν χώρα στα πλαίσια της εκμετάλλευσης ενός λατομείου περιλαμβάνει τα παρακάτω τέσσερα στάδια:

- Απομάκρυνση του υπερκείμενου στρώματος (overburden)
- Διάτρηση και ανατίναξη
- Μεταφορά του υλικού που εξορύχθηκε στα μέσα μεταφοράς
- Μεταφορά του υλικού στην εγκατάσταση θραύσης

Για την αποκάλυψη του πετρώματος χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, ανάλογα με το πάχος και την απόσταση στην οποία θα μεταφερθεί. Για μικρά πάχη (έως 1.5 m), όπως είναι συνήθως τα πάχη των επικαλύψεων των πρώτων υλών, και για μικρές αποστάσεις (έως 100 m) χρησιμοποιούνται προωθητήρες (μπουλντόζες). Το υλικό προωθείται έξω από τα όρια της εκμετάλλευσης και πολλές φορές χρησιμοποιείται για την κατασκευή των επιχωματώσεων των οδών προσπέλασης. Το ύψος των βαθμίδων ποικίλλει και εξαρτάται από το βάθος στο οποίο μπορούν να φθάσουν τα διατρητικά μηχανήματα. Όμως τα μεγάλα ύψη βαθμίδων δημιουργούν προβλήματα ασφαλείας εργασίας. Σύμφωνα με το νέο μεταλλευτικό κανονισμό, οι βαθμίδες δεν πρέπει να έχουν ύψος μεγαλύτερο από 15-20 m. (Λαμπρόπουλος Δ., 2007)

Προκειμένου οι διατρήσεις και οι ανατινάξεις να γίνουν κατά τεχνικοοικονομικά αποδεκτό τρόπο, πολλές φορές στα ορυχεία εκτελούνται αρχικά δοκιμαστικές εξορύξεις για τη δημιουργία μετώπου και την παράλληλη αναγνώριση της φύσης του αποθέματος του πετρώματος. Με τις δοκιμαστικές ανατινάξεις, επίσης, προσδιορίζεται η ενέργεια των εκρηκτικών υλών στο πέτρωμα και καθορίζεται η διάμετρος και το βάθος των διατρημάτων καθώς και η ποσότητα των εκρηκτικών υλών. Παλαιότερα τα διατρήματα, που άλλες φορές ήταν κατακόρυφα και άλλες φορές οριζόντια, είχαν μικρή διάμετρο (35-46 mm) και μήκος (4-7 m). Σήμερα χρησιμοποιούνται συνήθως διατρήματα μεγάλης διαμέτρου (60-105 mm) που γίνονται είτε κατακόρυφα είτε με μικρή κλίση (70-80°). Στις ΗΠΑ αναφέρονται διαμέτροι που φθάνουν έως 300 mm. Το βάθος του διατρήματος είναι λίγο μεγαλύτερο από το ύψος του μετώπου. Έτσι για ύψος μετώπου 12 m, τα διατρήματα έχουν συνήθως βάθος 13 m και όσο μεγαλύτερες διαμέτροι χρησιμοποιούνται τόσο μεγαλώνει αφενός μεν το πλάτος B του εξορυσσόμενου μετώπου, αφετέρου δε η απόσταση S των διαφόρων διατρημάτων. Στον πίνακα 7.1 δίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη για την εξόρυξη ασβεστολιθικών πετρωμάτων.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη για την εξόρυξη των ασβεστολιθικών πετρωμάτων (E: εκρηκτική ύλη ανά διάτρημα, B: πλάτος εξορυσσόμενου μετώπου, S: απόσταση διατρημάτων)

Υψος μετώπου (m)	Διάμετρος Διατρήματος								
	38			51			64		
	E(Kg)	B(m)	S(m)	E(Kg)	B(m)	S(m)	E(Kg)	B(m)	S(m)
1.5	2.27	1.82	1.46	3.18	2.20	1.82	3.18	2.20	1.82
3.0	4.08	1.82	1.46	6.80	2.20	1.82	10.43	2.56	2.56
4.5	-	-	-	9.07	2.20	1.82	14.50	2.56	2.56
6.0	-	-	-	11.79	2.20	1.82	18.60	2.56	2.20
7.5	-	-	-	-	-	-	23.60	2.56	2.20
9.0	-	-	-	-	-	-	27.70	2.56	2.20

Τα χρησιμοποιούμενα διατρητικά μηχανήματα είναι περιστροφικά ή κρουστικά και λειτουργούν με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα, που παρέχεται από έναν αεροσυμπιεστή (air-compressor), συνήθως πετρελαιοκίνητο για μεγαλύτερη ευελιξία. Τα διατρητικά μηχανήματα κινούνται συνήθως με ερπύστριες. Σε κάθε διάτρημα τοποθετούνται τα ηλεκτρικά καψύλλια, η εκρηκτική ύλη και το υλικό επιγόμεσης, το οποίο, για να επιτευχθεί καλύτερος θρυμματισμός του πετρώματος, μερικές φορές τοποθετείται και ενδιάμεσως της γόμωσης. Σε όλο το μήκος της οπής τοποθετείται επίσης και η ηλεκτρική θρυαλλίδα.

Για την εξόρυξη χρησιμοποιούνται ζελατινώδη ή κονιώδη σε σχήμα φυσιγγίου εκρηκτικά καθώς και εκρηκτικά με αμμωνίτιδα. Αν και το εκρηκτικό που θα προτιμηθεί εξαρτάται από τη φύση, των υλικών που θα εξορυχτούν, συνήθως χρησιμοποιούνται εκρηκτικά με αμμωνίτιδα λόγω του μικρού κόστους τους ή συνδυασμός αυτών με ζελατινώδη. Εάν από την πρώτη ανατίναξη δημιουργηθούν μεγάλα κομμάτια πετρώματος που δεν μπορούν να τροφοδοτηθούν στο συγκρότημα θραύσης, πρέπει να γίνει μία δευτερογενής θραύση-ανατίναξη είτε με μηχανικά μέσα είτε με ειδικά εκρηκτικά μικρής ισχύος.

Για τα επόμενα δύο στάδια, της φόρτωσης δηλαδή του υλικού που εξορύχτηκε και της μεταφοράς του στις εγκαταστάσεις θραύσης, χρησιμοποιούνται για τη μεν φόρτωση τροχοφόροι ή ερπυστριοφόροι φορτωτές για δε τη μεταφορά βαγόνια πάνω σε ράγες, μεταφορικές ταινίες ή, συνηθέστερα, φορτηγά μεγάλης χωρητικότητας. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

1.3.3. Η προετοιμασία του μείγματος πρώτων υλών

Η προετοιμασία του μείγματος των πρώτων υλών έχει ως αντικείμενο να προσδώσει στο μείγμα τόσο την κατάλληλη λεπτότητα που είναι απαραίτητη για να ψηθεί με τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας χωρίς να υποβαθμισθεί η ποιότητά του, όσο και την απαραίτητη ομοιογένεια που χρειάζεται για τη σταθερότητα στην ποιότητα αλλά και την αποφυγή προβλημάτων στην περιστροφική κάμινο. Περιλαμβάνονται η θραύση και η άλεση της φαρίνας καθώς και η προομογενοποίηση και ομογενοποίηση. (Παπαϊωάννου Ν., 1998)

2. ΘΡΑΥΣΗ

2.1. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΡΑΥΣΤΗΡΩΝ

Η ελάττωση μεγέθους (size reduction) περιλαμβάνει τα στάδια της θραύσης (μείωση του μεγέθους του υλικού από 1500 mm σε 300 mm περίπου), του θρυμματισμού (από 300-70 mm σε 20-5 mm) και τέλος της άλεσης (από 20 mm σε μέγεθος 5mm). Στην τσιμεντοβιομηχανία συνήθως παραλείπεται το ενδιάμεσο στάδιο και εφαρμόζονται τα δύο άλλα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση κλειστών κυκλωμάτων θραύσης καθώς επίσης και την εφαρμογή του σταδίου της προάλεσης.

Πριν από τη θραύση πρέπει να απομακρυνθούν από τα υλικά όλα τα μεταλλικά αντικείμενα για τα οποία υπάρχει κίνδυνος να δημιουργήσουν φθορές και διακοπές λειτουργίας στο θραυστήρα. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιούνται: α) μαγνητικοί διαχωριστές και β) μεταλλικοί ανιχνευτές. Οι πρώτοι έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν διακόπτουν τη συνεχή ροή του υλικού προς το θραυστήρα, αλλά μειονεκτούν στο ότι δεν μπορούν να σηκώσουν βαριά αντικείμενα και στο ότι απαιτούν συνεχές ρεύμα, ενώ τα περισσότερα μηχανήματα δουλεύουν με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα. Με τους μεταλλικούς ανιχνευτές υπάρχει πολύ μεγαλύτερη βεβαιότητα ότι δε διέφυγε τίποτα, αλλά υπάρχει το πρόβλημα της τροφοδοσίας του θραυστήρα, η οποία δεν είναι συνεχής. Μόλις τα συστήματα αυτά ανιχνεύσουν ένα μέταλλο, δίνεται ένα οπτικό ή ένα ακουστικό σήμα και τότε διακόπτεται τελείως η κίνηση της ταινίας που μεταφέρει τα υλικά, προκειμένου να εξαχθεί το μεταλλικό αντικείμενο. Είναι δυνατόν επίσης, χωρίς να σταματήσει εντελώς η ταινία, να απορριφθεί ένα τμήμα του μεταφερόμενου υλικού. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

Οι θραυστήρες, ανάλογα με τη δύναμη που θραύουν το υλικό, είναι δυνατόν να χωρισθούν σε μηχανήματα στα οποία η θραύση γίνεται με **συμπίεση** (θραυστήρες με σιαγόνες, περιστροφικοί θραυστήρες, θραυστήρες με περιστρεφόμενους κυλίνδρους) και σε μηχανήματα στα οποία η θραύση γίνεται με **δυνάμεις κρούσης**, όπως είναι οι διάφορες μορφές θραυστήρων με σφυριά.

Η επιλογή του θραυστήρα εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

-τη φύση του υλικού που πρόκειται να θραυσθεί,

- την υγρασία του υλικού,
- το αρχικό μέγεθος της τροφοδοσίας,
- το επιδιωκόμενο τελικό μέγεθος του υλικού,
- την επιδιωκόμενη παραγωγή,
- τις φθορές και το κόστος αποκατάστασής τους.

Όπως και στην άλεση έτσι και στη θραύση διακρίνονται ανοικτά και κλειστά κυκλώματα. Η έννοια θα αναπτυχθεί με λεπτομέρειες στα κεφάλαια της άλεσης (3.3) και κατά μία γενική διατύπωση το κλειστό κύκλωμα συνεπάγεται την ύπαρξη κάποιου συστήματος κοκκομετρικού διαχωρισμού του προϊόντος της διεργασίας ελάττωσης μεγέθους σε δύο κλάσματα και την επαναφορά του χονδρόκοκκου τμήματος για συμπληρωματική κονιοποίηση. Η χρησιμοποίηση θραυστήρων με σφυριά συνεπάγεται υιοθέτηση κλειστού κυκλώματος, λόγω της σχάρας που έχουν στο κάτω τους μέρος, η οποία επιτρέπει τη διόδο των τεμαχίων που είναι μικρότερα από ένα συγκεκριμένο επιθυμητό μέγεθος, ενώ ανακυκλώνει τα σωματίδια με μεγαλύτερο μέγεθος. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

Εκτός από το είδος του θραυστήρα, βασικός παράγοντας που πρέπει να αντιμετωπισθεί από την αρχή είναι η σωστή επιλογή της θέσης του. Ως προς τη θέση διακρίνονται δύο είδη θραυστήρων, οι κινητοί και οι ακίνητοι. Οι πρώτοι ακολουθούν το μέτωπο της εξόρυξης, οπότε μηδενίζονται τα έξοδα μεταφοράς από το λατομείο στο θραυστήρα. Στους δεύτερους, αντίθετα, το υλικό προσάγεται στο θραυστήρα με φορτηγά αυτοκίνητα. Οι σημαντικότεροι παράγοντες, από τους οποίους εξαρτάται η εκλογή, είναι η ποιότητα του υπεδάφους και το μέγεθος της παραγωγής. Συγκεκριμένα, το έδαφος στο οποίο θα κινηθεί ο θραυστήρας θα πρέπει να υποστεί κατάλληλη προετοιμασία προκειμένου να δεχθεί το βάρος του. Όσον αφορά το μέγεθος της παραγωγής, θα πρέπει να τονισθεί ότι μέχρι τους 300 t/h εξομοιώνονται από άποψης κόστους ο κινητός με τον σταθερό. Για μεγαλύτερες δυναμικότητες υπερτερούν και προτιμώνται οι ακίνητοι θραυστήρες, ενώ τις μικρές μονάδες εξυπηρετούν καλύτερα οι κινητοί, αν και από τεχνολογική άποψη μειονεκτούν έναντι των ακίνητων. Πάντως η επιλογή του σημείου εγκατάστασης του θραυστήρα θα πρέπει να γίνει με προσοχή και σε τέτοιο σημείο, που να εξυπηρετεί οικονομικά το εργοστάσιο για τουλάχιστον 25 χρόνια. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

2.2 ΛΟΓΟΣ ΣΜΙΚΡΥΝΣΗΣ

Ως λόγος σμίκρυνσης θεωρείται το πηλίκο της μέγιστης διάστασης των τεμαχίων της τροφοδοσίας (D_{max}) προς την αντίστοιχη της παραγωγής (d_{max}):

$$n = D_{max}/d$$

Ο λόγος αυτός έχει ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή όχι μόνο των θραυστήρων αλλά και οποιουδήποτε μηχανήματος ελάττωσης μεγέθους, καθόσον σε τελική ανάλυση δείχνει πόσο αποτελεσματική είναι η διεργασία. Στην πράξη χρησιμοποιείται η σχέση (2):

$$n = F_{80}/P_{80} \quad (2)$$

όπου F_{80} : το θεωρητικό μέγεθος κόσκινου (σε mm ή μm), από το οποίο διέρχεται το 80% της τροφοδοσίας,

P_{80} : το θεωρητικό μέγεθος κόσκινου (σε mm ή μm), από το οποίο διέρχεται το 80% του προϊόντος.

Τα F_{80} και P_{80} προσδιορίζονται με κοκκομετρική ανάλυση της τροφοδοσίας και της παραγωγής και μεταφορά των αποτελεσμάτων σε κατάλληλα διαγράμματα (π.χ. Rosin-Rammler). Άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι τα F_{95} (P_{95}) και τα D_{50} (d_{50}) που ορίζονται με τον ίδιο τρόπο.

Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, ο λόγος σμίκρυνσης εξαρτάται κυρίως από το είδος του χρησιμοποιούμενου θραυστήρα και από το κατά πόσον αυτός εξυπηρετεί ανοικτό ή κλειστό κύκλωμα θραύσης. Επίσης σημασία έχει εάν η θραύση γίνεται σε ένα ή σε δύο στάδια, οπότε είναι δυνατόν να προκύψουν ένας συνολικός ή δύο επιμέρους λόγοι σμίκρυνσης.

Από τους τρεις τύπους που ισχύουν και δίνουν την απαιτούμενη ενέργεια για τη σμίκρυνση του μεγέθους, στην περίπτωση της θραύσης μεγαλύτερη εφαρμογή έχει ο νόμος του Kick, που δίνει την ενέργεια θραύσης W σε συνάρτηση με το λογάριθμο του λόγου σμίκρυνσης n :

$$W=C\log(D/d)=C\log n$$

όπου το C προσδιορίζεται εμπειρικά. Βεβαίως η ενέργεια που υπολογίζεται με τον τρόπο αυτό ανταποκρίνεται στο έργο που θεωρητικά απαιτείται και το οποίο είναι

πολύ μικρότερο από αυτό που δαπανάται στην πράξη. Το πρόβλημα αυτό κατά κανόνα αντιμετωπίζεται με την εύρεση διορθωτικών συντελεστών μεταξύ του εργαστηριακού μηχανήματος ελάττωσης μεγέθους και του βιομηχανικού θραυστήρα ή μύλου. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

2.3 ΕΙΔΗ ΘΡΑΥΣΤΗΡΩΝ

Αν αναλυθούν τα τέσσερα πιο γνωστά είδη θραυστήρων, ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως και από τους οποίους εξαρτάται η επιλογή του καταλληλότερου τύπου, προκύπτουν τα δεδομένα του πίνακα 2, όπου φαίνεται ότι για τη βιομηχανία τσιμέντου καταλληλότερος είναι ο θραυστήρας με σφυριά. Για το λόγο αυτό οι θραυστήρες της κατηγορίας αυτής αναλύονται περισσότερο στη συνέχεια, ενώ για τους άλλους γίνεται μικρότερης έκτασης αναφορά.

Πίνακας 2: Κριτήρια επιλογής θραυστήρων

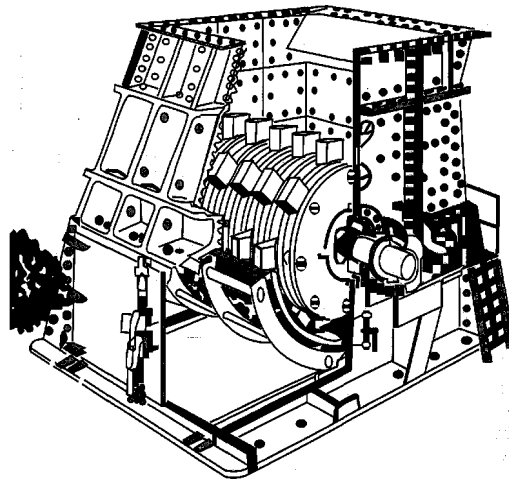
Κριτήρια επιλογής	Είδος θραυστήρα			
	Με κυλίνδρους	Με σιαγόνες	Στρομβικός	Με σφυριά
λόγος σμίκρυνσης	5-7	4-6	7-15	40-60
φθορές (g/t μικρές προϊόντος)		20-45	>50	1-3
ομοιογένεια προϊόντος	ναι	όχι	μέτρια	ναι
υγρασία υλικού	ναι	όχι	όχι	ναι
μέγιστη παραγωγή (t/h)	300	800	>800	>1000
ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/t)	0.3-0.6	0.3-0.6	0.2-0.4	1-2

Θραυστήρες με σφυριά

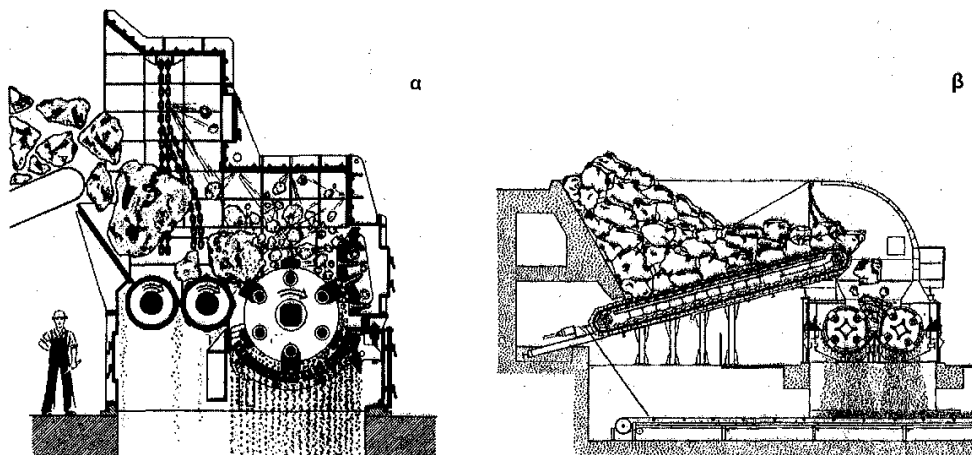
Οι θραυστήρες με σφυριά (hammer crushers) βρίσκουν εφαρμογή στη μείωση του μεγέθους σκληρού έως μετρίως σκληρού ασβεστόλιθου και μερικές φορές στη θραύση της μάργας. Ο λόγος σμίκρυνσης είναι αρκετά υψηλός και φθάνει σε τιμές 1: 40 έως 1: 60, εξαρτώμενος κυρίως από τη φύση του υλικού.

Πάνω σε έναν κύριο άξονα υπάρχει σειρά παράλληλων δίσκων, οι οποίοι περιφερειακώς φέρουν μικρότερους άξονες που στο μεταξύ των δίσκων χώρο έχουν έναν αριθμό σφυριών (σχήματα 3 και 4). Στο σχήμα 4 φαίνονται επίσης διάφοροι τύποι θραυστήρων με σφυριά (με έναν ή δύο ρότορες) καθώς επίσης και διάφοροι τρόποι τροφοδοσίας των σπαστήρων.

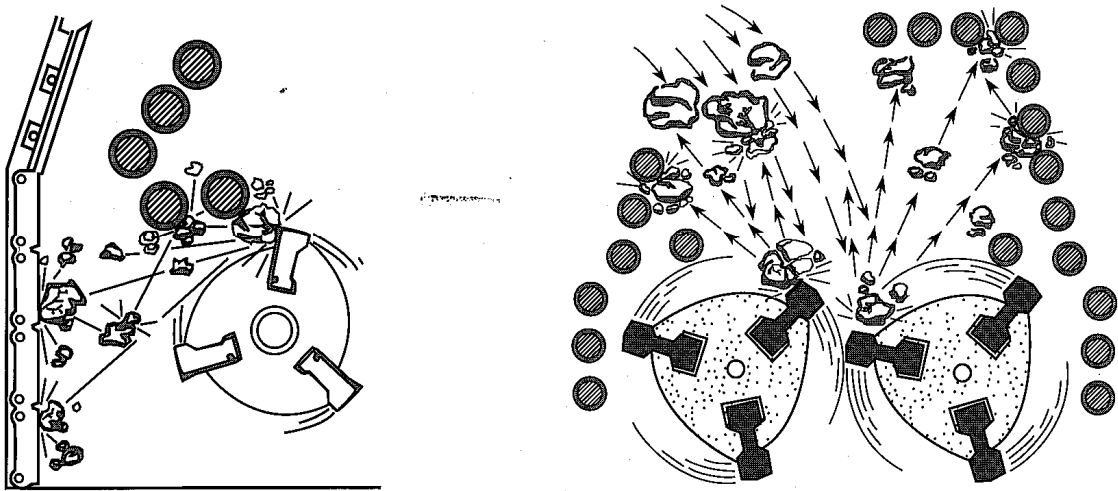
Οι θραυστήρες του τύπου αυτού βασίζονται στη σφοδρή πρόσκρουση των τεμαχίων στην ακίνητη επιφάνεια, που αποτελούν τα τοιχώματα του θραυστήρα που είναι κατάλληλα επενδεδυμένα εσωτερικά. Τα τεμάχια του υλικού τροφοδοτούνται από το πάνω άνοιγμα και εκσφενδονίζονται από τα ταχέως περιστρεφόμενα σφυριά ενάντια στις ακίνητες πλάκες και θραύονται με πρόσκρουση, ως συνέπεια της υψηλής κινητικής τους ενέργειας (Σχήμα 5).



Σχήμα 3: Θραυστήρες με σφυριά σε ημιτομή



Σχήμα 4: Θραυστήρες με σφυριά (α: μονός ρότορας, τροφοδοσία με κυλίνδρους
β: διπλός ρότορας, τροφοδοσία με πλακώταινιά)



Σχήμα 5: Τρόπος λειτουργίας σπαστήρα με σφυριά (με έναν και δύο ρότορες)

Στο κάτω μέρος του θραυστήρα υπάρχει σχάρα με κατάλληλη κλίση των περσίδων, με την οποία ρυθμίζεται η κοκκομετρία του εξαγόμενου υλικού και συνεπώς η παραγωγή του θραυστήρα. Έτσι η παραγωγή μειώνεται κατά 40% περίπου, όταν η κοκκομετρία εξαγωγής μειώνεται από 0-40 mm σε 0-25 mm. Η ύπαρξη της σχάρας δικαιολογεί τόσο το μεγάλο λόγο σμίκρυνσης όσο και την ομοιογένεια του παραγόμενου υλικού.

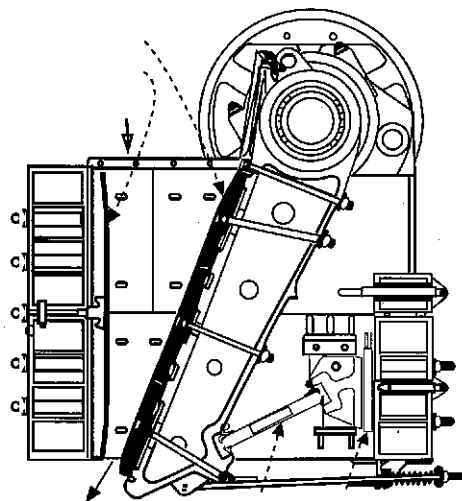
Βασικό στοιχείο στους θραυστήρες της κατηγορίας αυτής είναι τα σφυριά, καθένα από τα οποία έχει βάρος 70-100 kg, ανάλογα με το είδος του θραυστήρα. Η χημική σύσταση των χαλύβδινων σφυριών είναι C=1.0-1.4%, S=0.4-1.0%, Mn=12-14%, P=0.06%.

Η ειδική κατανάλωση των θραυστήρων κυμαίνεται από 1-3 g/t προϊόντος και εξαρτάται από τη σκληρότητα της τροφοδοσίας. Η παραγωγή του θραυστήρα ελαττώνεται με την αύξηση των φθορών και αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι μειώνεται η κινητική ενέργεια της επαφής ($P=mV^2/2$). Γι' αυτόν το λόγο άλλωστε οι καινούργιες εγκαταστάσεις θραύσης μειώνουν κάπως τη μάζα m του σφυριού, ενώ αντίθετα αυξάνουν όσο μπορούν την ταχύτητα V περιστροφής, η οποία μπορεί να φθάσει τις 250-400 rpm. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

Θραυστήρες με σιαγόνες

Οι θραυστήρες της κατηγορίας αυτής (jaw crushers- σχήμα 6) χρησιμοποιούνται για τη θραύση μεγάλων ποσοτήτων υλικών τόσο των πρώτων υλών όπως έρχονται από το λατομείο, όσο και του κλίνκερ όπως αυτό βγαίνει στην έξοδο του ψυγείου της περιστροφικής καμίνου, όπου υπάρχουν μεγάλα κομμάτια προερχόμενα κυρίως από τις κολλησιές του φούρνου. Οι θραυστήρες με σιαγόνες ενδείκνυνται για υλικά που δεν έχουν υγρασία και, λόγω του γεγονότος ότι μπορούν να δεχθούν μεγάλα κομμάτια, μπορούν να εφαρμοσθούν σε περιπτώσεις πρωτογενούς θραύσης, όπου συνδυάζονται με θραυστήρα με κυλίνδρους για τη συμπληρωματική ελάττωση μεγέθους.

Η θραύση γίνεται μεταξύ των δύο σιαγόνων, εκ των οποίων η μία είναι ακίνητη, ενώ η άλλη κινητή πλησιάζει και απομακρύνεται με παλινδρομικές κινήσεις από την ακίνητη με ταχύτητα μεταξύ 250-400 rpm. Οι σιαγόνες αυτές είναι επενδεδυμένες με ειδικά χαλυβοκράματα, που αντικαθίστανται όταν φθείρονται. Οι μεγαλύτερες φθορές εμφανίζονται στα κατώτερα τμήματα κυρίως της ακίνητης και κατά δεύτερο λόγο της κινητής σιαγόνας. Με περιστροφή όμως της χαλύβδινης επένδυσης κατά 180°, μεγαλώνει σημαντικά η ζωή της, η οποία για μια επένδυση με 12-14% μπορεί να φθάσει τις 1000 h λειτουργίας, με μια φθορά της τάξης των 20-45 g/t. (Λαμπρόπουλος Δ., 2007)



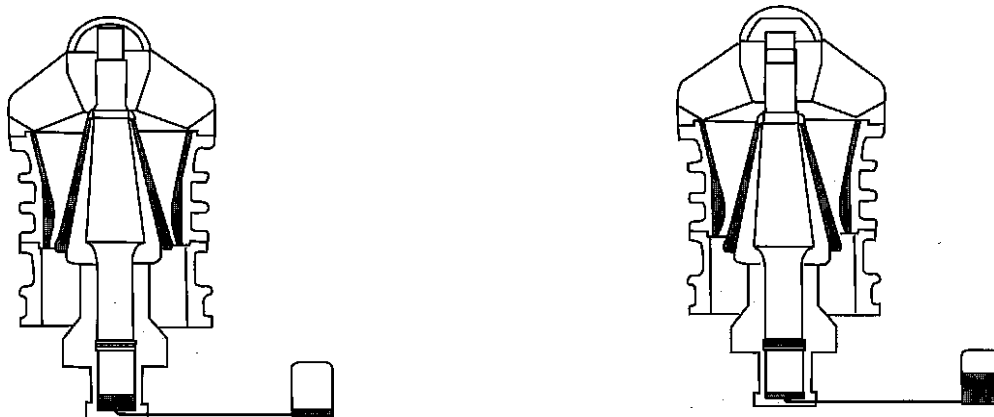
Σχήμα 6: Θραυστήρες με σιαγόνες **Στρομβικοί θραυστήρες**

Οι στρομβικοί θραυστήρες (gyratory crushers) στηρίζονται στην ίδια αρχή με τους θραυστήρες με σιαγόνες ή μασητήρα, δηλαδή στις δύο επιφάνειες θραύσης από τις οποίες η μία προσεγγίζει και απομακρύνεται περιοδικώς από την άλλη, η οποία και είναι ακίνητη (σχήμα 7).

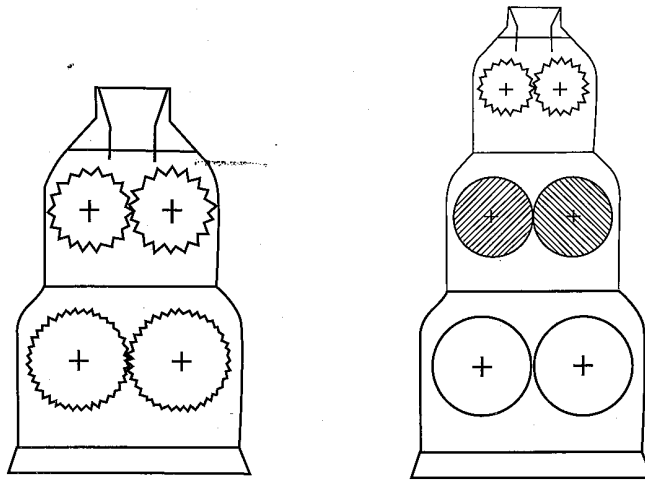
Η διαφοροποίηση συνίσταται στο γεγονός ότι η προσέγγιση αυτή γίνεται με περιστροφική κίνηση και έτσι υπάρχει το πλεονέκτημα της συνεχούς λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται κυρίως για πρωτογενή θραύση και θεωρούνται οικονομικότεροι των θραυστήρων με σιαγόνες. Δεν ενδείκνυνται για υλικά με υγρασία λόγω του κινδύνου προσκόλλησης του υλικού στα τοιχώματα του θραυστήρα. Η παραγωγή τους είναι μεγαλύτερη από τους θραυστήρες με σιαγόνες, έχουν όμως το μειονέκτημα ότι παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες φθορές στην επένδυσή τους, αφού δεν έχουν και το πλεονέκτημα της αναστροφής των πλακών. (Λαμπρόπουλος Δ., 2007)

Θραυστήρες με κυλίνδρους (Roll crushers)

Στους θραυστήρες με κυλίνδρους (roll crushers, σχήμα 8) η θραύση γίνεται με συμπίεση της ουσίας μεταξύ δύο κυλίνδρων που περιστρέφονται ο ένας κοντά στον άλλο με αντίθετη φορά. Οι επιφάνειες των κυλίνδρων είναι λείες ή με δόντια και η απόσταση μεταξύ τους καθορίζεται από το μέγεθος των σωματιδίων της τροφοδοσίας και τις απαιτήσεις ως προς τη λεπτότητα του προϊόντος. Χρησιμοποιούνται κυρίως για θραύση υλικών με υγρασία και θεωρούνται ιδανικοί για προετοιμασία υλικού για υγρή άλεση. Επίσης χρησιμοποιούνται για θραύση τεμαχίων που είναι σχετικά ομοιόμορφα και έχουν ενδιάμεσο μέγεθος.



Σχήμα 7: Στρομβικός θραυστήρας



Σχήμα 8: Θραυστήρας με κυλίνδρους (διπλός και τριπλός)

2.4 ΠΡΟΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ

Η ομοιογένεια αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθόσον πολλές φορές το μείγμα των πρώτων υλών αποτελείται από τρία ή και τέσσερα συστατικά, τελείως διαφορετικής σύστασης. Εκτός από τις διαφορετικές ιδιότητες των επιμέρους συστατικών δεν είναι καθόλου σπάνιο να υπάρχουν διαφορές από παρτίδα σε παρτίδα και των ίδιων υλικών λόγω των εναλλαγών της σύστασης των στρωμάτων κατά τη λατόμηση, όπου με την πρόοδο της απαντώνται διαφοροποιήσεις στη χημική και ενίοτε και στην ορυκτολογική σύσταση τόσο του ασβεστόλιθου όσο και της αργίλου. Ενώ τα παλαιότερα χρόνια, εάν συνέβαινε κάτι τέτοιο, το πιθανότερο θα ήταν να μην χρησιμοποιούνταν το ακατάλληλο κοίτασμα, σήμερα με τη σημαντική αύξηση της δυναμικότητας των βιομηχανιών και τις προσπάθειες για εξοικονόμηση πρώτων υλών, η εκλεκτική εκμετάλλευση των λατομείων είναι τελείως αντισυμβαλλόμενη. Στην περίπτωση αυτή το ακατάλληλο κοίτασμα, πού εφόσον γίνεται ορθολογική εκμετάλλευση του λατομείου θα προέρχεται από ένα μόνο από τα μέτωπά του, οδηγείται με μικρότερους ρυθμούς και αναμειγνύεται τόσο στην προομογενοποίηση με τα άλλα υλικά, όσο και κατά τη θραύση με το υλικό από τα άλλα μέτωπα. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

Μία επιπλέον ανάγκη που εξυπηρετείται με την προομογενοποίηση είναι αυτή της δημιουργίας αποθεμάτων πρώτων υλών σε διάφορα σημεία της παραγωγικής

διαδικασίας (όπως αντίστοιχα γίνεται και με την ομογενοποίηση) πριν από την έψηση, ώστε να μπορεί το εργοστάσιο να αντεπεξέλθει σε ενδεχόμενες ανωμαλίες που θα προκληθούν από σταματήματα στη λατόμευση ή στη θραύση, χωρίς να αναγκασθεί να σταματήσει η περιστροφική κάμινος, γεγονός που με κάθε τρόπο αποφεύγεται ή επιδιώκεται να γίνεται σε όσο το δυνατόν αραιότερα χρονικά διαστήματα, επειδή επιφέρει σοβαρά λειτουργικά προβλήματα. (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

2.4.1 Θεωρία της προομογενοποίησης

Η διαφορετική κοκκομετρία που παρουσιάζει το πέτρωμα σε σχέση με τη φαρίνα οριοθετεί και την, από τεχνολογικής άποψης, σημαντική διαφορά που παρουσιάζουν οι εγκαταστάσεις προομογενοποίησης από τις αντίστοιχες της ομογενοποίησης. Για την προομογενοποίηση η λύση είναι η δημιουργία επιμήκων σωρών από τα υλικά, όπου οι ποσότητες τοποθετούνται κατά στρώματα και παραλαμβάνονται κατά εγκάρσιες τομές σε φέτες, οπότε θεωρητικά κάθε φέτα αποτελείται από υλικό από όλα τα επιμέρους στρώματα του σωρού. Άρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 9, όσο περισσότερα είναι τα στρώματα τόσο αποτελεσματικότερη είναι η προομογενοποίηση, αφού μειώνεται η απόκλιση από τη μέση τιμή. (Peray K. E., Waddell J. J., 1972)

Θεωρητικώς, με βάση την παραπάνω παραδοχή, υψηλή απόδοση προομογενοποίησης μπορεί να επιτευχθεί με σημαντική αύξηση του αριθμού των στιβάδων, μειώνοντας αντίστοιχα το πάχος τους. Αυτό επιτυγχάνεται με ταχύτερη κίνηση του αποθέτη. Στην πράξη, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 9, δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιούνται λιγότερα από 50 ή περισσότερα από 500 στρώματα.

Για να εκτιμηθούν οι διαφορές στην έξοδο, χρησιμοποιείται ευρέως η σχέση (4) με βάση την περιεκτικότητα του μείγματος σε κάποιο συστατικό, συνήθως σε CaCO_3 για τη βιομηχανία τσιμέντου.

$$(4) S_x = S_a/N^{1,2}$$

όπου S_x : η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των παραλαμβανόμενων φετών,

S_a : η τυπική απόκλιση των μεταβολών της εισόδου, N: ο αριθμός των στιβάδων.

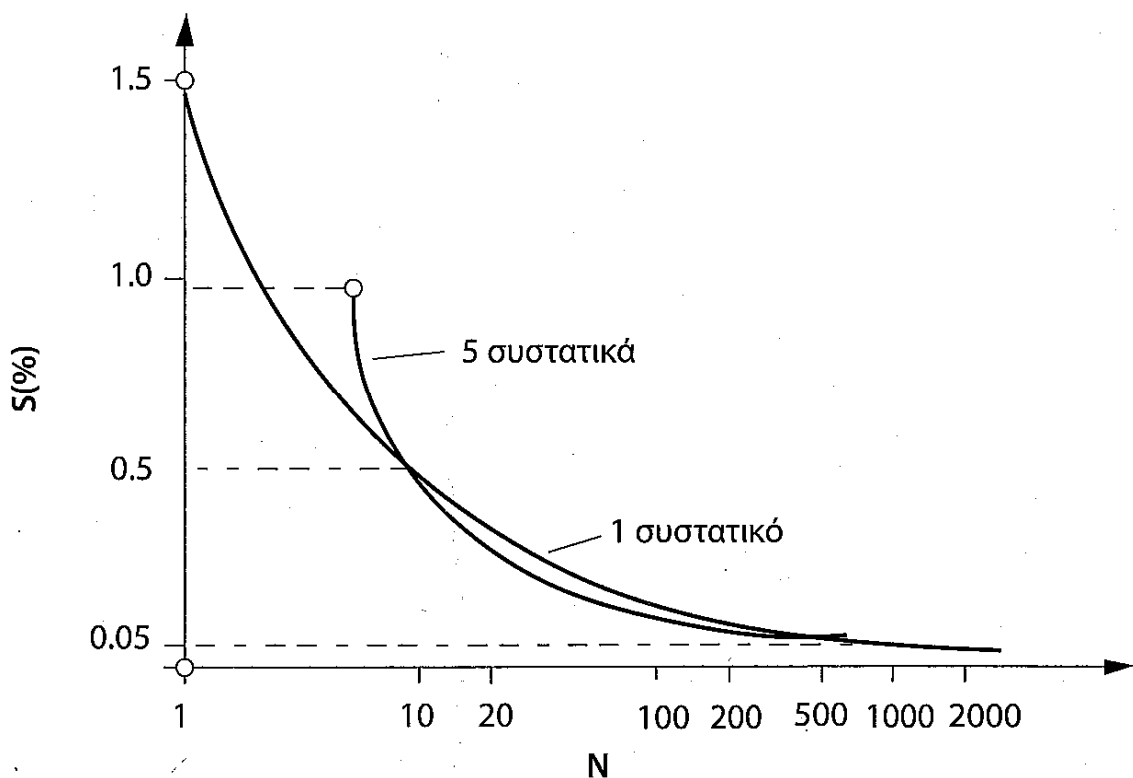
Η απόδοση της προομογενοποίησης (H) μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη σχέση (5):

$$H = S_a / S_b$$

όπου S_b : η τυπική απόκλιση των μεταβολών της εξόδου,

S_a : η τυπική απόκλιση των μεταβολών της εισόδου.

Μία διάταξη προομογενοποίησης που λειτουργεί σωστά πρέπει να επιτυγχάνει αποδόσεις της τάξης του 10. Αν δηλαδή το μείγμα εισέρχεται στη διάταξη με μία απόκλιση του 5% στο περιεχόμενο CaCO_3 (πχ $76.0 \pm 5.0\%$), τότε στο παραλαμβανόμενο υλικό η διαφορά αυτή μειώνεται στο 0.5% ($76.0 \pm 0.5\%$). Η καλύτερη τιμή που αναφέρεται βιβλιογραφικά είναι το $\pm 0.3\%$.



Σχήμα 9: Απόδοση ανάμειξης σε συνάρτηση με τον αριθμό των στιβάδων (S: τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή, N: αριθμός στιβάδων)

2.4.2 Συστήματα προομογενοποίησης

Η προομογενοποίηση των υλικών της τσιμεντοβιομηχανίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

α) Συνδυασμένη προομογενοποίηση όλων των συστατικών του μείγματος των πρώτων υλών.

β) Χωριστή προομογενοποίηση κάθε συστατικού και ανάμειξή τους στους μύλους.

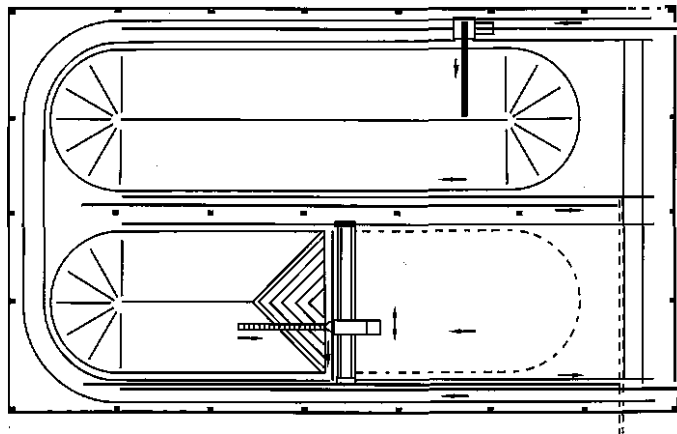
Κατά την πρώτη μέθοδο καθορίζεται η αναλογία των συστατικών του μείγματος πριν από τη δημιουργία του σωρού. Έτσι, κατά τη δημιουργία και απόληψη του σωρού αναμειγνύεται καλά η κάθε μία πρώτη ύλη. Υπάρχει όμως ο κίνδυνος, όταν η κοκκομετρική σύνθεση των υλικών είναι ανομοιόμορφη, να δημιουργούνται τοπικές διαφοροποιήσεις, που είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκλίσεις στη χημική σύσταση από το στόχο που έχει τεθεί. Βεβαίως πλεονεκτεί η μεθοδολογία αυτή όσον αφορά τον όγκο των μηχανημάτων, καθόσον στη δεύτερη περίπτωση απαιτούνται διπλές εγκαταστάσεις προομογενοποίησης. Παράλληλα και το λειτουργικό κόστος είναι μικρότερο και, εάν χρησιμοποιηθεί ένα κατάλληλο σύστημα απόθεσης, συνδυαζόμενο με εγκαταστάσεις αυτόματης δειγματοληψίας, ελέγχου και διόρθωσης της σύστασης του μείγματος, τότε είναι δυνατόν να προτιμηθεί. (Makashev, S.D., 1976)

Κατά τη χωριστή προομογενοποίηση, που κατά κανόνα χρησιμοποιείται περισσότερο στις τσιμεντοβιομηχανίες, τα υλικά αναμειγνύονται χωριστά. Η ανάμειξη των υλικών γίνεται στους μύλους φαρίνας και σε κατάλληλη αναλογία ώστε να ικανοποιηθούν οι αντίστοιχοι δείκτες.

Ως προς το σχήμα του σωρού διακρίνονται δύο κύρια είδη προομογενοποίησης που είναι: α) οι επιμήκεις σωροί (longitudinal stockpiles) με διάφορες επιμέρους παραλλαγές (σχήμα 10) και β) οι κυκλικοί σωροί (circular stockpiles). Η φιλοσοφία λειτουργίας των πρώτων είναι ότι απαιτούνται τουλάχιστον δύο σωροί εκ των οποίων ο ένας δημιουργείται με τη βοήθεια του αποθέτη, όπως αναλύεται στη συνέχεια, την ίδια περίοδο που ο άλλος καταναλώνεται με τη βοήθεια του παραλήπτη. Στους κυκλικούς σωρούς γίνεται συνεχής κυκλική απόθεση και παραλαβή κατά 120° με τα δύο μηχανήματα να κινούνται συνεχώς κυκλικά.

Αν και δεν υπάρχουν διαφορές ως προς την αποτελεσματικότητα των δύο τύπων σωρών, εν τούτοις οι κυκλικοί πλεονεκτούν στο ότι καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο, ενώ παράλληλα δεν έχουν το πρόβλημα της παραλαβής του άκρου του σωρού, που υπάρχει στους επιμήκεις, αφού η παραλαβή γίνεται συνεχώς προς την ίδια διεύθυνση. Οι επιμήκεις σωροί προτιμούνται για μεγάλες ποσότητες υλικών, ενώ έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι περισσότερο ελαστικοί σε ενδεχόμενες μεταβολές της δυναμικότητας της βιομηχανικής μονάδας, λόγω της δυνατότητας μεταβολής του μήκους του σωρού.

Η χωρητικότητα των μεν επιμηκών σωρών μπορεί να φθάσει τους 35000 t ο καθένας, των δε κυκλικών τους 50000 t. Η παροχή του υλικού είναι 1500 t/h στους επιμήκεις και 1200 t/h στους κυκλικούς. Αντίστοιχα οι ρυθμοί απόληψης είναι 500 και 750 t/h. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)



Σχήμα 10: Σωροί προομογενοποίησης, α: δημιουργία σωρού, β: κατανάλωση σωρού

2.4.3 Τεχνικές απόθεσης

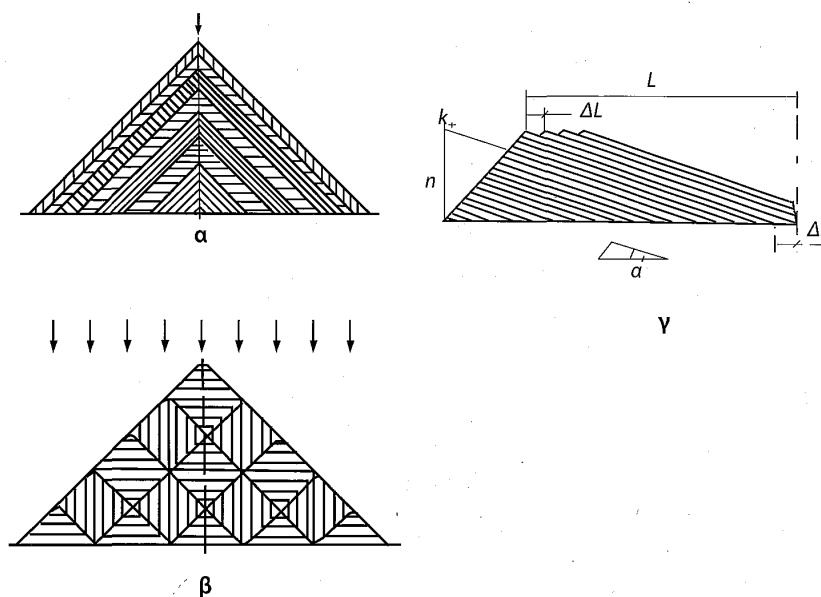
Τρεις τεχνικές χρησιμοποιούνται για την απόθεση του υλικού και τη δημιουργία του σωρού (Σχήμα 11)

Η μέθοδος Chevron, όπου το υλικό αποτίθεται στο μέσο του σωρού, κατά μήκος του μεγάλου οριζόντιου άξονά του. Όπως φαίνεται στο σχήμα 11α, με αυτόν τον τρόπο απόθεσης, το ένα στρώμα τίθεται πάνω στο άλλο και με ειδικό μηχανισμό ρυθμίζεται η ταχύτητα κίνησης της διάταξης απόθεσης. Η διαφορετική γραμμοσκίαση ανταποκρίνεται σε πρώτες ύλες διαφορετικής σύστασης. Το μειονέκτημα της

μεθόδου αυτής είναι ότι τα μεγάλα κομμάτια του υλικού ολισθαίνουν κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών και συγκεντρώνονται στο κατώτατο σημείο του σωρού δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό κοκκομετρικό διαχωρισμό του υλικού, ο οποίος με τη σειρά του επιφέρει διαφοροποιήσεις στη χημική σύσταση, αφού σε πολλά υλικά τα σωματίδια με μεγάλο μέγεθος έχουν διαφοροποιημένη σύσταση.

Η μέθοδος Windrow, (σχήμα 11β) όπου το υλικό αποτίθεται κατά μήκος περισσότερων αξόνων παράλληλων με τον κεντρικό άξονα του σωρού. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια κίνηση της διάταξης απόθεσης κατά δύο διευθύνσεις και αίρεται το μειονέκτημα της προηγούμενης μεθόδου, καθόσον τα μεγάλα κομμάτια εγκλωβίζονται στο εσωτερικό του σωρού.

Η μέθοδος Chevron, (σχήμα 11γ) που είναι όμοια με την πρώτη, με τη διαφορά ότι η κεραία του αποθέτη αντί να κινείται μόνο στον κεντρικό άξονα του σωρού κατά μήκος της «οροσειράς» αποκλίνει κατά μία ακτινωτή απόσταση AL εμπρός και πίσω. Με τη μέθοδο αυτή συχνά αντιμετωπίζονται τα προβλήματα που δημιουργούνται στα άκρα του σωρού. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

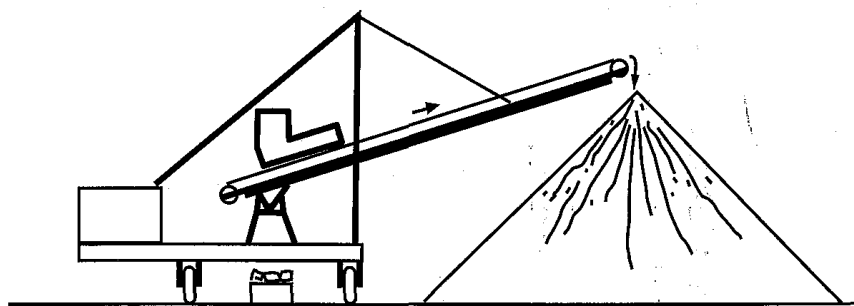


Σχήμα 11: Οι τρεις μέθοδοι απόθεσης: α. Chevron, β. Windrow, γ. Chevron

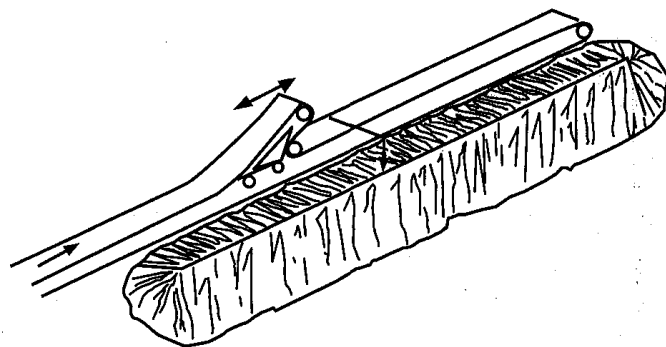
2.4.4 Μηχανήματα προομογενοποίησης

Το μηχάνημα δημιουργίας του σωρού λέγεται αποθέτης και είναι δυνατόν να είναι είτε μεταφορική ταινία (σχήμα 12β) κινούμενη κατά μήκος του σωρού επάνω από την εκάστοτε «οροσειρά» είτε διάταξη, όπως των σχημάτων 12α και 13, η οποία κινείται παράλληλα με το σωρό και αποθέτει το υλικό με τη βοήθεια κατάλληλης κεραίας απόθεσης.

Σε όλες τις περιπτώσεις ειδικές αυτόματες διατάξεις επιτυγχάνουν κάθε φορά την ανύψωση του σημείου πτώσης του υλικού επί του σωρού, ούτως ώστε αυτό να βρίσκεται λίγο ψηλότερα από το εκάστοτε ύψος του σωρού, για να αποφευχθεί η δημιουργία σκόνης. Με ειδικούς επίσης αυτοματισμούς ρυθμίζεται το σταμάτημα του αποθέτη στα άκρα του σωρού για ορισμένο χρονικό διάστημα, με σκοπό τη διαμόρφωση των άκρων αυτών. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

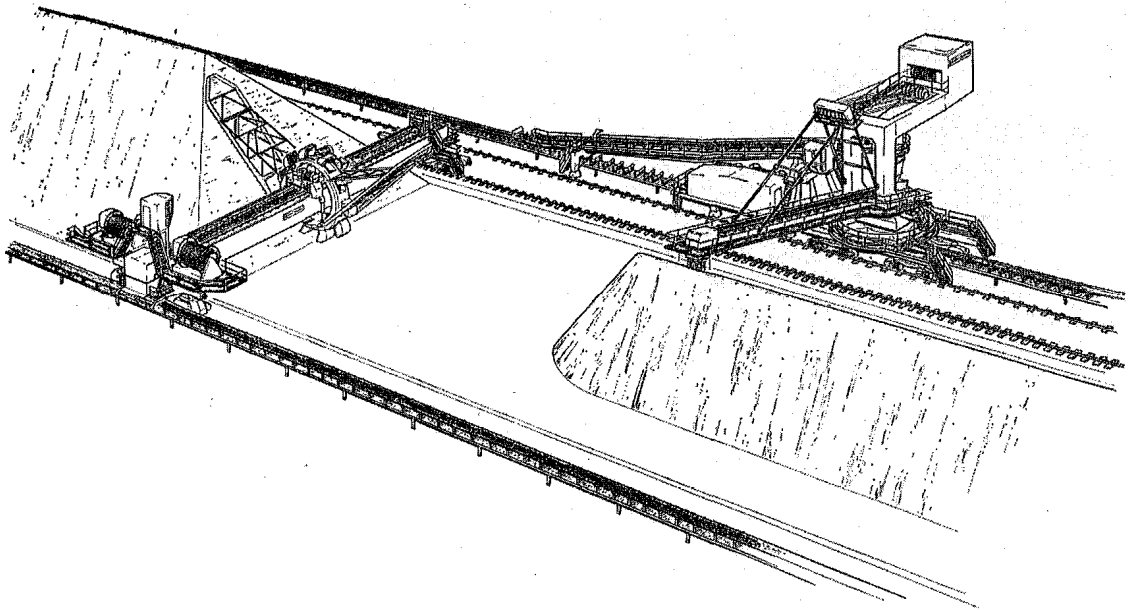


α



β

Σχήμα 12: Αποθέτες προομογενοποίησης: α. με κεραία απόθεσης, β. με μεταφορική ταινία



Σχήμα 13: Διάταξη προομογενοποίησης (αριστερά: παραλήπτης, δεξιά: αποθέτης)

Η παραλαβή του σωρού γίνεται σε «φέτες», εγκάρσια ως προς τον τρόπο απόθεσης, ούτως ώστε κάθε παραλαμβανόμενη φέτα να περιέχει υλικό από όλα τα στρώματα, πετυχαίνοντας με αυτόν τον τρόπο τους στόχους της ανάμειξης. Η διάταξη παραλαβής του υλικού καλείται παραλήπτης και αποτελείται από μία διάταξη απόξεσης του υλικού σε ρυθμιζόμενο πάχος και από έναν καδοφόρο τροχό παραλαβής του υλικού και απόρριψής του στη συνέχεια σε μία μεταφορική ταινία (σχήμα 13).

Ενδεικτικές ταχύτητες του αποθέτη και του παραλήπτη είναι 35 m/min και 0.25, m/min αντίστοιχα. (Peray K. E., Waddell J. J., 1972)

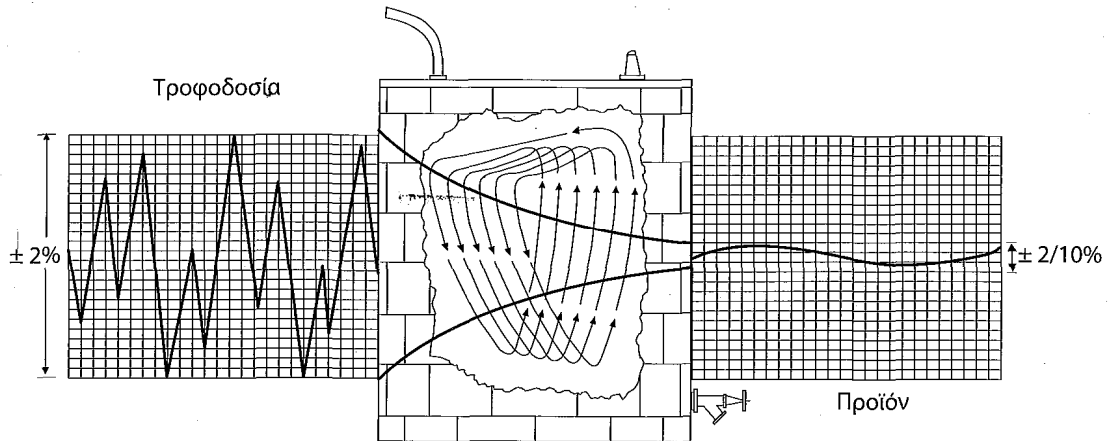
2.4.5. Ομογενοποίηση

Για την παραγωγή του τσιμέντου με την ξηρή μέθοδο είναι απαραίτητη η περαιτέρω ομογενοποίησή του, εκτός δηλαδή αυτής που υφίσταται με την προομογενοποίηση και με την άλεση της φαρίνας. Η διαδικασία αυτή είναι περιττή στην υγρή μέθοδο όπου η ανάμειξη επιτυγχάνεται στις δεξαμενές ανάδευσης του πολτού.

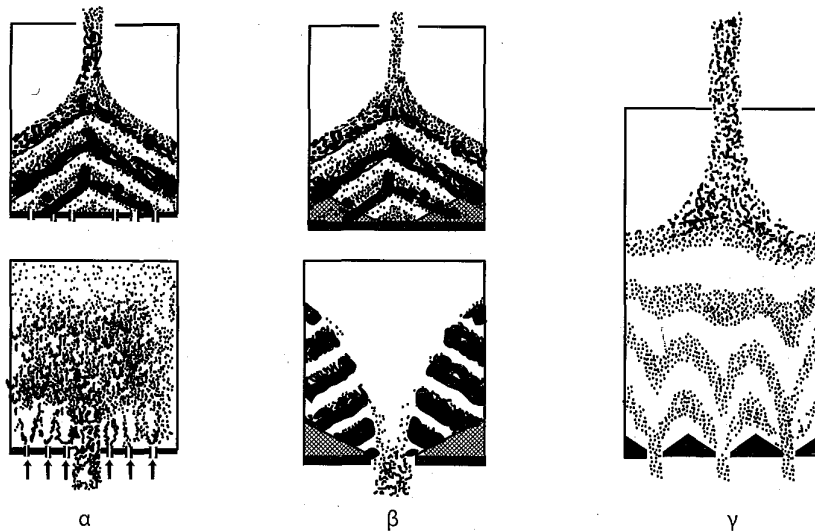
Η ομογενοποίηση επιτυγχάνεται με την εμφύσηση αέρα από τον πυθμένα των σιλό ανάμειξης. Ο αέρας περνάει μέσα από κατάλληλες πορώδεις κεραμικές πλάκες και τα δημιουργούμενα λεπτά ρεύματα προκαλούν την ανάμειξη της φαρίνας. Υπάρχουν διάφορα συστήματα ομογενοποίησης που στηρίζονται στην παραπάνω αρχή και διαφοροποιούνται στον τρόπο με τον οποίο διαιρείται ο πυθμένας για την εμφύσηση του αέρα. Το πιο γνωστό σύστημα είναι της εταιρείας Fuller, και σύμφωνα με αυτό ο πυθμένας χωρίζεται σε 4 μέρη και ο προσαγόμενος αέρας διαιρείται σε δύο ροές εκ των οποίων η μία που είναι το 75% του συνολικού αέρα οδηγείται στο ένα τεταρτημόριο, ενώ η άλλη (25% του αέρα) μοιράζεται στα υπόλοιπα τρία τεταρτημόρια. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται δύο στήλες αέρα με διαφορά πυκνότητας η μία από την άλλη. Εξαιτίας αυτής της διαφοράς πυκνότητας το βαρύτερο υλικό πέφτει μέσα στο ελαφρύ και αναμειγνύεται. Εναλλάσσοντας κατά διαστήματα το τεταρτημόριο στο οποίο οδηγείται το 75% του αέρα, επιτυγχάνεται η αναμόχλευση και ομογενοποίηση όλης της ποσότητας της φαρίνας που περιέχεται στα σιλό. Σε μερικές περιπτώσεις η ροή του αέρα δεν είναι συνεχής αλλά διακοπτόμενη και έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός ανάμειξης. (Τσιμας Μ., 2005)

Ο αέρας και οι ενεργειακές απαιτήσεις για την ομογενοποίηση του μείγματος των πρώτων υλών εξαρτώνται από τις μεταβολές της σύστασης του μείγματος και από την επιθυμητή ποιότητα του μείγματος. Στο σχήμα 32 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ της απόκλισης από το στόχο που έχει τεθεί πριν από και μετά την αναμόχλευση. Συνήθως ως στόχος τίθεται η % περιεκτικότητα του μείγματος σε CaCO_3 , το δε σύστημα της Fuller που προαναφέρθηκε επιτυγχάνει μειώσεις από 2% σε 0.2%.

Όταν οι διακυμάνσεις στην ποιότητα της φαρίνας δεν είναι μεγάλες, μπορεί να εφαρμοσθεί ομογενοποίηση χωρίς τη χρήση ανάδευσης με αέρα. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η φαρίνα πέφτοντας μέσα στα σιλό ομογενοποίησης δημιουργεί κωνικά στρώματα, που καθένα ενδεχομένως να έχει διαφορετική ποιότητα υλικού. Όταν το σιλό γεμίσει, αρχίζει η εκκένωσή του από ένα ή περισσότερα σημεία του πυθμένα του. Κατά την εκκένωση δημιουργείται το φαινόμενο του χωνιού (σχήμα 33), με αποτέλεσμα την ανάμειξη των στρωμάτων και την ομογενοποίηση της φαρίνας. Στην τελευταία περίπτωση το σιλό ομογενοποίησης βρίσκεται πάνω από το σιλό αποθήκευσης της φαρίνας, ενώ στην ανάμειξη με αέρα μπορεί να βρίσκεται είτε πάνω είτε δίπλα σε αυτό. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)



Σχήμα 32: Διακύμανση της περιεκτικότητας της φαρίνας σε CaCO_3 πριν από και μετά την αναμόχλευση



Σχήμα 33: Διάφορα συστήματα ομογενοποίησης (α: με αναμόχλευση με αέρα, β: με τη δημιουργία χωνιού γ: με τη δημιουργία πολλαπλών χωνιών)

Η φαρίνα για να τροφοδοτηθεί στην κάμινο βγαίνει από τον πυθμένα των σιλό αποθήκευσης από θυρίδες, ο αριθμός των οποίων κυμαίνεται από τέσσερις έως επτά ή και περισσότερες ανάλογα με το μέγεθος του σιλό.

Κατά μία άλλη τεχνική ομογενοποίησης, υπάρχει σε σειρά μία συστοιχία κανονικών σιλό (συνήθως 6), στα οποία το προς ανάμειξη υλικό τροφοδοτείται συνεχώς αλλά με διαφοροποιημένο ποσοστό πλήρωσης. Η ανάμειξη επιτυγχάνεται με κοινή απόληψη από τους πυθμένες όλων των σιλό. (Κολοβός Κ., ΤΕΕ, 2003)

3 ΑΛΕΣΗ ΦΑΡΙΝΑΣ

3.1 Η ΑΛΕΣΗ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η άλεση μαζί με τη θραύση είναι τα δύο βασικά στάδια της ελάττωσης μεγέθους των διαφόρων στερεών σωμάτων. Κύριο γνώρισμα των σταδίων αυτών είναι το γεγονός ότι με προσφορά ορισμένου ποσού ενέργειας επιτυγχάνεται εύκολα ή δύσκολα μία συνεχής κατάτμηση του υλικού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων επιφανειών. Ενώ στη θεωρία της κατάτμησης των στερεών πολλές φορές περιλαμβάνεται και ο θρυμματισμός, ως ενδιάμεσο στάδιο ελάττωσης μεγέθους, στη βιομηχανία τσιμέντου, με την κατάλληλη επιλογή των μηχανημάτων θραύσης και άλεσης, το στάδιο αυτό έχει απαλειφθεί. Όπως αναφέρθηκε στο με τη χρήση θραυστήρων με σφυριά επιτυγχάνεται, λόγω της ενσωματωμένης εσχάρας, μεγάλος βαθμός απομείωσης μεγέθους και έτσι το προϊόν των θραυστήρων κυμαίνεται περί τα 100 mm, μέγεθος που άνετα αποτελεί τροφοδοσία για τα συστήματα άλεσης. Τα μηχανήματα άλεσης λοιπόν τροφοδοτούνται με κόκκους διαστάσεων της τάξης των 100 mm και παρέχουν προϊόν που, ανάλογα με την περίπτωση, μπορεί και όλο να είναι μικρότερο των 90 mm, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του είναι πολύ λεπτότερο. Η βασική, επιπλέον του μεγέθους, διαφορά των δύο διεργασιών είναι ότι ενώ για τη θραύση η απαιτούμενη ενέργεια είναι σχετικά μικρή, η άλεση αντίθετα απαιτεί μεγάλα ενεργειακά ποσά που μπορεί να φθάσουν έως και το 50πλάσιο αυτών που απαιτούνται για τη θραύση. Δεδομένου μάλιστα ότι η απόδοσή της είναι εξαιρετικά μικρή και δεν υπερβαίνει το 5%, είναι προφανής η μεγάλη προσοχή με την οποία πρέπει να αντιμετωπίζονται τα θέματα της άλεσης. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Στη βιομηχανία τσιμέντου η άλεση είναι η, αμέσως μετά την έψηση, πιο σημαντική διεργασία. Η σπουδαιότητά της φαίνεται και από το γεγονός ότι συμμετέχει δύο φορές στο κύκλωμα της παραγωγικής διαδικασίας. Οι στόχοι που επιδιώκονται είναι διαφορετικοί για την άλεση του μείγματος 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 επιτάχυνση στη συνέχεια των αντιδράσεων στην περιστροφική κάμινο. Κατά την άλεση του τσιμέντου η λεπτότητα άλεσης αφενός μεν επιδρά στο ρυθμό ανάπτυξης των αντοχών, αφετέρου δε ενεργοποιεί την επιφάνεια

των δημιουργούμενων νέων σωματιδίων. Στην ενεργοποίηση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο η ενυδάτωση και σκλήρυνση του τσιμέντου.

Η άλεση, αν και συμμετέχει περίπου στο 7-10% της ενέργειας που συνολικά καταναλίσκεται από μία βιομηχανία τσιμέντου, εντούτοις καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό (περίπου 65%) της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Από αυτή το μεγαλύτερο ποσοστό (60-65%) δαπανάται για την άλεση του τσιμέντου. Λαμβάνοντας υπόψη την ετήσια παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα (περίπου 16 εκατομμύρια τόνοι το 2010) και μια ενδεικτική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις διατάξεις άλεσης του τσιμέντου και του μείγματος των πρώτων υλών (35 kWh/t και 15 kWh/t αντίστοιχα) προκύπτει μια ετήσια κατανάλωση $920 \cdot 10^6$ kWh. Το γεγονός αυτό, όπως και ότι το 5% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί στις διατάξεις ελάττωσης μεγέθους, αρκεί για να δικαιολογήσει τις πολλές ερευνητικές προσπάθειες που γίνονται στον τομέα αυτό.

Η αντιμετώπιση των θεμάτων άλεσης στα πλαίσια του παρόντος βιβλίου θα έχει την εξής διάρθρωση. Θα αναφερθούν σε ενιαία μορφή όλα τα γενικά για την άλεση και τους σφαιρόμυλους που είναι από τα πλέον αντιπροσωπευτικά είδη μύλων για την άλεση της φαρίνας και ειδικότερα του τσιμέντου. Σε ειδική παράγραφο (3.9) θα επισημανθούν οι διαφορές ανάμεσα στις δύο αυτές διεργασίες και θα τονιστούν τα ιδιαίτερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν κατά την άλεση της φαρίνας. Οι κάθετοι μύλοι (roller mills) επίσης αποτελούν παράγραφο του κεφαλαίου αυτού (3.8), καθόσον η αρχική σχεδίαση και εφαρμογή τους ήταν για την άλεση της φαρίνας. Στο πλαίσιο της αντιμετώπισης της άλεσης του τσιμέντου, θα αναφερθούν οι τεχνολογικές εξελίξεις που αφορούν αποκλειστικά στην άλεση του τσιμέντου. Έτσι, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει λεπτομερής αναφορά για τις νέες γενιές διαχωριστών καθώς και για τα κυκλώματα άλεσης με τις κυλινδρόπρεσες που χρησιμοποιούνται για την προάλεση του κλίνκερ. (Μαραγκός Γ., 1995)

3.2 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΛΕΣΗΣ

Η διαχείριση μιας μονάδας άλεσης γίνεται με στόχο την αριστοποίηση της λειτουργίας της, έτσι ώστε με δεδομένη ποιότητα παραγόμενου προϊόντος (η ποιότητα στην προκειμένη περίπτωση χαρακτηρίζεται από τη λεπτότητα του προϊόντος) να μεγιστοποιηθεί η δυναμικότητά της και να ελαχιστοποιηθεί η

κατανάλωση ενέργειας. Σε περίπτωση όπου για μια διάταξη έχει βρεθεί η ιδανική κατάσταση λειτουργίας, εξαντλούνται περίπου και οι δυνατότητες περαιτέρω εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι σταδιακά τα τελευταία χρόνια οι ερευνητικές προσπάθειες στο χώρο της άλεσης του τσιμέντου στρέφονται σε άλλους τομείς, γεγονός που μαρτυρά ότι ο βαθμός εκμετάλλευσης τουλάχιστον των συμβατικών μηχανημάτων (σφαιρόμυλοι, διαχωριστές) από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας έχει φθάσει σε έναν οριακό βαθμό. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Τρεις είναι επομένως οι βασικοί στόχοι που πρέπει να επιδιώκονται από μία εγκατάσταση άλεσης:

i) Σταθερότητα στην ποιότητα του προϊόντος (a_m) ή καλύτερα ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων: $a_m = \text{const}$ ή $(a_{m,i} - a_m) \rightarrow \min$

ii) Ελαχιστοποίηση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας: $(q / M_m) \rightarrow \min$

γεγονός που ισοδυναμεί είτε με μεγιστοποίηση της δυναμικότητας του μηχανήματος ($M_m \rightarrow \max$) είτε με ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας ($q \rightarrow \min$).

iii) Βαθμός απόδοσης (a) όσο το δυνατό μεγαλύτερος: $a \rightarrow \max$

Οι παραπάνω στόχοι δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και ως εκ τούτου δεν είναι δυνατό να αντιμετωπισθεί μεμονωμένα η ικανοποίησή τους. Πρέπει να μελετηθεί το σύνολο των παραγόντων που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα καθέναν από αυτούς και στη συνέχεια να εξαχθούν συμπεράσματα που θα αφορούν στις επιμέρους επεμβάσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν στη διάταξη άλεσης για να γίνει η αριστοποίησή της.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα τμήματα άλεσης είναι τα πιο ενεργειοβόρα τμήματα ενός εργοστασίου τσιμέντου όσον αφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσης είναι εξαιρετικά μικρός και σπάνια υπερβαίνει το 5%. Έτσι ένα κλίνκερ, που θεωρητικά απαιτεί 1.65 kWh/t, στην πράξη φθάνει να απαιτεί περίπου 40 kWh/t προκειμένου να αλεσθεί στην ίδια λεπτότητα. Τούτο συμβαίνει διότι η προσφερόμενη ενέργεια κατά σημαντικά μεγάλο ποσοστό μετατρέπεται σε θερμότητα και χάνεται ως θερμικό περιεχόμενο του προϊόντος, ως θερμικό περιεχό-

μενο του αέρα που κυκλοφορεί μέσα στο μύλο και υπό μορφή ακτινοβολίας μέσω του κελύφους του μύλου. Μικρότερα ποσοστά χάνονται ως ηχητική ενέργεια, από τις τριβές στον κινητήρα και στο μειωτή ή ως άλλες μορφές ενέργειας. Η ακριβής απόδοση υπολογίζεται με την πραγματοποίηση θερμικού ισοζυγίου είτε στο μύλο είτε σε ολόκληρο το κύκλωμα άλεσης. Η κατάστρωση του θερμικού ισοζυγίου πραγματοποιείται με ειδικά προγράμματα Η.Υ., καθόσον στο πρόβλημα υπεισέρχονται περίπου 30 μεταβλητές. Με το θερμικό ισοζύγιο ελέγχεται πώς κατανέμεται η επιπλέον ενέργεια. Έτσι είναι δυνατόν να ελεγχθούν μερικές βασικές παράμετροι της άλεσης και οι πληροφορίες που λαμβάνονται από αυτό, συνεκτιμώμενες με τα στοιχεία που λαμβάνονται από την εξέταση των στόχων που προαναφέρθηκαν, κατευθύνουν επιτυχώς τις προσπάθειες αριστοποίησης των διατάξεων άλεσης φαρίνας και τσιμέντου. Ιδιαίτερα μέσω ενός θερμικού ισοζυγίου λαμβάνονται χρήσιμες πληροφορίες, μεταξύ άλλων, για τα εξής στοιχεία:

- Απαιτούμενα θερμικά ποσά για την απομάκρυνση της υγρασίας των πρώτων υλών.
- Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες μέσα στο μύλο για τον έλεγχο της ψευδούς πήξης.
- Απαιτούμενες ποσότητες αέρα για τον αερισμό της εγκατάστασης.
- Έλεγχος του σημείου δρόσου στα διάφορα σημεία της εγκατάστασης.
- Υπολογισμός ψεκαζόμενης ποσότητας νερού για έλεγχο αρχικής φάσης ενυδάτωσης.

Υπολογισμός θερμικών απωλειών από ακτινοβολίες. (Μαραγκός Γ., 1995)

3.3 ΑΝΟΙΚΤΟ ΚΑΙ ΚΛΕΙΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Οι διατάξεις άλεσης, κατατασσόμενες από την απλούστερη προς την πιο σύνθετη, είναι δυνατόν να διαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Διατάξεις διακοπτόμενης λειτουργίας (batch)
- Διατάξεις ανοικτού κυκλώματος (open circuit)
- Διατάξεις κλειστού κυκλώματος (closed circuit)

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν διατάξεις στις οποίες η προς άλεση ουσία εισάγεται στο μύλο, αλέθεται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα ανάλογα με την επιδιωκόμενη λεπτότητα και στη συνέχεια εξάγεται προκειμένου να εισέλθει άλλη και να επαναληφθεί ο ίδιος κύκλος. Η κατηγορία αυτή δεν απαντάται στις βιομηχανίες τσιμέντου, καθώς δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις μεγάλες δυναμικότητες που επιζητούνται από τους μύλους. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

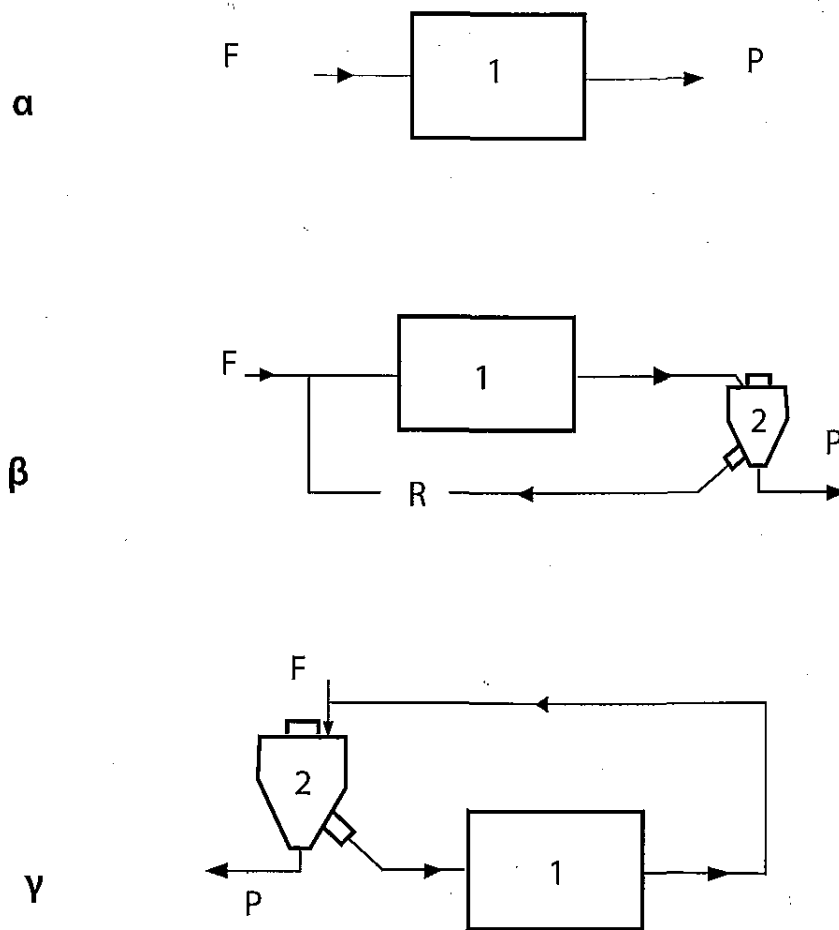
Στη διάταξη ανοικτού κυκλώματος υπάρχει μία συνεχής δίοδος του υλικού μέσα από το μύλο. Όπως φαίνεται στο (σχήμα 14α), στο ανοικτό κύκλωμα η άλεση ολοκληρώνεται με μια διέλευση του υλικού μέσα από το μύλο σε αντίθεση με την απλή μορφή κλειστού κυκλώματος (σχήμα 14β), όπου το προϊόν της άλεσης του μύλου οδηγείται σε ένα διαχωριστή όπου και διαμοιράζεται σε χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο κλάσμα. Το δεύτερο αποτελεί το τελικό προϊόν της άλεσης, ενώ το χονδρόκοκκο επιστρέφει στο μύλο για συμπληρωματική άλεση. Στα κλειστά κυκλώματα υπάγονται και τα αντίστροφα κλειστά κυκλώματα (reverse closed systems), τα οποία ακολουθούνται όταν η τροφοδοσία έχει ένα σημαντικό ποσοστό ήδη λεπτόκοκκου υλικού. Στα συστήματα αυτά, όπως φαίνεται στο (σχήμα 14γ), η νεοεισαγόμενη στο σύστημα τροφοδοσία διέρχεται πρώτα από το διαχωριστή, στον οποίο απομακρύνεται το ήδη λεπτό κλάσμα και παραλαμβάνεται ως τελικό προϊόν.

Όπως γίνεται αντιληπτό, με τον όρο «διάταξη άλεσης» δε νοείται μόνο ο μύλος αλλά ένα σύνολο βοηθητικών μηχανημάτων, που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία του λεπτού προϊόντος (σχήμα 15). Στο σύνολο αυτών των μηχανημάτων περιλαμβάνονται διατάξεις προσαγωγής και απαγωγής του υλικού, διατάξεις αερισμού ή ψεκασμού του μύλου με νερό καθώς και διατάξεις αποκονίωσης. Ειδικότερα στις περιπτώσεις κλειστών κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στη βιομηχανία τσιμέντου, προστίθεται στα μηχανήματα αυτά και ο διαχωριστής. Τα βοηθητικά μηχανήματα ενός κλειστού κυκλώματος άλεσης απαιτούν μία επιπρόσθετη ενέργεια της τάξης του 15-20% σε σχέση με αυτή που δαπανάται μέσα στο μύλο.

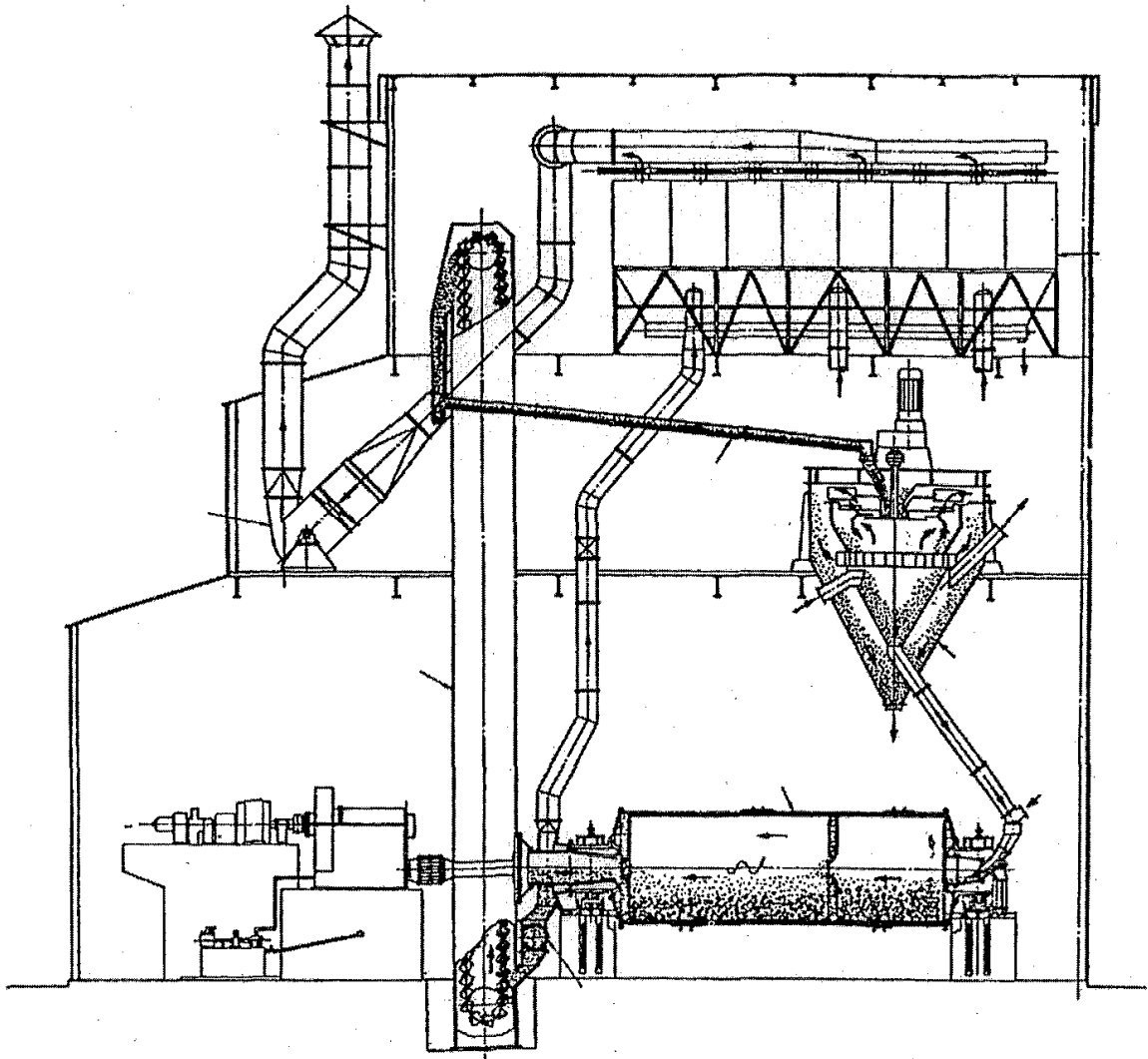
Κατά κανόνα η άλεση στο κλειστό κύκλωμα συνεπάγεται δίοδο του χονδρόκοκκου υλικού περισσότερες από μία φορές μέσα από το μύλο, σε αντίθεση με το λεπτόκοκκο κλάσμα που διαχωρίζεται στο διαχωριστή και αποφεύγεται με τον τρόπο

Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου

αυτό η περαιτέρω άλεση των κόκκων που έχουν ήδη την επιθυμητή λεπτότητα. Παράλληλα υποβοηθείται μέσα στο μύλο η εκλεκτική άλεση των μεγαλύτερων τεμαχίων. (Γαζιδέλλη Β., 2007)



Σχήμα 14: Διάφορα συστήματα άλεσης, α: ανοικτό κύκλωμα, β: κλειστό κύκλωμα, γ: αντίστροφο κύκλωμα, 1: σφαιρόμυλος, 2: διαχωριστής, F: τροφοδοσία, P: προϊόν, R: επιστροφές



Σχήμα 15: Διάταξη άλεσης ολοκληρωμένου κλειστού κυκλώματος τσιμεντοβιομηχανίας.

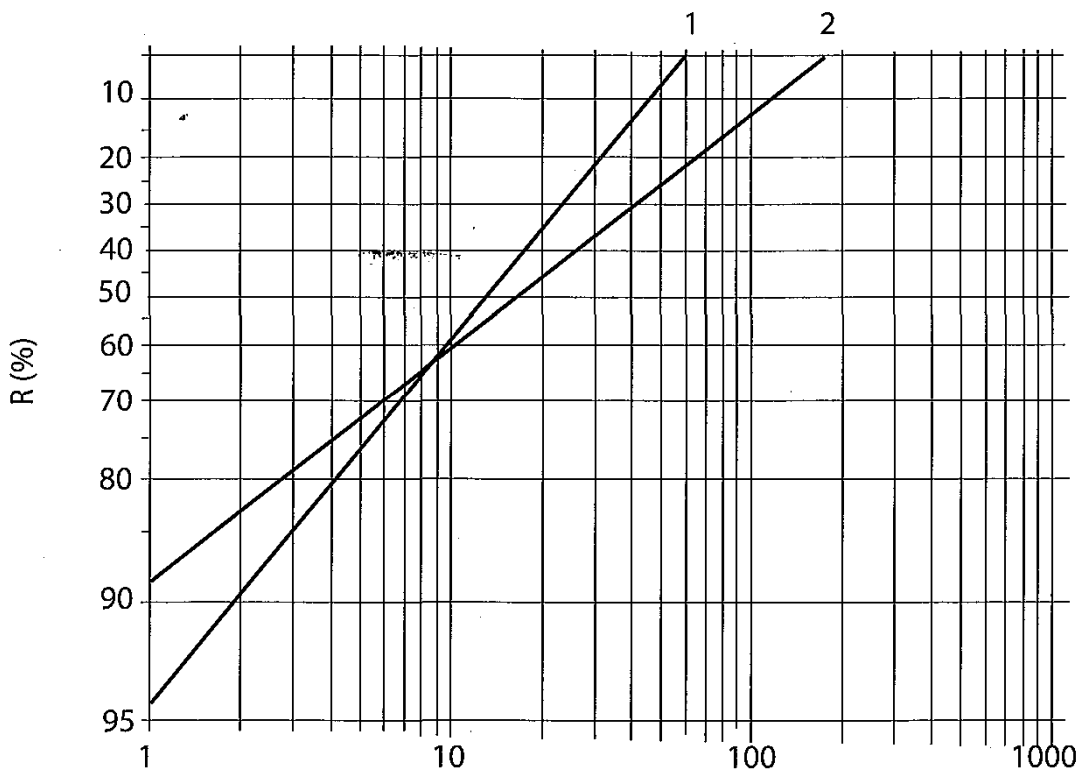
Το τελικό προϊόν των κλειστών κυκλωμάτων άλεσης χαρακτηρίζεται από στενό κοκκομετρικό φάσμα (συντελεστής ομοιομορφίας κατανομής Rosin-Rammler $n=0.99$), σε αντίθεση με το κοκκομετρικό φάσμα του προϊόντος από ανοικτό κύκλωμα που είναι αρκετά ευρύ ($n=0.65$), όπως φαίνεται και στο σχήμα 16.

Η κυκλοφορία του υλικού από το μύλο προς το διαχωριστή, που πάντοτε τοποθετείται σε υψηλότερο σημείο από το μύλο, γίνεται είτε με σύστημα αναβατορίων (bucket elevators) είτε με πνευματική μεταφορά (air slides). Αντιθέτως, η κυκλοφορία από το διαχωριστή προς το μύλο γίνεται με τη βαρύτητα.

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

Αποφασιστικής σημασίας μέγεθος για τα κλειστά κυκλώματα άλεσης είναι το **κυκλοφορούν φορτίο** μύλου (circulated load-cl), που ορίζεται ως το πηλίκο της ποσότητας (χονδρόκοκκο κλάσμα) που επιστρέφει προς το μύλο (R) προς τη νεοεισαγόμενη στο μύλο ποσότητα (F), η οποία προφανώς είναι ίση με το λεπτόκοκκο κλάσμα που αποτελεί το τελικό προϊόν του συστήματος άλεσης (σχήμα 14β). (Μαγκανάρη Κ., 2002)

$$cl = R/F \quad (6)$$



Σχήμα 16: Κατανομή Rosin-Rammler προϊόντων κλειστού (1) και ανοικτού (2) κυκλώματος άλεσης κλίνκερ

Όσο το κυκλοφορούν φορτίο λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, τόσο το τελικό προϊόν είναι περισσότερο λεπτόκοκκο, καθόσον επιστρέφει μεγαλύτερη ποσότητα για συμπληρωματική άλεση (Πίνακας 3) Στην περίπτωση αυτή μειώνεται η παραγωγή

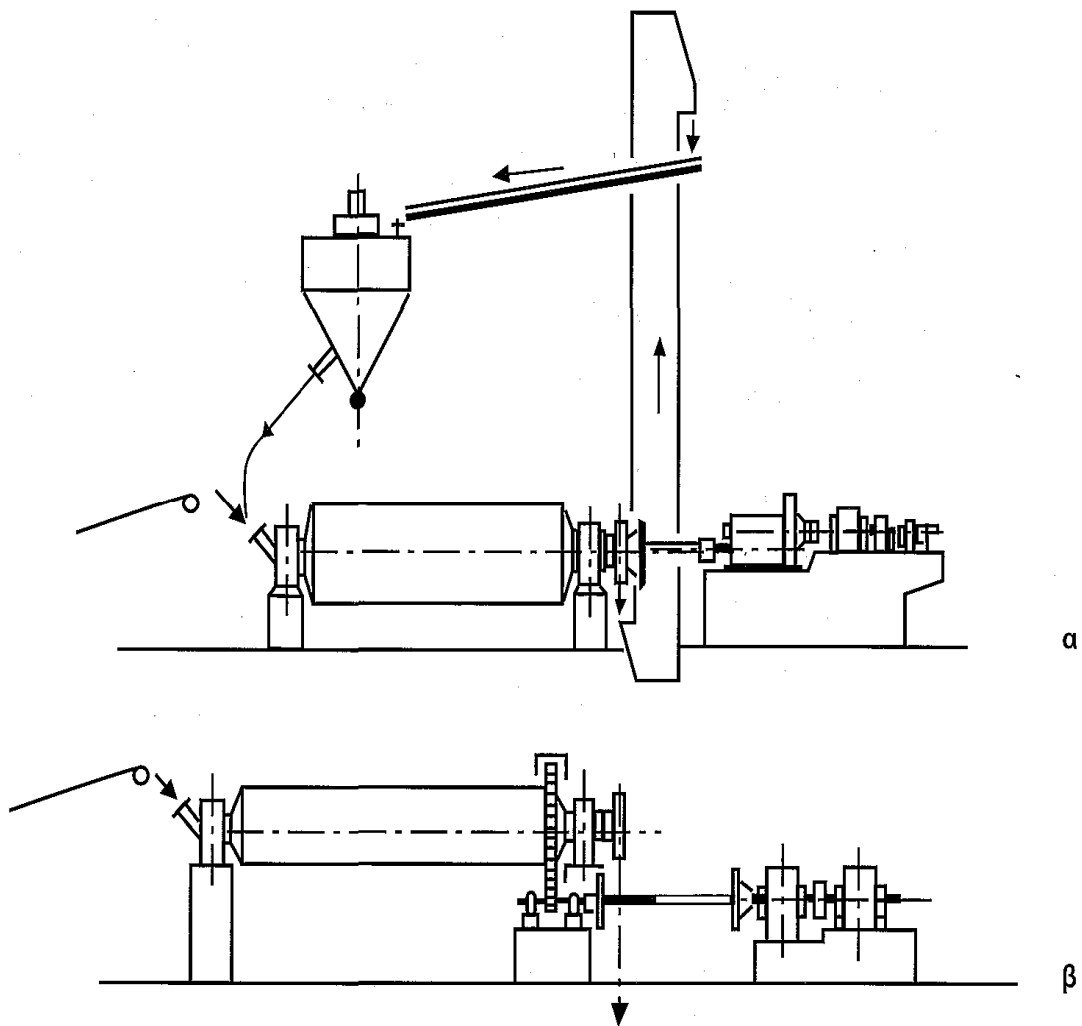
Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου του συγκροτήματος άλεσης, ενώ αντίστοιχα αυξάνεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας, όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στον ίδιο πίνακα.

Πίνακας 3: Συσχέτιση ειδικής επιφάνειας δυναμικότητας, κατανάλωσης ενέργειας και κυκλοφορούντος φορτίου

Κυκλοφορούν φορτίο (9'ο)	Ειδική επιφάνεια (cm ² /g)	Παραγωγή ή (t/h)	Ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/t)
200	2500	115	31
250	2900	90	39
300	3400	70	50

3.4 ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟΙ

Το βασικό μηχάνημα μιας διάταξης άλεσης είναι ο μύλος. Υπάρχουν πολλά είδη μύλων, που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει επειδή τα διάφορα υλικά δεν αλέθονται όλα με τον ίδιο τρόπο. Έτσι, άλλα υλικά απομειώνονται σε μέγεθος με κρούση, άλλα με κοπή, άλλα με τριβή, άλλα με σύνθλιψη κ.λπ. Στο χώρο της βιομηχανίας τσιμέντου έχει βρεθεί ότι ο καλύτερος τρόπος για την άλεση τόσο των πρώτων υλών όσο και του κλίνκερ είναι η δράση δυνάμεων κρούσης και τριβής. Με βάση το δεδομένο αυτό παραδοσιακά προτιμώνται οι σφαιρόμυλοι, οι οποίοι για τα συγκεκριμένα αυτά υλικά επιτυγχάνουν το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα με τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια (από το 1975) ολοένα και περισσότερο χρησιμοποιούνται οι κάθετοι μύλοι ή μύλοι περιστρεφόμενων τροχών (roller mills), οι οποίοι, ενώ αρχικά είχαν εφαρμογή μόνο για την άλεση της φαρίνας, χρησιμοποιούνται σε μικρό πάντως βαθμό και για την άλεση του τσιμέντου. Τέλος, από τη δεκαετία του 1990 η άλεση του κλίνκερ σε πολλές μονάδες τροποποιείται με την εισαγωγή της κυλινδρόπρεσας, που χρησιμοποιείται ως στάδιο προάλεσης και συντελεί αποφασιστικά στην ικανοποίηση των στόχων που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3.2. Το παρόν κεφάλαιο όπως και τα τρία επόμενα αφορούν στους σφαιρόμυλους, των οποίων η παρουσία αναμένεται για πολλά χρόνια ακόμα να είναι σημαντική στη βιομηχανία τσιμέντου. (Μαραγκός Γ., 1995)



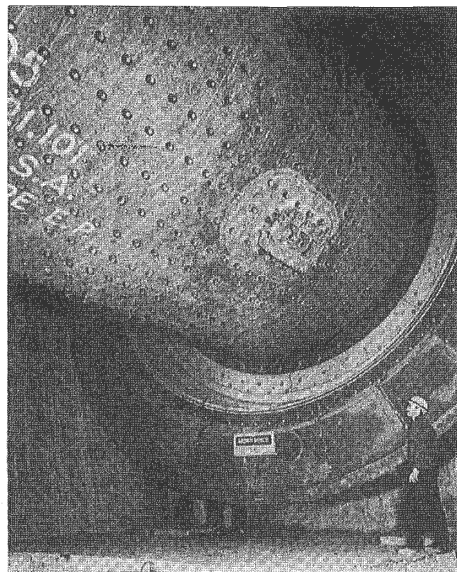
Σχήμα 17: Σφαιρόμυλοι (α) και σωληνωτοί μύλοι (β)

Οι σφαιρόμυλοι είναι κυλινδρικοί χαλύβδινοι θάλαμοι που μπορούν να περιστρέφονται γύρω από ένα οριζόντιο άξονα. Οι διαστάσεις τους ποικίλλουν ανάλογα με το είδος άλεσης που πρόκειται να εκτελέσουν. Μύλοι που χρησιμεύουν για προκαταρκτική άλεση είναι συνήθως μεγάλης διαμέτρου και μικρού μήκους (Ball mills - $D:L \sim 1:2$) (σχήμα 17α), σε αντίθεση με τους μύλους που χρησιμεύουν για τελική άλεση και που είναι μεγάλου μήκους και μικρής διαμέτρου (Tube mills - $D:L \sim 1:3-1:4$) (σχήμα 17β). Στους μύλους του σχήματος 17 ο σφαιρόμυλος λειτουργεί σε κλειστό κύκλωμα, ενώ ο σωληνωτός μύλος λειτουργεί σε ανοικτό κύκλωμα. (Παπαγεωργίου Δ., Θεολόγος Φ., Τέας Χ., Χανιωτάκης Ε., ΤΕΕ, 2007)

Οι χρησιμοποιούμενοι μύλοι στη βιομηχανία τσιμέντου έχουν διάμετρο 3-4 m και μήκος 10-15 m (σχήμα 18). Είναι επομένως σωληνωτοί μύλοι (tube mills), αλλά έχει επικρατήσει στην πράξη να αναφέρονται ως σφαιρόμυλοι.

Εσωτερικά, για να αποφευχθούν οι φθορές στο μανδύα τους από τις κρούσεις των αλεστικών που περιέχουν, οι σφαιρόμυλοι είναι επενδεδυμένοι με πλάκες από σκληρό χαλυβόκραμα, οι οποίες εύκολα μπορούν να αντικατασταθούν όταν φθαρούν. Φέρουν διαφράγματα, τα οποία τους χωρίζουν σε δύο (σχήμα 19) ή και σε τρία διαμερίσματα. Τα διαφράγματα είναι διάτρητα και οι οπές τους έχουν τέτοιο άνοιγμα, ώστε να επιτρέπεται η δίοδος του υλικού, όχι όμως και των αλεστικών σωμάτων.

Αναφορικά με τον τρόπο απομάκρυνσης του υλικού από το μύλο, οι μύλοι όπως φαίνεται στο σχήμα 20 ταξινομούνται στους α) εκφορτιζόμενους μέσω σχάρας, β) εκφορτιζόμενους με υπερχειλίση του υλικού από τον κεντρικό του άξονα και γ) περιφερειακής εκφόρτισης. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται επίσης και ο όγκος που καταλαμβάνεται από τα αλεστικά και το υλικό. (Γαζιδέλλη Β., 2007)



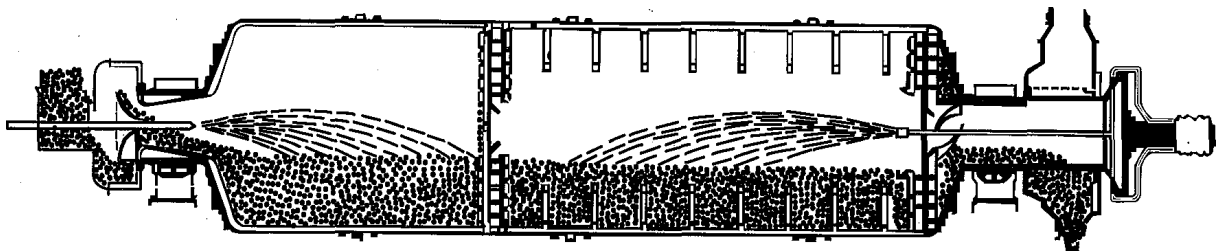
Σχήμα 18: Γενική άποψη σφαιρόμυλου βιομηχανίας τσιμέντου

Η ελάττωση του μεγέθους του υλικού στους σφαιρόμυλους επιτυγχάνεται με τη συνδυασμένη κίνηση των αλεστικών σωμάτων που περιέχουν. Το φάσμα μεγέθους των αλεστικών διαφοροποιείται ανά διαμέρισμα του μύλου. Ο λόγος της

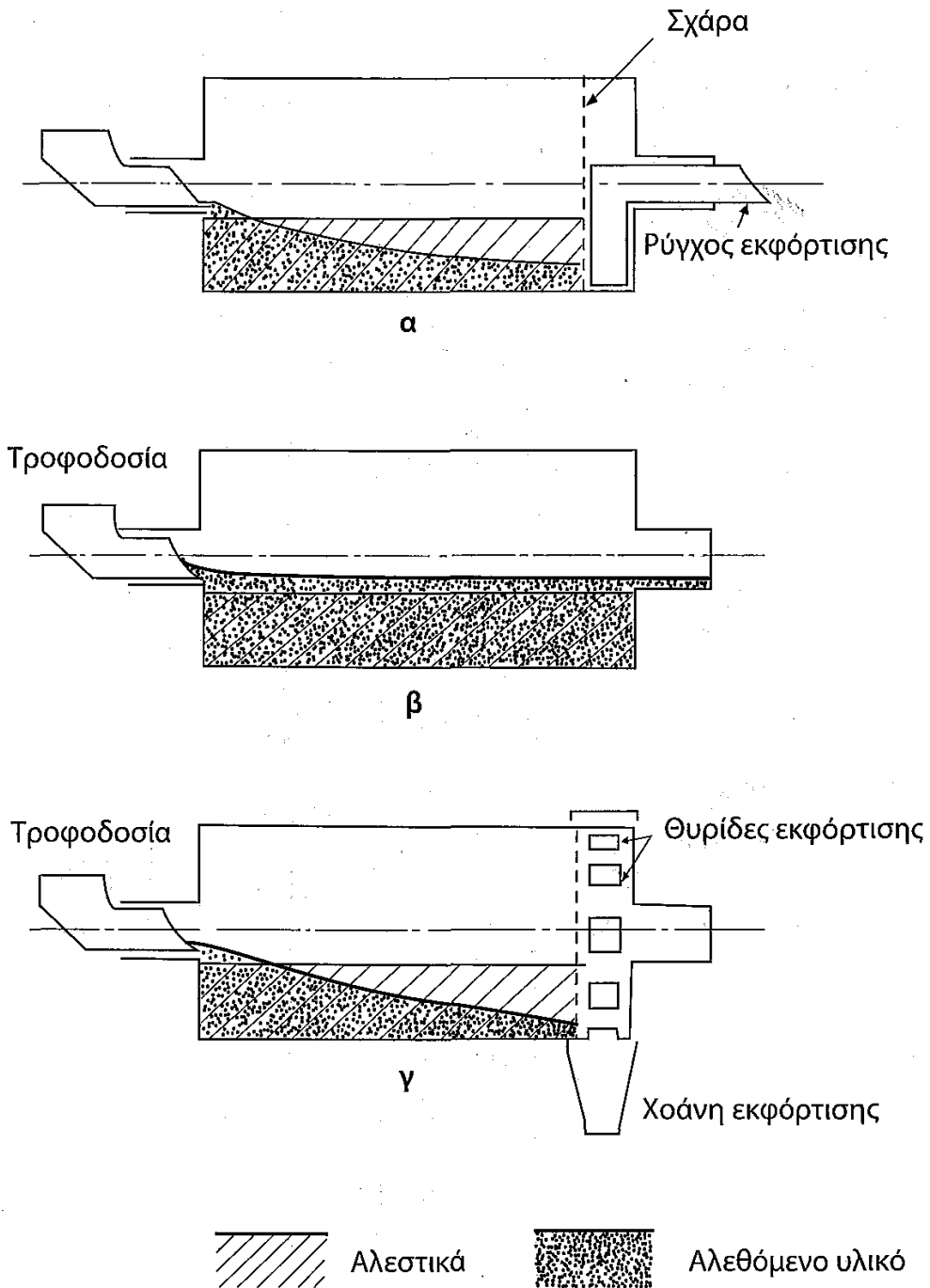
Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου

διαφοροποίησης αυτής είναι ότι 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, όπου ήδη το υλικό έχει σχετικά πολύ μικρότερες διαστάσεις, η δρώσα δύναμη για την περαιτέρω ελάττωση του μεγέθους του είναι η τριβή, η οποία απαιτεί μεγαλύτερη επιφάνεια αλεστικών μέσων (και επομένως μικρότερου μεγέθους αλεστικά) για να επιτευχθεί. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε μύλο 3 διαμερισμάτων τα περιεχόμενα αλεστικά έχουν μέγεθος (διάμετρο) 90-60 mm, 60-40 mm και 40-20 mm αντίστοιχα. (Makashev, S.D., 1976)

Η πορεία απομείωσης του υλικού μέσα στο μύλο, ανεξάρτητα από το εάν αυτό είναι φαρίνα ή τσιμέντο, για ένα μύλο τριών διαμερισμάτων (δύο διαφράγματα), παρουσιάζεται στο σχήμα 21. Ας σημειωθεί ότι οι κόκκοι ελαττώνονται σε μέγεθος με ένα λόγο σμίκρυνσης που μπορεί να φθάσει και το 400, ενώ στατιστικά έχει υπολογισθεί ότι κάθε κόκκος διατρέχοντας το μύλο δέχεται πέντε έως οκτώ κτυπήματα.



Σχήμα 19: Μύλος δύο διαμερισμάτων



Σχήμα 20: Διαφορετικά συστήματα εκφόρτισης σφαιρόμυλων



Σχήμα 21: Μεταβολή του μέσου μεγέθους των σωματιδίων (d_m) σε συνάρτηση με το μήκος του μύλου

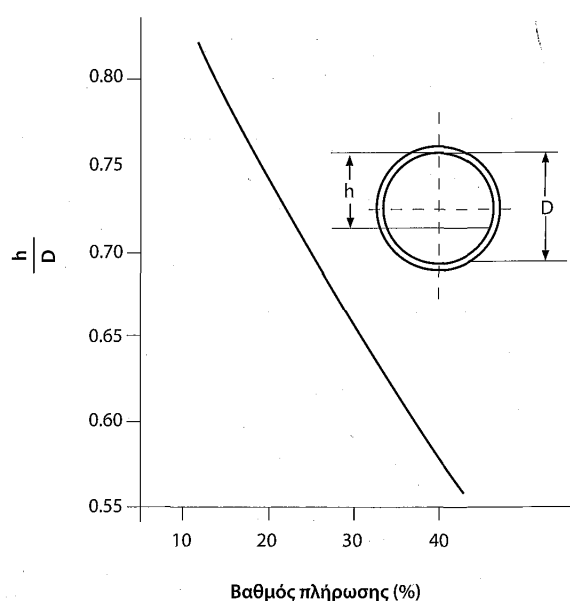
3.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟΥΣ ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΟΥΣ

Για την καλύτερη κατανόηση της πορείας άλεσης και επομένως της καθοδήγησης της προς τον επιθυμητό στόχο, είτε πρόκειται για άλεση φαρίνας είτε πρόκειται για άλεση τσιμέντου, πρέπει να διευκρινισθούν μερικές έννοιες όπως είναι ο βαθμός πλήρωσης (των αλεστικών), ο βαθμός πλήρωσης του υλικού, η κρίσιμη και η πραγματική ταχύτητα, ο λόγος βάρους αλεστικών προς το κλίνκερ, ο χρόνος παραμονής του υλικού στο μύλο και τέλος να δοθούν τύποι για τον υπολογισμό της ισχύος των μύλων και να εξηγηθεί πώς από το δείκτη έργου υπολογίζεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας σε ένα σφαιρόμυλο. Όλες αυτές οι έννοιες αναλύονται στη συνέχεια. (Μαραγκός Γ., 1995)

Βαθμός πλήρωσης

Ως βαθμός πλήρωσης (ball filling) ορίζεται το ποσοστό του όγκου του μύλου το οποίο καταλαμβάνεται από τα αλεστικά. Αυτός ποικίλλει από μύλο σε μύλο, σε συνάρτηση και με την προς άλεση ουσία και κυμαίνεται μεταξύ 20 και 40%, με πιο συνηθισμένα όρια στην περιοχή 28-33%. Στο σχήμα 22 παρουσιάζεται ένας απλός τρόπος υπολογισμού του βαθμού πλήρωσης, 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 ελαφρά 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, καθόσον μειώνεται το ύψος πτώσης των αλεστικών και κατά συνέπεια η αποτελεσματικότητα της άλεσης. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Σε σχέση με το διαμέρισμα του μύλου προτείνονται διαφορετικοί βαθμοί πλήρωσης για την ξηρή και για την υγρή άλεση, που φαίνονται στον πίνακα 3.4.



Σχήμα 22: Συσχέτιση βαθμού πλήρωσης μύλου και του λόγου h/D

Πίνακας 3.4: Βαθμός πλήρωσης μύλων σε σχέση με το διαμέρισμα

Διαμέρισμα	Βαθμός πλήρωσης (%)	
	Ξηρή άλεση	Υγρή άλεση
1ο	25-29	28-32
2ο	28-32	31-38
3ο	20-23	22-28

Βαθμός πλήρωσης σε υλικό

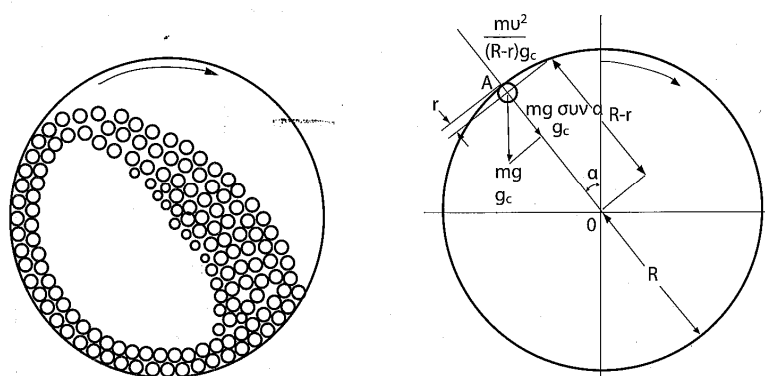
Ως βαθμός πλήρωσης υλικού (powder filling- pf) ορίζεται το ποσοστό του όγκου των κενών χώρων, που αφήνουν τα αλεστικά σε ηρεμία, που καταλαμβάνεται από το προς άλεση υλικό. Έχει βρεθεί ότι ένας μύλος λειτουργεί στις καλύτερες συνθήκες, όταν το αλεθόμενο υλικό γεμίζει τα κενά που αφήνουν τα αλεστικά σώματα 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 10-20 mm ψηλότερα. Σε αυτή την περίπτωση $pf=1$ και αύξησή του συνεπάγεται χρήση περισσότερων αλεστικών και επομένως άσκοπη κατανάλωση ενέργειας για κρούσεις μεταξύ τους. Αντιθέτως, μείωση του pf έχει ως αποτέλεσμα υπερφόρτωση του μύλου με το προς άλεση υλικό, με τελικό αποτέλεσμα να μην αλέθεται αυτό σε ικανοποιητική λεπτότητα. 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= $S/C=9$). Για να προσεγγισθεί καλύτερα το ποσοστό των κενών που αφήνουν τα αλεστικά μεταξύ τους και δεδομένου ότι αυτά ανάλογα με τη διάστασή τους παρουσιάζουν διαφορετικές φαινόμενες πυκνότητες, δίνεται ο πίνακας 3.5 που ισχύει για χαλύβδινα αλεστικά. (Μαραγκός Γ., 1995)

Πίνακας 3.5: Συσχέτιση διάστασης αλεστικών και φαινόμενης πυκνότητας

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

Κρίσιμη και πραγματική ταχύτητα περιστροφής

Η κίνηση των αλεστικών σωμάτων και του υλικού (φαρίνα ή κλίνκερ), που οδηγεί στην επιδιωκόμενη ελάττωση μεγέθους, προκαλείται από την περιστροφή του μύλου και είναι άμεση συνέπεια της ταχύτητας περιστροφής. Ως κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής (η_c) ενός μύλου ορίζεται η ταχύτητα εκείνη κατά την οποία τα αλεστικά σώματα απλώς ολισθαίνουν στην εσωτερική επιφάνεια ενός μύλου. Εάν η ταχύτητα αυτή αυξηθεί, τα αλεστικά σώματα θα περιστρέφονται φυγοκεντρώμενα στο εσωτερικό του μύλου, εάν δε αντίθετα ελαττωθεί, τα αλεστικά θα πέφτουν αφού πρώτα φτάσουν στο ανώτατο σημείο της τροχιάς τους στο εσωτερικό του μύλου. Η κρίσιμη ταχύτητα είναι ένα υποθετικό μέγεθος, καθόσον στην πράξη κανένας μύλος δεν περιστρέφεται με την κρίσιμη ταχύτητά του αλλά με ποσοστό αυτής, που συνήθως είναι το 75% και το οποίο καλείται πραγματική ταχύτητα περιστροφής. (Peray K. E., Waddell J. J., 1972)



Σχήμα 23: Κίνηση αλεστικών στο μύλο και ασκούμενες δυνάμεις στα αλεστικά σώματα κατά την περιστροφή τους

Με την ταχύτητα αυτή διευκολύνεται η άνοδος των αλεστικών μέχρι ένα σημείο, όπως φαίνεται στο σχήμα 23, από το οποίο και πέφτουν στο εσωτερικό του μύλου ακολουθώντας παραβολική τροχιά. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο αλεστικό σώμα, η ανάλυση των οποίων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κρίσιμη ταχύτητα εξαρτάται μόνο από τη διάμετρο του μύλου και δίνεται από τη σχέση :

$$n_c = 42.3/\sqrt{D} \quad (7)$$

όπου D: η διάμετρος του μύλου (m) και

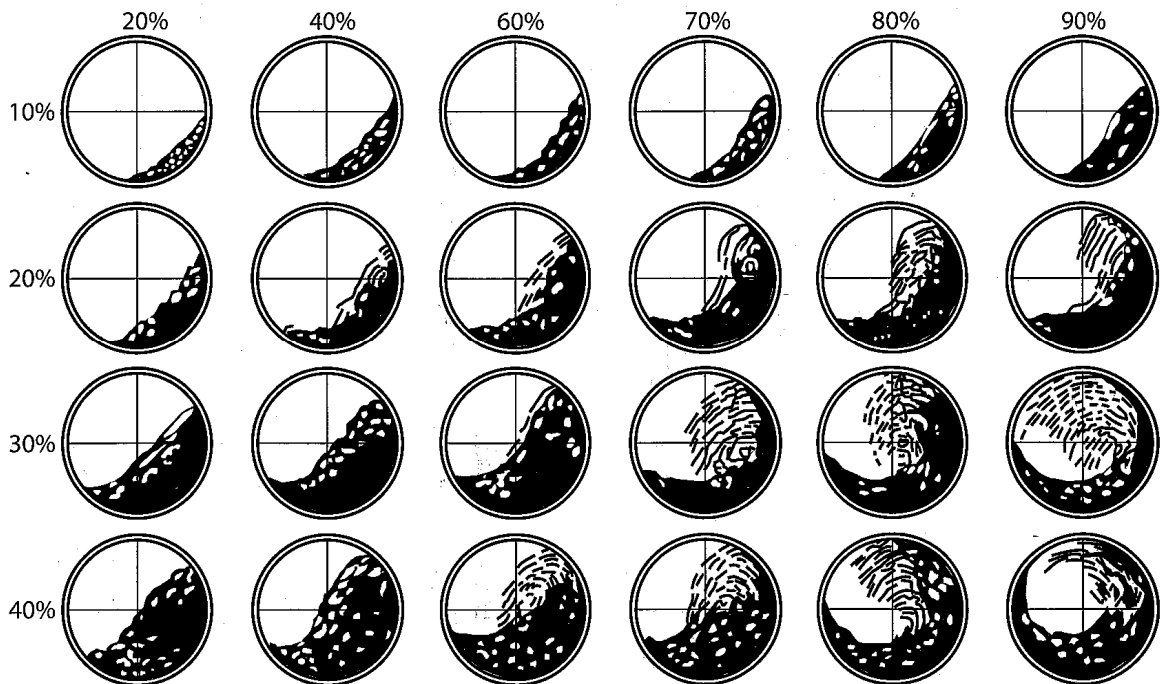
n_c : η κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής (στροφές ανά λεπτό-rpm)

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, κυρίως στους μικρής διαμέτρου μύλους, χρησιμοποιείται η σχέση (8):

$$n = 42.3/\sqrt{(D-d)} \quad (8)$$

όπου d: η μέση διάμετρος των αλεστικών (m).

Στο σχήμα 24 φαίνεται η σχέση που συνδέει το βαθμό πλήρωσης με την ταχύτητα περιστροφής και φαίνεται η κίνηση του φορτίου του μύλου (αλεστικά και προς άλεση ουσία), για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και διάφορους βαθμούς πλήρωσης. Παρατηρείται ότι, όταν οι παράμετροι αυτές έχουν αμφοτέρως μικρές ή μεγάλες τιμές, δεν πραγματοποιείται ικανοποιητικό έργο άλεσης είτε γιατί το υλικό είναι λίγο και τα αλεστικά δεν μπορούν να φθάσουν στο σωστό σημείο της τροχιάς τους (μικρές τιμές) είτε γιατί τα αλεστικά και το υλικό φυγοκεντρώνονται στο εσωτερικό του μύλου (μεγάλες τιμές). Όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής για ένα δεδομένο βαθμό πλήρωσης, τόσο τα αλεστικά ανερχόμενα λίγο στη συνέχεια καταρρέουν (cascade) στο εσωτερικό του μύλου, ενώ σε περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας γίνεται η πτώση (cataracte) κατά παραβολική τροχιά που προαναφέρθηκε. Η πρώτη περίπτωση είναι καταλληλότερη για την πρόσδοση της τελικής λεπτότητας στο τσιμέντο ή στη φαρίνα, ενώ στη δεύτερη επιτυγχάνεται η σε πρώτο βαθμό άλεση των υλικών αυτών. Από το σχήμα αυτό είναι σαφές ότι οι καλύτερες συνθήκες επιτυγχάνονται με βαθμό πλήρωσης περίπου 30% και ταχύτητα περιστροφής μεταξύ 70% και 80% της κρίσιμης ταχύτητας περιστροφής. (Μαγκανάρη Κ., 2002)



Σχήμα 24: Κίνηση φορτίου μύλου σε σχέση με το βαθμό πλήρωσης (10-40%) και την ταχύτητα περιστροφής (20-90% της κρίσιμης ταχύτητας περιστροφής)

Χρόνος παραμονής του υλικού στο μύλο

Ως χρόνος παραμονής (MRT- Mill Retention Time) ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να διατρέξει μία ορισμένη ποσότητα του υλικού (θεωρητικά ένας κόκκος) το μήκος ενός μύλου. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τη φύση των υλικών και μεταβάλλεται από μύλο σε μύλο (ενδεικτικοί χρόνοι για κλίνκερ περίπου 10 min). Ο χρόνος παραμονής μετριέται με τη χρησιμοποίηση κατάλληλου δείκτη, όπως είναι η φθορεσκεΐνη.

3.6 ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΣΦΑΙΡΟΜΥΛΩΝ

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 ως μέτρο της λεπτότητας λαμβάνεται είτε η ειδική επιφάνεια του μείγματος είτε το υπόλειμμα σε ένα συγκεκριμένο κόσκινο. Είναι ευνόητο ότι ο ίδιος μύλος, όταν αλέθει

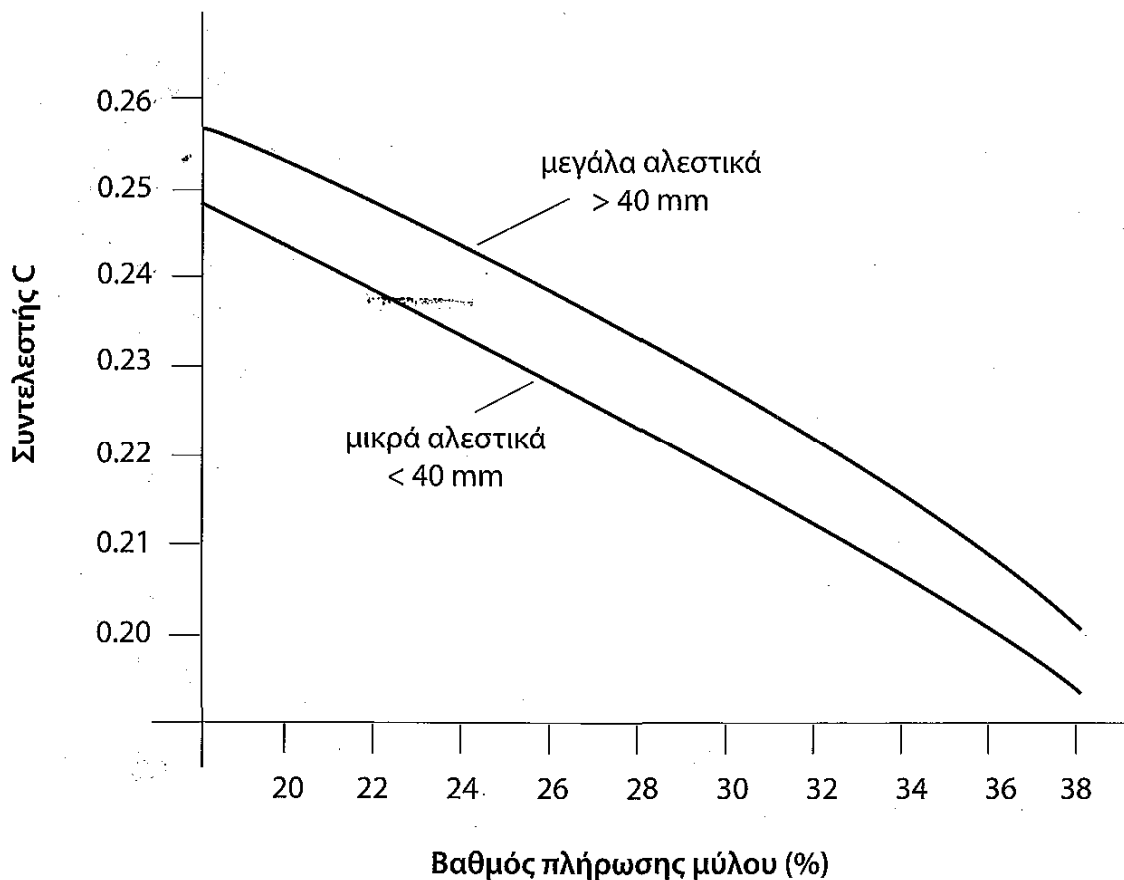
δύο υλικά στην ίδια λεπτότητα, θα παράγει μεγαλύτερες ποσότητες από το πιο ευάλεστο υλικό.

Η παραγωγή P του μύλου προκύπτει από την ισχύ του (N) και την ειδική κατανάλωση ενέργειας (W) κάθε αλεθόμενου υλικού με βάση τη σχέση (9):

$$P = N/W \quad (9)$$

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

$$N = c Q D n \quad (10)$$



Σχήμα 25: Εξάρτηση του συντελεστή C της σχέσης (10) από το βαθμό πλήρωσης του μύλου και το μέγεθος των αλεστικών

όπου N : η ισχύς του μύλου (W),

c : συντελεστής εξαρτώμενος από το βαθμό πλήρωσης του μύλου και ευρισκόμενος με βάση

το σχήμα 25, Q: το βάρος των αλεστικών (t),

D: η εσωτερική διάμετρος του μύλου (m),

η: η πραγματική ταχύτητα περιστροφής (rpm)

Το φορτίο Q του μύλου προκύπτει από τη σχέση (11):

$$Q = V_m P_b e_b \quad (11)$$

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 $n=0.75n_c$, $L=D/2$ (για ball mills), από τις σχέσεις (7), (10) και (11) προκύπτει η ισχύς του μύλου σε συνάρτηση της διαμέτρου του, όπως φαίνεται στη σχέση (12):

$$N = K D^{3.5} \quad (12)$$

όπου $K = 12.56 c e_b \rho_b$

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από τη φύση του υλικού και ειδικότερα από την αλεστικότητά του, την ευκολία δηλαδή με την οποία αυτό αλέθεται. Ένα μέτρο αλεστικότητας είναι ο δείκτης έργου ($W.$), 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 του. Ο δείκτης έργου εκφράζεται σε (kWh/short t). και κυμαίνεται από 7 για τα πιο ευάλεστα υλικά έως 20 για τα πιο δυσάλεστα (1 short t 907.2 kg). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι ασβεστόλιθοι λαμβάνουν τιμές από 8 έως 10, ενώ τα κλίνκερ από 13 έως 15.5 kWh/short t.

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας W βιομηχανικών μύλων προσδιορίζεται από το δείκτη έργου $W.$ με βάση τη σχέση (13):

$$W=(1.1)BW.(10/\sqrt{P_{80}}-10/\sqrt{F_{80}})AK \quad (13)$$

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, $W.$: 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 (μην),

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

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

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

$x=0.200$ όταν $D<3.65 \text{ m}$

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

$x=0.150$ όταν $D>4.25 \text{ m}$

Από τη σχέση (13) 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 μία κοκκομετρική ανάλυση στο προς άλεση υλικό, ενώ σε περιπτώσεις όπου η λεπτότητα του προϊόντος εκφράζεται ως ειδική επιφάνεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσεγγιστική σχέση (14) που συσχετίζει το P_{80} και την ειδική επιφάνεια.

$$P_{80} = 6 \cdot 10^7 / (S_B^{14} \rho^{25}) \quad (14)$$

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

ρ : η πυκνότητα του υλικού (g/cm^3)

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα κλίνκερ με δείκτη έργου $W_i=14 \text{ kWh/short t}$ εμφανίζει ειδική κατανάλωση ενέργειας περίπου 29 kWh/t όταν αλέθεται στα $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ και 46.5 kWh/t όταν αλέθεται στα $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Η παραγωγή του μύλου, του οποίου προφανώς η ισχύς θα παραμένει σταθερή (έστω 3000 kW), στη δεύτερη περίπτωση θα μειωθεί από 105 t/h σε περίπου 65 t/h . (Μαραγκός Γ., 1995)

3.7 ΑΛΕΣΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΑ

Τα αλεστικά σώματα είναι τα μέσα με τα οποία πραγματοποιείται η ελάττωση μεγέθους των υλικών. Αυτά, ανάλογα με την επιδιωκόμενη λεπτότητα και τη φύση των προς άλεση υλικών, διαφοροποιούνται σε τέσσερις παραμέτρους που είναι το

σχήμα, το μέγεθος, η ποιότητα και η σκληρότητα. Οι παράμετροι αυτές επιδρούν άμεσα και στη φθορά των αλεστικών που με τη σειρά της έχει άμεση επίπτωση τόσο στην ποιότητα του αλεθόμενου υλικού όσο και στην οικονομικότητα της άλεσης.

Ως προς το σχήμα των αλεστικών, παλαιότερα χρησιμοποιούνταν αλεστικά διαφόρων σχημάτων όπως ράβδοι, κύβοι, κυλινδρίσκοι και βέβαια σφαίρες. Σήμερα όμως τόσο για την άλεση της φαρίνας όσο για την άλεση του κλίνκερ χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σφαίρες και μόνο σε ορισμένους μύλους τοποθετείται στα τελευταία διαμερίσματα μικρό ποσοστό κυλινδρίσκων, οι οποίοι προσφέρουν μεγαλύτερη επιφάνεια που απαιτείται για την ελάττωση του μεγέθους με τριβή. (Παπαϊωάννου Ν., 1998)

Όσον αφορά στο μέγεθος των αλεστικών, ήδη αναφέρθηκε ότι τα μεγάλα αλεστικά (Φ100-Φ60) τοποθετούνται στα πρώτα διαμερίσματα των μύλων ή σε μύλους προάλεσης, όταν χρησιμοποιούνται ξεχωριστές μονάδες ball mill που δεν έχουν ακόμα αντικατασταθεί από τις κυλινδρόπρεσες. Αυτό γίνεται με στόχο την εκμετάλλευση της αυξημένης μάζας των αλεστικών μεγάλης διαμέτρου, που και λόγω του μεγαλύτερου ύψους πτώσης τους (υπενθυμίζεται ότι οι ball mill έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από τους tube mill) οδηγεί σε αποτελεσματικότερη κατάτμηση του υλικού κατά την πτώση του αλεστικού. Αντίθετα, τα μικρά αλεστικά (Φ30-Φ20) βρίσκονται στο τελευταίο διαμέρισμα του μύλου και με αυτά το έργο άλεσης πετυχαίνεται περισσότερο με την τριβή λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειάς τους. Νεότερες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν δείξει ότι δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενδιάμεσου μεγέθους αλεστικών (Φ50-Φ40), ενώ επιβάλλεται η χρησιμοποίηση μικρότερων ακόμα μεγεθών, ιδίως όταν επιζητούνται μεγάλες λεπτότητες. Τα αλεστικά αυτά (Φ15-Φ10) (mini-pebs) προστίθενται σε μύλους που έχουν ειδικού τύπου διαφράγματα, τα οποία χωρίζουν τα επιμέρους διαμερίσματα.

Αποφασιστικής σημασίας για τη σωστή άλεση τόσο της φαρίνας όσο και του τσιμέντου είναι η σωστή επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αλεστικών στο σφαιρόμυλο, που με τη σειρά της στηρίζεται στο σωστό υπολογισμό της μέγιστης διάστασης αλεστικού (d_{max}) που θα χρησιμοποιηθεί. Χρησιμοποιείται ο τύπος του Bond που δίνεται στη σχέση (15). (Makashev, S.D., 1976)

$$d_{max} = 20.17 \sqrt{(F_{80}/K)} \cdot \sqrt{(W_i \rho / c_s \sqrt{D})} \quad (15)$$

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)

Με βάση τη σχέση (15), 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 για την άλεση. Θεωρητικά, επομένως, τα καλύτερα αποτελέσματα θα προέκυπταν εάν υπήρχαν η διαμερίσματα, άρα η-1 διαφράγματα, και σε καθένα υπήρχαν αλεστικά μίας συγκεκριμένης διάστασης. Επειδή όμως αυτό είναι εντελώς ανέφικτο, 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. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

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 της ίδιας παραγράφου, με την έναρξη της άλεσης αρχίζει και η φθορά των αλεστικών με αποτέλεσμα τη μείωση της διαμέτρου τους, αρχικά χρησιμοποιούνται πάντοτε μεγαλύτερα αλεστικά από εκείνα που υπολογίζονται από τους τύπους, τα οποία σταδιακά φθιρόμενα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αποκτούν τη βέλτιστη διάσταση.

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 τη σειρά τους έχουν διαφορετική επίδραση στο αποτέλεσμα της

άλεσης. Όσον αφορά την ποιότητα, στη συντριπτική πλειοψηφία χρησιμοποιούνται χαλύβδινα ή χυτοσιδηρά αλεστικά με κυριότερες προσμείξεις το χρώμιο, το νικέλιο, το μαγγάνιο και το χαλκό. Η σκληρότητα διαφοροποιείται από διαμέρισμα σε διαμέρισμα και μαζί με τη φθοροποιό δράση του υλικού (abrasivity) διαμορφώνουν τις φθορές των αλεστικών.

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 που καλείται να αντιμετωπίσει ο επιφορτισμένος με θέματα άλεσης μηχανικός.

Οι φθορές επιδρούν κατά δύο τρόπους στην οικονομικότητα της άλεσης. Άμεσα μεν επειδή μεταφράζονται σε δαπάνη για την αναπλήρωσή 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. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

Οι βασικές αιτίες δημιουργίας φθορών είναι η τριβή, η κρούση και η διάβρωση. Από αυτές η τελευταία παρατηρείται σε περιπτώσεις υγρής άλεσης. 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 σωμάτων: Έχει διαπιστωθεί ότι τα μεγάλα αλεστικά, ιδίως αυτά που βρίσκονται στο πρώτο διαμέρισμα, φθείρονται ταχύτερα. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτά υφίστανται μεγάλη καταπόνηση λόγω των συνεχών κρούσεων κατά την πτώση τους. Το αποτέλεσμα της φθοράς των μεγάλων αλεστικών έχει άμεση επίπτωση στην άλεση, καθόσον μειώνεται το βάρος τους. Αντίθετα, στα μικρά αλεστικά δεν ενοχλεί ιδιαίτερα η μείωση της διαμέτρου τους λόγω φθοράς, αφού το έργο άλεσης γίνεται με τριβή και επηρεάζεται από την επιφάνεια των αλεστικών και όχι από τη διάμετρο τους.

- Η σκληρότητα των αλεστικών σωμάτων: Όσο αυξάνεται, μειώνονται σημαντικά οι φθορές. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ειδικά σκληρά κράματα στα υλικά κατασκευής των αλεστικών, με προσθήκη μαγγανίου (Mn) και χρωμίου (Cr), με τα οποία επιτεύχθηκαν σημαντικές μειώσεις στις φθορές τους,

όπως φαίνεται στον πίνακα 6. Η εργαστηριακή άλεση με οψιδιανό, που είναι πολύ σκληρό ορυκτό, παρουσίασε μικρές φθορές σε αντίθεση με την άλεση με κορούνδιο όπου οι φθορές ήταν μεγαλύτερες.

- Η σκληρότητα του προς άλεση υλικού: Αν αυτή είναι μεγαλύτερη από τη σκληρότητα των αλεστικών, τότε τα τελευταία φθείρονται ταχύτερα. Στην τσιμεντοβιομηχανία, στην άλεση του κλίνκερ παρουσιάζονται σημαντικά μεγαλύτερες φθορές απ' ό,τι στην άλεση των πρώτων υλών, λόγω του γεγονότος ότι το κλίνκερ έχει μεγαλύτερη φθοροποιοό δράση.

- Η επιδιωκόμενη λεπτότητα άλεσης: Έχει διαπιστωθεί ότι αύξηση της λεπτότητας του προϊόντος από τα 2500 στα 4000 cm^2/g κατά Blaine προκαλεί διπλασιασμό των φθορών.

- Η διάμετρος του μύλου: Στον τύπο υπολογισμού των φθορών η διάμετρος του μύλου είναι υψωμένη στη δύναμη, 0.16 ($D^{0.16}$) και ως εκ τούτου δεν επηρεάζει σημαντικά τις φθορές.

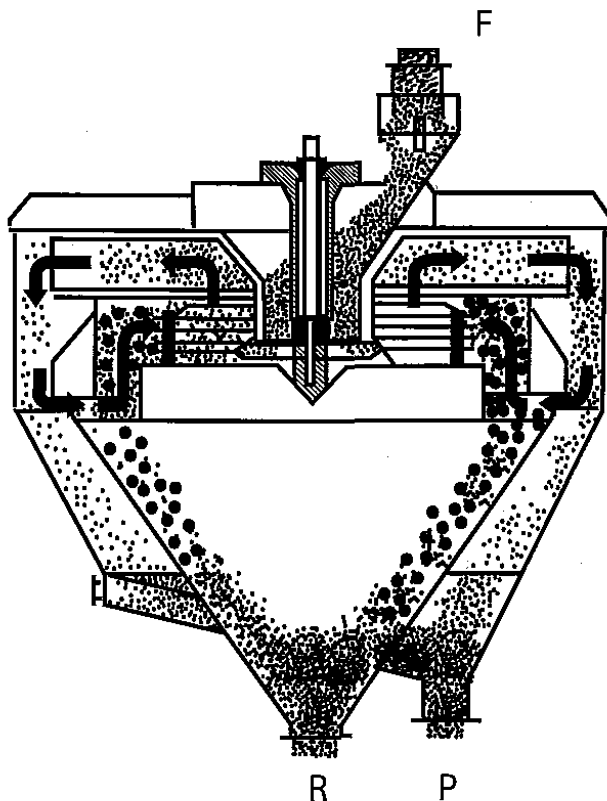
Οι φθορές των αλεστικών εκδηλώνονται είτε με θραύση τους σε μικρότερα τεμάχια, είτε με αλλαγή του σχήματος τους λόγω της δημιουργίας κοιλοτήτων και γίνονται αντιληπτές στους μηχανικούς από τη μείωση της ισχύος του μηχανήματος. Είναι δυνατόν να αποκατασταθούν με δύο τρόπους:

- Με περιοδική συμπλήρωση των μεγαλύτερης διάστασης αλεστικών.
- Με διαλογή των φθαρμένων αλεστικών και αναπλήρωση όλου του κοκκομετρικού φάσματος. Η εργασία αυτή γίνεται σε αραιότερα χρονικά διαστήματα απ' ό,τι η πρώτη, δεδομένου ότι απαιτεί σταματήματα του μύλου για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Με την εφαρμογή των αλεστικών νέας τεχνολογίας ο χρόνος ζωής τους (service life) έχει επιμηκυνθεί αξιοσημείωτα και ήδη αναφέρονται περιπτώσεις συνεχούς λειτουργίας σφαιρόμυλων φαρίνας που έφθασαν έως και 16000 h. Παλαιότερα τα όρια αυτά ήταν απλησίαστα δεδομένου του χαλαζία που υπάρχει στις πρώτες ύλες και ο οποίος έχει έντονη φθοροποιοό δράση. (Makashev, S.D., 1976)

Πίνακας 6: Φθορές αλεστικών σε συνάρτηση με το υλικό κατασκευής τους, το μέγεθος τους και το διαμέρισμα του μύλου στο οποίο βρίσκονται (άλεση κλίνκερ).

		Μηχανικά κατεργασμένο			
Στοιχείο		Κανονικός	Σκληρυμένο	Λευκός	Κραματοπ.
		χάλυβας	χάλυβας	χυτοσίδηρος	χάλυβας
		Χημική ανάλυση (%)			
C		0.5-1.0	0.5-1.0	2.8-3.3	1.2-2.8
Mn		0.8-1.2	0.8-1.2	0.1-0.4	1.0-1.2
Cr		0.8-1.2	0.8-1.2	0.1-0.4	12-28
Mo		0.0	0.2-0.5	ο.ό	0.2-0.5
		Σκληρότητα (Brinell)			
		350-425	600-700	400	600-700
Είδος άλεσης	Είδος αλεστικών	Φθορά (g/kWh)			
	Μεγάλα σφαιρικά	25-50	15-40		10-20
Υγρή	Μικρά σφαιρικά	40-80	20-50	30-60	15-30
	Κυλινδρίσκοι	40-80	20-50	30-60	15-30
	Μεγάλα σφαιρικά	15-30	10-20		2-5
Φαρίνα	Μικρά σφαιρικά	3-10	2-8	2-6	1-3
	Κυλινδρίσκοι	3-10	2-8	2-6	1-3

	Μεγάλα σφαιρικά	20-40	10-20		2-5
Τσιμέντο	Μικρά σφαιρικά	5-15	2-10	5-15	1-3
	Κυλινδρίσκοι	5-15	2-10	5-15	1-3



F: Τροφοδοσία
P: Προϊόν
R: Επιστροφές

Σχήμα 26: Διαχωριστής με ενσωματωμένο ανεμιστήρα (Peray K. E., Waddell J. J., 1972)

3.8 ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτυχθούν οι διαχωριστές της πρώτης και της δεύτερης γενιάς, ενώ οι διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας ή διαχωριστές τρίτης γενιάς θα αναφερθούν στο κεφάλαιο της άλεσης του τσιμέντου (5.3).

Δύο είναι οι βασικοί τύποι της πρώτης γενιάς διαχωριστών:

- Ο σταθερός διαχωριστής (διαχωριστής ελκυσμού)

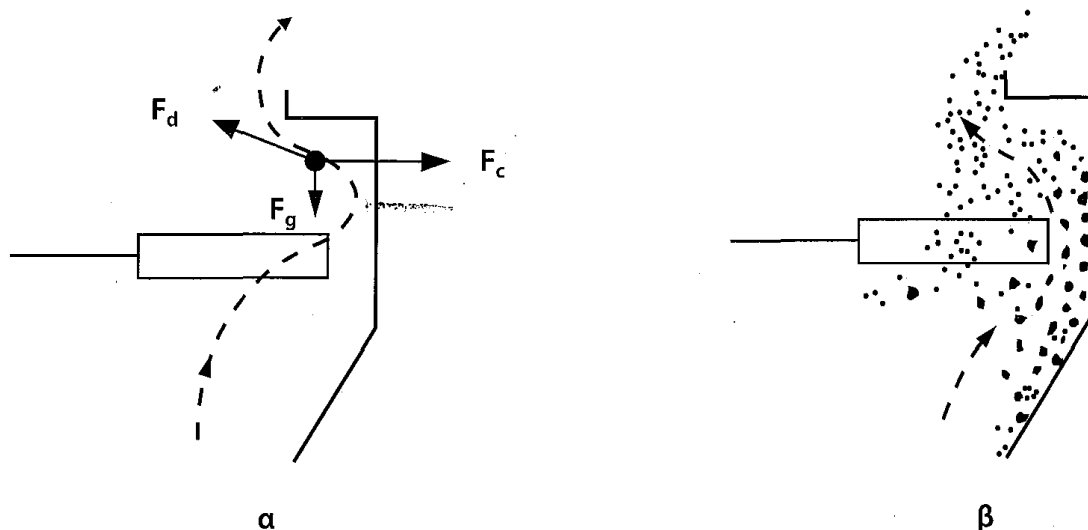
•Ο διαχωριστής με ενσωματωμένο ανεμιστήρα (τύπος Sturtevant)

Στο διαχωριστή ελκυσμού το μόνο κινούμενο μέρος είναι ο ανεμιστήρας ολικής κυκλοφορίας, που όμως βρίσκεται έξω από το σώμα του διαχωριστή. Το ρεύμα του αέρα τραβά μέσα από το μύλο (air swept) το μισοαλεσμένο υλικό, που στη συνέχεια μεταφέρεται με το σωλήνα αναρρόφησης στο διαχωριστή. Εκεί το χονδρόκοκκο υλικό γυρίζει πάλι στο μύλο και το έτοιμο υλικό συγκρατείται σε έναν κυκλώνα από τον οποίο προχωρά ανάλογα προς τα σιλό ομογενοποίησης ή τα σιλό τσιμέντου.

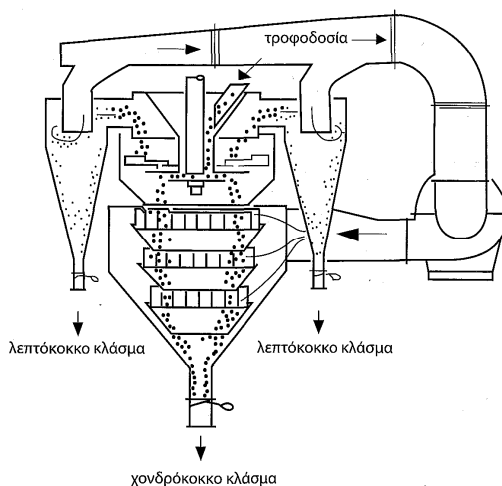
Ο δεύτερος τύπος διαχωριστή, που είναι και ο περισσότερο συνηθισμένος, αποτελείται από ένα κυλινδροκωνικό σώμα μέσα στο οποίο βρίσκεται ένα άλλο, με τέτοιο τρόπο ώστε τα δύο σώματα να σχηματίζουν ένα δακτυλιοειδή χώρο (σχήμα 26). Ένας κάθετος άξονας που ξεκινά από την κορυφή του διαχωριστή στο κέντρο του φτάνει εκεί που αρχίζει ο εσωτερικός κώνος. Τον κάθετο αυτόν άξονα περιβάλλει ένας κύλινδρος που καθορίζει τη διατομή μέσα από την οποία περνά το υλικό που πρόκειται να διαχωριστεί. Έξω από τον κύλινδρο είναι συναρμολογημένος ο ανεμιστήρας που λειτουργεί με κινητήρα με μειωτή. Κάτω από τον ανεμιστήρα, στερεωμένος στο κάτω μέρος του κάθετου άξονα, βρίσκεται ο δίσκος διασκορπισμού στον οποίο πέφτει το υλικό. Λίγο κάτω από το δίσκο διασκορπισμού, στην κορυφή της περιφέρειας του εσωτερικού κώνου, βρίσκονται σε σταθερούς δίδυμους δακτυλίους τα πτερύγια του διαχωριστή που λέγονται και περσίδες ή ελάσματα ανάκλασης. Τα πτερύγια αυτά είναι στο χώρο μεταξύ των δακτυλίων και η θέση τους μπορεί να ρυθμιστεί χειροκίνητα ή με κινητήρα. Η θέση τους κατά τη διεύθυνση της ακτίνας σημαίνει ότι είναι ανοικτά, ενώ κατά τη διεύθυνση της εφαπτομένης σημαίνει ότι είναι κλειστά. (Παπαϊωάννου Ν., 1998)

Η λειτουργία του στηρίζεται στη 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. Πιο συγκεκριμένα, το υλικό όπως πέφτει στο δίσκο διασκορπισμού φυγοκεντρείται προς τα πλάγια. Ένας κόκκος που αφήνει το δίσκο διασκορπισμού βρίσκεται κάτω από την επίδραση των τριών δυνάμεων (φυγόκεντρος F_c , δύναμη ανερχόμενου αέριου ρεύματος F_d , βαρύτητα F_g) που φαίνονται στο σχήμα 27. Η συνισταμένη των δυνάμεων αυτών

Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου καθορίζει την κίνηση των σωματιδίων και ακριβέστερα το μέγεθος εκείνο του κόκκου που θα παρασυρθεί προς τον εξωτερικό κώνο. (Γαζιδέλλη Β., 2007)



Σχήμα 27: α: Δυνάμεις που επιδρούν στον κόκκο και β: Πορεία του υλικού μέσα στο διαχωριστή



Σχήμα 28: Διαχωριστής τύπου κυκλώνα

Με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας του διαχωριστή (παροχή αέρα, ταχύτητα περιστροφής πτερωτής) επηρεάζονται οι F_c και F_d και τελικά είναι δυνατή η ρύθμιση του μεγέθους του διαχωρισμού των δύο ροών. Όταν οι κόκκοι έρθουν 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, που με τον τρόπο αυτό αναγκάζεται σε αέναη εσωτερική κυκλοφορία. (Makashev, S.D., 1976)

Οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα (cyclone type HE separator) ανήκουν στη δεύτερη γενιά διαχωριστών (σχήμα 28). 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.

Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των κυκλωμάτων άλεσης οδήγησε στην κατασκευή και χρήση των διαχωριστών τρίτης γενιάς που καλούνται και διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας (high efficiency separators ή HES). Η ένταξη των διαχωριστών αυτών στο κεφάλαιο που αφορά την άλεση του τσιμέντου (4) οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στην άλεση του τσιμέντου. (Makashev, S.D., 1976)

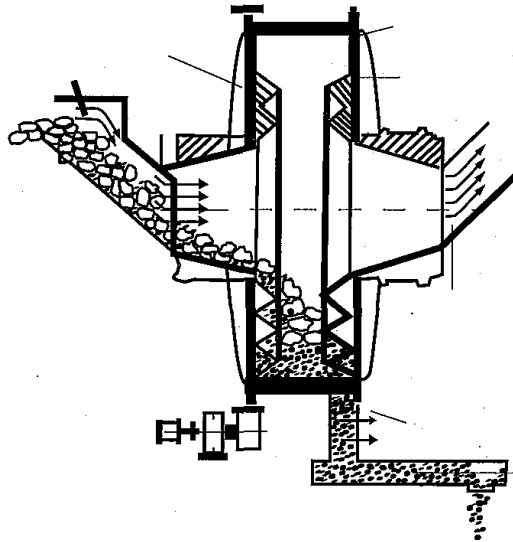
3.9 ΆΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΥΛΩΝ. ΚΑΘΕΤΟΙ ΜΥΛΟΙ

Αν και οι σφαιρόμυλοι εξακολουθούν να έχουν κυρίαρχη θέση στην παραγωγή του τσιμέντου, δεν είναι λίγες οι βιομηχανίες που σταδιακά τους αντικαθιστούν με τους κάθετους μύλους, που πρωτοεμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '70 αποκλειστικά για την άλεση της φαρίνας.

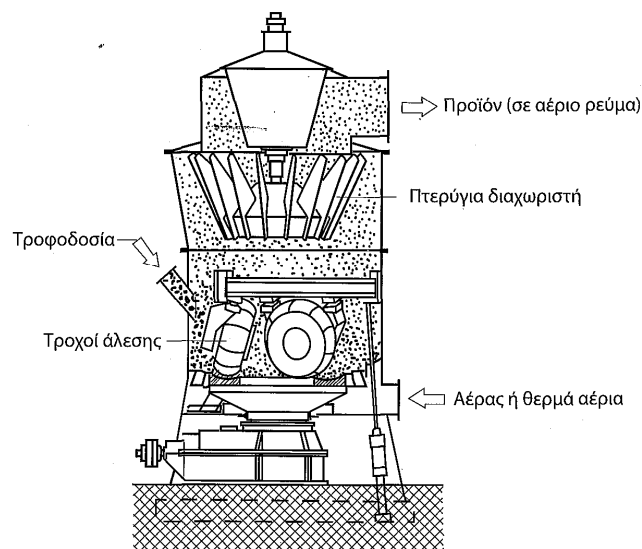
Οι κάθετοι μύλοι όμως δεν είναι το μόνο άλλο είδος μύλου που απαντάται στην τσιμεντοβιομηχανία. Μικρότερης σημασίας είναι οι μύλοι αυτογενούς κονιοποίησης ή aeorfall (σχήμα 29), που διαφέρουν από τους σφαιρόμυλους στο ότι ως αλεστικά σώματα χρησιμοποιούνται τα μεγαλύτερα τεμάχια από το προς άλεση υλικό. Η απομείωση του μεγέθους πραγματοποιείται με την κρούση των τεμαχίων αυτών στα μικρότερα καθώς και με την τριβή των τεμαχίων μεταξύ τους. Οι μύλοι αυτογενούς κονιοποίησης είναι μικρού μήκους και μεγάλης διαμέτρου, για να εξασφαλισθεί ικανό ύψος πτώσης των μεγάλων τεμαχίων που αντικαθιστούν τα αλεστικά. Η τροφοδοσία εισέρχεται σε μεγέθη 300 mm και το προϊόν έχει ενδιάμεση λεπτότητα που δεν συγκρίνεται με τις λεπτότητες που επιτυγχάνονται με τους σφαιρόμυλους ή τους

Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου

μύλους περιφερόμενων τροχών. Στη βιομηχανία τσιμέντου έχει μερικώς μόνο χρησιμοποιηθεί για την προκαταρκτική θραύση του κλίνκερ στην έξοδο του ψυγείου, όπου συχνά απαντώνται μεγάλων διαστάσεων τεμάχια κλίνκερ, που προέρχονται από κολλησιές που δημιουργούνται στα τελευταία μέτρα της περιστροφικής καμίνου.



Σχήμα 29: Μύλος αυτογενούς κονιοποίησης

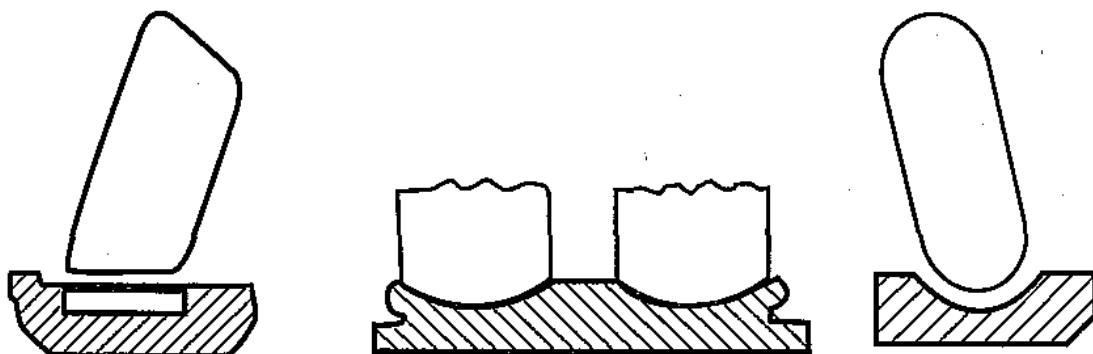


Σχήμα 30: Κάθετος μύλος (μύλος περιστρεφόμενων τροχών)

Οι κάθετοι μύλοι ή μύλοι περιστρεφόμενων τροχών (vertical roller mills - VRM), όπως φαίνεται στο σχήμα 30, 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 επενδεδυμένων 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 ήδη αποκτήσει την επιθυμητή λεπτότητα απομακρύνονται για τα περαιτέρω στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, ενώ το χονδρόκοκκο κλάσμα 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 το διαχωριστή μέχρις ότου αποκτήσουν την επιδιωκόμενη λεπτότητά τους και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ικανοποιητική ξήρανσή τους, ιδίως όταν πρόκειται για άλεση φαρίνας. Θεωρητικώς οι μύλοι αυτοί χρησιμοποιούνται για άλεση πρώτων υλών των οποίων η υγρασία φθάνει έως 20%. Όπως συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις, μετά την αρχική ανακάλυψη μιας τεχνολογικής καινοτομίας, εμφανίζονται πολλοί κατασκευαστικοί οίκοι με μικρές τροποποιήσεις στην αρχική ιδέα. Στην περίπτωση των VRM οι τροποποιήσεις αυτές αναφέρονται στο σχήμα των περιστρεφόμενων τροχών ή των τραπεζών άλεσης (σχήμα 31).

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 από την αρχική τροφοδότηση του μύλου, τα οποία ύστερα από λίγο θα επαναλεσθούν. Για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός 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%. Στον πίνακα 7 που ακολουθεί παρουσιάζεται μία σύγκριση μεταξύ σφαιρόμυλων και κάθετων μύλων, όπου και προβάλλονται ιδιαίτερα τα πλεονεκτήματα των τελευταίων. (Μαραγκός Γ., 1995)



Σχήμα 31: Διάφορα είδη τροχών και τραπεζών άλεσης σε VRM

Πίνακας 7: Σύγκριση μεταξύ σφαιρόμυλων και κάθετων μύλων

Χαρακτηριστικά	Σφαιρόμυλος	Κάθετος μύλος
Κατανάλωση ενέργειας (συγκριτική)	118	100
Απαίτηση χώρου (συγκριτική)		
Εκμετάλλευση αερίων ΠΚ	Μερική	Ολική
Ανταπόκριση σε εντολές αυτόματου ελέγχου	Αργή	Γρήγορη
Κοκκομετρία τροφοδοσίας	20 mm	100 mm
Κόστος συντήρησης	Υψηλό	Χαμηλό
Ευελιξία διάταξης	Μικρή, ο μύλος πρέπει να λειτουργεί συνεχώς 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 καμίνους. Η αξιοποίησή 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.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πλέον έχουν ξεπεραστεί 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. Είναι γεγονός ότι 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 πλεονεκτήματά τους για την άλεση του κλίνκερ συνοψίζονται: i) στην εξοικονόμηση ενέργειας, ii) στην παραγωγή ενός ποιοτικότερου προϊόντος και iii) στην απλοποίηση της όλης διεργασίας. Ισχύουν βεβαίως και τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη μελέτη του πίνακα 7. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

Για τους ως άνω λόγους οι κάθετοι μύλοι έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλείς στη βιομηχανία τσιμέντου, με αποτέλεσμα από τις αρχές του 20ού αιώνα οι παραγγελίες των κάθετων μύλων συνολικά για την άλεση πρώτων υλών και κλίνκερ να έχουν ξεπεράσει σημαντικά αυτές των σφαιρόμυλων.

3.10 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗΝ ΑΛΕΣΗ ΤΗΣ ΦΑΡΙΝΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΛΙΝΚΕΡ

Η πιο βασική διαφορά ανάμεσα στην άλεση του κλίνκερ και των πρώτων υλών είναι η διαφορετική αλεστικότητα των δύο αυτών υλικών. Συγκεκριμένα το κλίνκερ είναι πιο δυσάλεστο από ό,τι οι πρώτες ύλες. Αυτό έχει άμεση επίπτωση στην παραγωγική ικανότητα των μύλων, με αποτέλεσμα σε δύο ίδιων διαστάσεων σφαιρόμυλους αυτός που αλέθει φαρίνα ίδιας λεπτότητας με ένα δεύτερο που αλέθει τσιμέντο να παρουσιάζει μεγαλύτερη παραγωγή. Διαφορετικά, η ειδική κατανάλωση ενέργειας, που εκφράζεται σε kWh/t παραγόμενου προϊόντος, να είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση άλεσης κλίνκερ προς τσιμέντο. (Makashev, S.D., 1976)

Η τελική λεπτότητα επίσης των επιμέρους προϊόντων διαφοροποιείται μεταξύ των δύο αυτών υλικών. Έτσι, κατά κανόνα, στην άλεση φαρίνας επιδιώκονται λεπτότητες ακόμα και μεγαλύτερες των 4000 cm²/g, προκειμένου η φαρίνα στη συνέχεια να ψηθεί με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση καυσίμου. Η καλύτερη τιμή λεπτότητας φαρίνας για κάθε τσιμεντοβιομηχανία διαφέρει και είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων μεταξύ των οποίων είναι και τα σχετικά κόστη έψησης και άλεσης, καθώς η άλεση είναι ιδιαίτερα ενεργειοβόρος διεργασία. Αντιθέτως, η τελική λεπτότητα τσιμέντου διαφέρει ανάλογα με τον εκάστοτε τύπο και κατά κανόνα οι τιμές ειδικής επιφάνειας για τους συνηθισμένους τύπους είναι μικρότερες των 4000 cm²/g. Μόνο ορισμένοι ειδικοί τύποι όπως π.χ. είναι τα τσιμέντα υψηλών αρχικών αντοχών πρέπει να αλεσθούν σε μεγαλύτερες τιμές. Ακόμη θα πρέπει να τονισθεί ότι η λεπτότητα της φαρίνας εκφράζεται κύρια με το υπόλειμμα στο κόσκινο των 90 μm (ενδεικτική τιμή 15%), ενώ η λεπτότητα του τσιμέντου με την ειδική επιφάνειά του (cm²/g), μετρούμενη με τη συσκευή Blaine.

Άλλη διαφορά στις δύο αυτές περιπτώσεις άλεσης είναι η φθοροποιός δράση που παρουσιάζουν, με αποτέλεσμα το κλίνκερ, όπως προαναφέρθηκε, να επιφέρει πολύ μεγαλύτερες φθορές τόσο στα αλεστικά σώματα (πίνακας 6) όσο και στην επένδυση του μύλου. Λόγω αυτού του γεγονότος οι μύλοι τσιμέντου κατασκευάζονται από ανθεκτικότερα χαλυβοκράματα και χρησιμοποιούν σκληρότερα αλεστικά, με αποτέλεσμα τη σχετική καθυστέρηση της εφαρμογής των κάθετων μύλων (3.9) στην άλεση του κλίνκερ. (Παπαϊωάννου Ν., 1998)

Εκτός αυτών υπάρχει διαφορά στις θερμοκρασίες που επικρατούν μέσα στο μύλο. Συγκεκριμένα, ενώ στους μύλους φαρίνας είναι επιθυμητές σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (300-400°C) για την απομάκρυνση της υγρασίας των πρώτων υλών, στους μύλους τσιμέντου αντιθέτως αποφεύγονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 105-110°C, λόγω του κινδύνου της μερικής αφυδάτωσης της γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) και της μετατροπής της στην ημιυδρική μορφή ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), η οποία δεν ενδείκνυται για τη ρύθμιση του χρόνου πήξης. Έτσι, ενώ οι μύλοι φαρίνας συνδέονται είτε με πυρεστία (οι παλαιότεροι) είτε με σωληνώσεις προσαγωγής των αερίων των περιστροφικών καμίνων (οι πιο σύγχρονοι), στους μύλους τσιμέντου υπάρχουν συστήματα πρόσθετου αερισμού, συστήματα διαβροχής του εξωτερικού μανδύα καθώς και συστήματα ψεκασμού νερού μέσα στο μύλο με σκοπό την απαγωγή της θερμότητας που πλεονάζει [η οποία κυρίως προέρχεται από την κατά 95% μετατροπή της ισχύος του κινητήρα του μύλου σε θερμότητα και από το θερμικό περιεχόμενο του κλίνκερ (100°C)]. Ο ψεκασμός δημιουργεί επιπρόσθετα προβλήματα, όπως η ανάγκη συνεχούς ελέγχου του σημείου δρόσου της εγκατάστασης για να αποφευχθεί η υγροποίηση των απομακρυνόμενων υδρατμών, που με τη σειρά της θα προκαλέσει στερεοποίηση του τσιμέντου και έμφραξη κομβικών σημείων του κυκλώματος άλεσης. Άλλο πρόβλημα είναι μία αρχική φάση ενυδάτωσης (προενυδάτωση) των πολύ λεπτών κόκκων μέσα στο μύλο, η οποία οδηγεί σε μείωση των αντοχών.

Τέλος κατά την άλεση του τσιμέντου εμφανίζονται εντονότερα τα προβλήματα της συσσωμάτωσης της αλεθόμενης ουσίας και της διαφοροποίησης των ειδικών επιφανειών των επιμέρους συστατικών σε σχέση με την ειδική επιφάνεια του μείγματος. (Μαραγκός Γ., 1995)

4. Η ΕΨΗΣΗ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΨΗΣΗ

Η έψηση είναι η βασική διεργασία της παραγωγικής διαδικασίας τσιμέντου, δεδομένου ότι καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Κατά την έψηση γίνονται οι βασικές αντιδράσεις που σταδιακά οδηγούν στο μετασχηματισμό των πρώτων υλών από ασβεστόλιθο και άργιλο στα διπλά και τριπλά οξειδία που αποτελούν τις διάφορες ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ. Οι αντιδράσεις αυτές είναι αρκετά περίπλοκες και δεν είναι μελετημένες σε όλες τους τις λεπτομέρειες, καθόσον τα μείγματα των πρώτων υλών σχεδόν ποτέ δεν είναι ακριβώς τα ίδια, ενώ επιπλέον κάθε περιστροφική κάμιнос (Π.Κ.), που είναι ο καθιερωμένος τύπος αντιδραστήρα για την έψηση του τσιμέντου, έχει τις ιδιαιτερότητές της που σε μεγάλο βαθμό επηρεάζουν τις αντιδράσεις. Η ύπαρξη διαφόρων τεχνολογιών αναφορικά με τις μεθοδολογίες έψησης, η χρησιμοποίηση διαφόρων τύπων προθερμαντών, ψυγείων και καυσίμων, περιπλέκουν ακόμα περισσότερο το πρόβλημα. Δεδομένου επίσης ότι είναι το περισσότερο ενεργειοβόρο τμήμα της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου, επικεντρώνει τις προσπάθειες για εξοικονόμηση ενέργειας που προφανώς δεν πρέπει να γίνονται σε βάρος της ποιότητας του προϊόντος, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι το κλίνκερ.

Η αντιμετώπιση του θέματος θα γίνει τόσο από τη σκοπιά της τεχνολογίας έψησης, όπου θα αναφερθούν τα συστήματα έψησης, οι τύποι των Π.Κ., τα καύσιμα, τα πυρότουβλα και η τεχνολογία της ψύξης, που κατά πάγια τακτική αντιμετωπίζεται μαζί με την έψηση, όσο και από τη σκοπιά της χημείας της έψησης, όπου και θα αναφερθούν οι βασικές αντιδράσεις μετασχηματισμού. (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

4.2 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΨΗΣΗΣ

Δεδομένου ότι η έψηση είναι η περισσότερο ενεργειοβόρος διεργασία της βιομηχανίας τσιμέντου, η ικανοποίηση στόχων αντίστοιχων με αυτούς της άλεσης καθίσταται περισσότερο επιτακτική. Έτσι, προκειμένου η έψηση να είναι όσο το δυνατό πιο λειτουργική, θα πρέπει να καλύπτονται οι στόχοι που αναφέρονται στον

πίνακα 8. Στον ίδιο πίνακα αναφέρονται και οι δευτερεύουσες συνθήκες, των οποίων η ικανοποίηση συνθέτει την κάλυψη του στόχου και οι οποίες πολλές φορές επηρεάζονται από άλλους στόχους, καθιστώντας ακόμα συνθετότερη τη διεργασία της έψησης. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Αναλυτικότερα, για τους τέσσερις αυτούς στόχους θα πρέπει να αναφερθούν τα εξής:

α. Ελάττωση του κόστους παραγωγής: Είναι η πιο γενική διατύπωση ενός στόχου και προφανώς αποτελείται από ένα κλάσμα στο οποίο αριθμητής είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής και παρονομαστής η κατανάλωση ενέργειας, παράγοντες που αναλύονται στη συνέχεια. Περιλαμβάνει την οικονομία του συνόλου της παραγωγής και αποτελεί τη βάση για όλες τις τεχνικές μετρήσεις. Συνήθως εκφράζεται σε kJ/kg παραγόμενου κλίνκερ. Οι δευτερεύουσες συνθήκες εξασφαλίζουν ότι η ελάττωση του κόστους της παραγωγής δεν πρέπει να γίνει σε βάρος της ποιότητας του προϊόντος.

β. Μεγιστοποίηση της παραγωγής της Π.Κ.: Ο στόχος αυτός αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου στο προϊόν της έψησης (κλίνκερ) δε δικαιολογούνται έντονες ποιοτικές αποκλίσεις. Πρέπει οι όποιες επεμβάσεις γίνουν να μη θίγουν την ποιότητα του προϊόντος, να μην γίνουν αιτία για απρόβλεπτες φθορές των εγκαταστάσεων και να μην προκαλούν ρύπανση του περιβάλλοντος. Εξυπακούεται ότι θα έχει εξασφαλισθεί η εγγυημένη από τον κατασκευαστή παραγωγικότητα των μηχανημάτων.

γ. Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας: Η έψηση είναι η περισσότερο ενεργειοβόρος διαδικασία στη βιομηχανία τσιμέντου και έτσι οι προσπάθειες για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας αντανακλούν στη μείωση κόστους σε όλη την τσιμεντοβιομηχανία. Για το λόγο αυτό την τελευταία εικοσαετία μέσα από νέα συστήματα έψησης που έχουν εγκατασταθεί στις σύγχρονες βιομηχανίες τσιμέντου η απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή 1 kg κλίνκερ έχει μειωθεί σημαντικά. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι αφενός μεν να εξασφαλίζεται η ποιότητα του προϊόντος, αφετέρου δε να μην απαιτούνται υπερβολικά πάγια κόστη για τη νέα επένδυση.

δ. Ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της ποιότητας του προϊόντος: Αυξανόμενων των απαιτήσεων, ο κυριότερος στόχος στη διαδικασία έψησης ίσως είναι η εξασφάλιση σταθερής και προκαθορισμένης ποιότητας στο κλίνκερ, αφού αυτό με τη σειρά του επηρεάζει καθοριστικά το τσιμέντο. Ο στόχος όμως αυτός προϋποθέτει την εξασφάλιση της απόδοσης του προϊόντος (της ονομαστικής παραγωγής της καμίνου δηλαδή), την οριοθέτηση της κατανάλωσης ενέργειας και τη μη ρύπανση του περιβάλλοντος. (Μαραγκός Γ., 1995)

Πίνακας 8: Βασικοί στόχοι και δευτερεύουσες συνθήκες κατά τη διεργασία της έψησης

Στόχος	Δευτερεύουσες συνθήκες
SK -> min (Κόστος παραγωγής)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εξασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος 2. Εξασφάλιση της ονομαστικής παραγωγής της Π.Κ.
$M_m \rightarrow \max$ (Μεγιστοποίηση παραγωγής)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εξασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος 2. Σεβασμός μιας προκαθορισμένης τιμής για το κόστος παραγωγής 3. Οριοθέτηση των φθορών της εγκατάστασης 4. Ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος
q -> min (Κατανάλωση ενέργειας)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εξασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος 2. Καθορισμένα όρια πάγιου κόστους εξοπλισμού 3. Ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος
$\alpha_M \rightarrow$ σταθερή (Ποιότητα προϊόντος)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Οριοθέτηση της κατανάλωσης ενέργειας 2. Ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος 3. Εξασφάλιση της ονομαστικής παραγωγής

	της Π.Κ.
--	----------

4.3. ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΨΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

Οι φυσικοχημικοί μετασχηματισμοί που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της έψησης μπορούν να ταξινομηθούν για λόγους ευκολίας στις παρακάτω τρεις κατηγορίες (τα ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ που αναφέρονται στο παρόν κεφάλαιο δίνονται στον πίνακα 11 και περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.3).

α. Αντιδράσεις κάτω των 1300°C. Οι σημαντικότερες είναι i) η διάσπαση των αργίλων, ii) η διάσπαση του ασβεστόλιθου και iii) η αντίδραση μεταξύ ασβεστόλιθου ή ακριβέστερα του σχηματισθέντος CaO με τα προϊόντα διάσπασης των πυριτικών και σιδηραργιλικών ορυκτών. Στο στάδιο αυτό, σχηματίζεται σε μικρό βαθμό η υγρή φάση, η παρουσία της οποίας όμως παίζει σημαντικό ρόλο για την προώθηση των αντιδράσεων που ακολουθούν. Στο τέλος αυτού του σταδίου οι κύριες φάσεις που είναι παρούσες είναι οι CaO, C₃S, C₂S, C₃A και C₄AF. Οι δύο τελευταίες φάσεις (C₃A και C₄AF) δεν είναι κατ' ανάγκη ταυτόσημες με τις αντίστοιχες στο τελικό προϊόν.

β. Αντιδράσεις στη θερμοκρασιακή περιοχή των 1300-1450°C (αντιδράσεις κλινκεροποίησης). Σχηματίζεται τήγμα, κυρίως από αργιλικό τριασβέστιο και σιδηραργιλικό ασβέστιο. Στους 1450°C περίπου το 20-30% του αρχικού υλικού είναι στην υγρή κατάσταση. Το μεγαλύτερο μέρος του βελίτη και όλη σχεδόν η ελευθέρα άσβεστος αντιδρούν παρουσία της υγρής φάσης και σχηματίζουν τη φάση του αλίτη.

γ. Αντιδράσεις κατά την ψύξη. Το τήγμα κρυσταλλώνεται, ενώ συγχρόνως συμβαίνουν πολυμορφικές μεταπτώσεις του αλίτη και του βελίτη.

Οι φυσικοχημικοί μετασχηματισμοί που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της έψησης μπορούν να διακριθούν σε 6 θερμοκρασιακές περιοχές, που αντιστοιχούν και στις ζώνες της περιστροφικής καμίνου (πίνακας 9).

Πίνακας 9: Θερμοκρασιακές περιοχές και οι αντίστοιχες δράσεις κατά την έψηση του κλίνκερ

Θερμοκρασιακή περιοχή (°C)	Ζώνη Π.Κ.*	Περιγραφή δράσης
<200	I	Εξάτμιση
200-800	II	Προθέρμανση
800-1100	III	Ασβεστοποίηση
1100-1300	IV	Εξώθερμες αντιδράσεις
1300-1450-1300	v	Κλινκεροποίηση
1300-1000	VI	Ψύξη

* Πολλοί μελετητές ενσωματώνουν την ενδιάμεση ζώνη (IV) στην κλινκεροποίηση (V).

Περισσότερο αναλυτικά οι κυριότεροι μετασχηματισμοί που γίνονται κατά την έψηση φαίνονται στον πίνακα 10. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι διάφοροι ερευνητές εμφανίζουν αποκλίσεις ως προς τις θερμοκρασίες που υποδεικνύουν για τις επιμέρους αντιδράσεις.

Πίνακας 10: Μετασχηματισμοί κατά την έψηση του μείγματος των πρώτων υλών

Θερμοκρασία (°C)	Μετασχηματισμοί
500-600	Αφυδάτωση και διάσπαση αργίλων, σχηματισμός μετακαολίνη ($2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$)
600-700	Διάσπαση του MgCO_3 προς MgO και CO_2
700-800	Διάσπαση του CaCO_3 προς CaO και CO_2
800-900	Σχηματισμός του C_2S
900-950	Μεταβολή των άμορφων SiO_2 , Al_2O_3 σε κρυσταλλικά
900-1000	Αρχή σχηματισμού $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ και του $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ που διασπάζεται στους 1000°C
1100-1200	Σχηματισμός του C_3A και του C_4AF
1260-1300	Πρώτη εμφάνιση υγρής φάσης
1300-1450	Σχηματισμός του C_3S με παράλληλη μείωση του ελ. CaO

Αναφέρθηκε ότι οι κυριότερες ενώσεις που βρίσκονται στις αργίλους είναι ο καολινίτης, ο ιλλίτης, ο μοντμοριλονίτης και ο χλωρίτης, οι οποίες έχουν κρυσταλλικά νερά στο μόριό τους. Οι θερμοκρασίες που αποβάλλουν τα νερά αυτά μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με το ποσοστό των προσμείξεων, την κρυσταλλικότητα του ορυκτού, το μέγεθος των κόκκων, την πυκνότητα, τη θερμική αγωγιμότητα, το περιβάλλον των αερίων κ.λπ. Σε όλες όμως τις περιπτώσεις η αφυδάτωση δεν αρχίζει πριν από τους $400\text{-}450^\circ\text{C}$ και έχει ολοκληρωθεί στους 750°C .

Με βάση την ταξινόμηση που δόθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή των δράσεων που πραγματοποιούνται σε κάθε στάδιο. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

4.3.1 Αντιδράσεις κάτω των 1300°C

Διάσπαση των αργίλων και σχηματισμός προϊόντων. Η συμπεριφορά των αργίλων υπό θέρμανση εξαρτάται από τη χημική σύσταση και την κρυσταλλική δομή τους. Γενικά, τα φυσικά ή χημικά προσροφημένο νερό χάνεται στους $100\text{-}250^\circ\text{C}$, ενώ η αφυδροξυλίωση ξεκινά στους $300\text{-}400^\circ\text{C}$ και ολοκληρώνεται στους $500\text{-}600^\circ\text{C}$. Άργιλοι, στις οποίες το AlO_4^{5-} είναι η κυρίαρχη δομική μονάδα, δε σχηματίζουν φάσεις με ριζικά διαφορετική δομή, όπως συμβαίνει με τα άμεσα προϊόντα της αφυδροξυλίωσης, αλλά υφίστανται διαφορετικού βαθμού δομικές τροποποιήσεις,

λόγω της αντικατάστασης δύο OH^- από ένα O^{2-} . Πέραν των 900°C προκύπτουν νέες κρυσταλλικές φάσεις, οι οποίες είναι συνήθως του τύπου Al-Si σπινέλιου, χριστοβαλίτη και άνω των 1100°C του μουλίτη.

Ο χαλαζίας υφίσταται μια μικρή, ταχεία και αντιστρεπτή μετάπτωση σε α -quartz στους 573°C , ο οποίος, σε σύγκριση με τον τριδυμίτη στους $867-1470^\circ\text{C}$ και τον χριστοβαλίτη άνω των 1470°C , είναι σχετικά ασταθής. Τέτοιες μεταβολές είναι αργές απουσία άλλων ουσιών, όμως επιταχύνονται από την ύπαρξη προσμείξεων και σε θερμοκρασίες άνω των 1000°C οδηγούν στο σχηματισμό χριστοβαλίτη και όχι τριδυμίτη. Το C_2S είναι η πρώτη ασβεστοπυριτική ένωση η οποία σχηματίζεται, όμως η κατάσταση σχετικά με τις ασβεσταργιλικές ενώσεις (C_3A και C_4AF) είναι αρκετά περίπλοκη και είναι δύσκολο να ειπωθεί με ασφάλεια ποια από τις φάσεις είναι το κύριο αρχικό προϊόν. Οι αργιλικές και αργιλοπυριτικές φάσεις συχνά αναφέρονται ως αρχικά και ενδιάμεσα προϊόντα σε εργαστηριακές μελέτες με συνθετικές πρώτες ύλες αναλυτικής καθαρότητας. Η φάση του φερρίτη σχηματίζεται ταχύτατα, και αποτελείται από χαμηλό λόγο Al/Fe . (Makashev, S.D., 1976)

Διάσπαση των ανθρακικών ορυκτών. Η διάσπαση των ανθρακικών ορυκτών είναι μια ετερογενής αντιστρεπτή δράση, ισχυρά ενδόθερμη. Τα θερμοκρασιακά όρια στα οποία πραγματοποιείται ποικίλλουν, αφού επηρεάζονται ισχυρά από τη φύση του ασβεστόλιθου ή δολομίτη, το βαθμό καθαρότητάς του, το σύστημα και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες έχει κρυσταλλωθεί και την παρουσία στις πρώτες ύλες διαφόρων ιοντικών ειδών και ενώσεων. Ο ρυθμός διάσπασης αυξάνει σημαντικά μετά τους $500-600^\circ\text{C}$, εφόσον διατηρηθεί χαμηλή η μερική πίεση του παραγόμενου CO_2 ή αν ο ασβεστόλιθος βρίσκεται μαζί με υλικά, όπως ο χαλαζίας ή προϊόντα διάσπασης των αργίλων, τα οποία αντιδρούν με το CaO . Τέτοια μείγματα προκύπτουν ακόμα και στη διάταξη του προασβεστοποιητή, υποβοηθούμενα από τη συσσωμάτωση που προκαλεί η παρουσία ευτηκτικών μειγμάτων, κυρίως από θειικά άλατα. Εκεί, ο ρυθμός είναι υψηλότερος σε σχέση με την περιστροφική κάμινο και το 90-95% της διάσπασης έχει ολοκληρωθεί μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα.

Μηχανισμοί των δράσεων. Η διερεύνηση του μηχανισμού των δράσεων στην περιοχή κάτω των 1300°C γίνεται με την εφαρμογή σύγχρονων αναλυτικών τεχνικών, κυρίως της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM) και της περίθλασης ακτινών

X (XRD). Κάτω από τους 1200°C οι δράσεις πραγματοποιούνται στη στερεή κατάσταση, με πρώτο ορατό αποτέλεσμα την εμφάνιση αντιδρώντων ορίων γύρω από μεγάλους κρυστάλλους χαλαζία που αργότερα αντικαθίστανται από συστάδες κρυστάλλων βελίτη.

Μεταξύ 1200 και 1300°C, η οπτική μικροσκοπία υψηλών θερμοκρασιών αποκάλυψε ότι όπου υπήρξε διάρρηξη των κρυστάλλων βελίτη, συστάδες κρυστάλλων βελίτη υψηλού πορώδους είχαν αντικαταστήσει τον προϋπάρχοντα κόκκο χαλαζία, ενώ όπου αυτό δεν είχε συμβεί, τέτοιες συστάδες σχηματίζονταν μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες, έχοντας πιο συνεκτική δομή.

Ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας είναι επιθυμητή σ' αυτή την περιοχή. Χαμηλοί ρυθμοί θέρμανσης μπορούν να επιτρέψουν στα προϊόντα διάσπασης των αργίλων να μετασχηματιστούν σε λιγότερο ενεργές μορφές. Μπορούν επίσης να οδηγήσουν στο σχηματισμό μικροδομών που θα δυσχεράνουν τις δράσεις που ακολουθούν. Σε αντίθεση, η ταχεία θέρμανση αυξάνει την κινητικότητα της υγρής φάσης, με άμεση βελτίωση της ανάμειξης των υλικών, πλούσιων σε Ca και Si. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

4.3.2 Αντιδράσεις στην περιοχή των 1300-1450°C

Οι δράσεις της εξεταζόμενης θερμοκρασιακής περιοχής πραγματοποιούνται παρουσία αξιόλογων ποσοτήτων υγρής φάσης και αποτελούνται από:

- Τήξη των σιδηραργιλικών φάσεων.
- Κρυστάλλωση.
- Αντίδραση μεταξύ της ελευθέρως ασβέστου και μέρους του βελίτη προς σχηματισμό αλίτη.
- Πολυμορφικές αλλαγές του βελίτη προς την α-μορφή.
- Ανακρυστάλλωση και κρυσταλλική ανάπτυξη των φάσεων του αλίτη και βελίτη.
- Απομάκρυνση των πτητικών.

Στη θερμοκρασία κλινκεροποίησης, οι κύριες φάσεις σε ισορροπία είναι του αλίτη, του βελίτη και του τήγματος και από το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων για το σύστημα CaO-C₂S-C₃A-C₄AF προκύπτει ότι η θερμοκρασία είναι 1400°C.

Έχει διαπιστωθεί ότι ο σχηματισμός του C_3S από C_2S και CaO είναι το καθοριστικό βήμα στο στάδιο της κλινκεροποίησης. Παρότι το C_2S και το CaO αντιδρούν μεταξύ τους για τη δημιουργία C_3S , ακόμα και σε αντίδραση στερεής κατάστασης, μια τέτοια διαδικασία είναι πολύ αργή και απαιτεί υψηλή θερμοκρασία για να παρουσιάζει τεχνολογικό ενδιαφέρον. Έτσι ένας λογικός ρυθμός αντίδρασης μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την παρουσία τήγματος. Το τήγμα που σχηματίζεται είναι πλουσιότερο σε Al_2O_3 και Fe_2O_3 και φτωχότερο σε CaO και SiO_2 από ό,τι το μείγμα των πρώτων υλών. Οι θεμελιώδεις μονάδες του είναι τα τετραεδρικά ιόντα SiO_4^{4-} με μικρό βαθμό πολυμερισμού και ιόντα Ca^{2+} , Al^{3+} και Fe^{3+} , εκ των οποίων τα δύο τελευταία σχηματίζουν μεικτά ιόντα με οξυγόνο.

Κατά την πορεία κλινκεροποίησης, το C_2S που έχει ήδη σχηματιστεί σε αντιδράσεις στερεής κατάστασης (που προηγούνται του σχηματισμού τήγματος) και το ελεύθερο CaO που υπάρχει ακόμα στο σύστημα διαλυτοποιούνται στο τήγμα απ' όπου σχηματίζεται το C_3S . Ο ρυθμός αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από το ποσό και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της υγρής φάσης (ιξώδες, επιφανειακή τάση), την παρουσία διαλυμένων ιόντων και δευτερευόντων συστατικών, την κινητικότητα τους στο τήγμα και από τον τρόπο που αυτές οι ιδιότητες μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. (Μαραγκός Γ., 1995)

4.3.3 Αντιδράσεις κατά την ψύξη

Κατά την ψύξη, το κλίνκερ σε υγρή κατάσταση μπορεί να ακολουθήσει ένα συνδυασμό τριών πιθανών καταστάσεων. Στην πρώτη κατάσταση, η ισορροπία μεταξύ των προϋπαρχόντων στερεών φάσεων (αλίτης και βελίτης) διατηρείται συνεχώς. Αυτό προϋποθέτει την εξασφάλιση μεταφοράς υλικού μεταξύ των στερεών και του υγρού προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, όσο υγρό και αν παραμένει. Η κατάσταση αυτή καλείται κρυστάλλωση σε ισορροπία. Στη δεύτερη κατάσταση, το υγρό δεν κρυσταλλώνεται, αλλά σχηματίζει μια άμορφη υαλώδη μάζα. Στην τρίτη κατάσταση, το υγρό κρυσταλλώνεται ανεξάρτητα, χωρίς να αλληλεπιδρά με τις στερεές φάσεις που είναι ήδη παρούσες.

Στη ζώνη κλινκεροποίησης ο αλίτης κρυσταλλώνεται διαχωριζόμενος από το τήγμα. Η διαδικασία κρυστάλλωσης γίνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό αποδίδοντας τους σε διάλυση κρυστάλλους του CaO , γι' αυτόν τον λόγο δεν μπορεί να θεωρηθεί

ως το στάδιο που προσδιορίζει την ταχύτητα του συνολικού φαινομένου. Για την εξήγηση της κρυστάλλωσης, στην περίπτωση μείγματος παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου Portland, γίνεται χρήση τριμερούς διαγράμματος ισορροπίας φάσεων, στο οποίο φαίνονται οι διάφορες-φάσεις και η πορεία σχηματισμού τους στις διάφορες θερμοκρασίες. Η εξέταση της διαδικασίας ψύξης μέσω τριμερούς διαγράμματος αναφέρεται σε μια θεωρητική κατάσταση όπου η ψύξη λαμβάνει χώρα κατά τέτοιο τρόπο που να μην επηρεάζεται η ισορροπία του συστήματος, πράγμα που δε συμβαίνει στην πράξη. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Το ποσοστό της αργιλικής φάσης και το ποσοστό της φάσης του φερρίτη σε τυπικά κλίνκερ ελέγχονται από τη σύσταση της υγρής φάσης και τις συνθήκες υπό τις οποίες η τελευταία κρυσταλλώνεται. Τα παραπάνω πιθανώς να επηρεάζονται και από τη θερμοκρασία κλινκεροποίησης, το χρόνο παραμονής του υλικού στη ζώνη κλινκεροποίησης, το ρυθμό ψύξης αλλά και σε μεγάλο βαθμό από την σύσταση των πρώτων υλών, κυρίως όσον αφορά την παρουσία δευτερευόντων στοιχείων.

Η ταχεία ψύξη του κλίνκερ είναι επιθυμητή, αφού έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό κλίνκερ το οποίο είναι πιο ευάλεστο και στο οποίο είναι καλύτερα ελεγχόμενη η διαδικασία της πήξης (καθώς η σιδηραργιλική φάση αντιδρά αργά με το νερό), ενώ αποφεύγεται μείωση του ποσοστού του αλίτη από διάσπαση ή συμμετοχή του σε αντιδράσεις που συμβαίνουν στην ενδιάμεση φάση.

4.4. ΚΛΙΝΚΕΡ: Η ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Στόχος της διεργασίας της έψησης είναι η εξασφάλιση των θερμικών εκείνων συνθηκών που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση μιας σειράς αντιδράσεων (πίνακας 7.10), τόσο σε στερεή όσο και σε υγρή κατάσταση, οι οποίες οδηγούν τελικά στη δημιουργία των τεσσάρων κύριων ορυκτολογικών συστατικών (φάσεων) του κλίνκερ. Τα οξειδία που απαρτίζουν τις κύριες φάσεις του κλίνκερ είναι τα CaO , SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O_3 , τα οποία αποτελούν και το 95% της μάζας του. Τα δευτερεύοντα συστατικά του κλίνκερ είναι τα MgO , SO_a , K_2O , Na_2O , Cl , P_2O_5 , Cr_2O_3 , TiO_2 και άλλα. Οι κύριες φάσεις που εμφανίζονται στο κλίνκερ (π.χ. αλίτης) δεν είναι καθарές και συνήθως έχουν διάφορες προσμειξεις, που ως επί το πλείστον αποτελούνται από τα δευτερεύοντα συστατικά. Οι τέσσερις κύριες φάσεις του κλίνκερ παρουσιάζονται στον πίνακα 11.

Πίνακας 11: Κύριες ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ

Τύπος	Συντημήςσεις	Ονοματολογία αμιγούς φάσης	Ονοματολογία των φάσεων του κλίνκερ
$3CaO\text{SiO}_2$	C_3S	Πυριτικό τριασβέστιο	Αλίτης
$2CaO\text{SiO}_2$	C_2S	Πυριτικό διασβέστιο	Βελίτης
$3CaO\text{-Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Αργιλικό τριασβέστιο	Αργιλική φάση
$2CaO\text{pAl}_2\text{O}_3(1\text{-p})\text{Fe}_2\text{O}_3$	r,C_4AF	Σιδηραργιλικό ασβέστιο	Σιδηραργιλική φάση ή φάση του φερρίτη

Οι ιδιότητες των τεσσάρων κύριων φάσεων που αποτελούν το κλίνκερ αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

4.4.1 Πυριτικό τριασβέστιο

Ανάλογα με τη θερμοκρασία το C_3S απαντάται σε 7 μορφές, όπως φαίνεται στο σχήμα 34 στο οποίο δίνεται και η κρυσταλλική δομή κάθε μορφής. Προσμείξεις στοιχείων εντός στερεών διαλυμάτων κατά την έψηση του κλίνκερ, συνθήκες ψύξης, κοκκομετρία των υλικών και θερμοκρασία επιδρούν καθοριστικά στον πολυμορφισμό του αλίτη.

620°C	920°C	980°C	990°C	1060°C	1070°C	
T_1	T_2	T_3	M_1	M_2	M_3	R
Τρικλινές	Τρικλινές	Τρικλινές	Μονοκλινές	Μονοκλινές	Μονοκλινές	Ρομβοεδρικό

Σχήμα 34: Μορφές C_3S ανάλογα με τη θερμοκρασία

Το C_3S είναι δυνατό να σχηματίσει στερεά διαλύματα με τα διάφορα δευτερεύοντα οξείδια που προαναφέρθηκαν, που προκύπτουν είτε με αντικατάσταση των Si^{4+} και των Ca^{2+} και κατάληψη των κενών θέσεων των οκταέδρων των κρυσταλλικών πλεγμάτων, είτε με υποκατάσταση του Ca^{2+} από το Mg^{2+} .

Η παραπάνω ακολουθία μετασχηματισμών (Σχήμα 34) είναι μερικώς αντιστρεπτή κατά την ψύξη. Υπάρχει διαφωνία ως προς τον αριθμό εμφάνισης πολυμορφικών

δομών, ανάλογα με τη μεθοδολογία η οποία εφαρμόζεται (η θερμική ανάλυση διαπιστώνει την ύπαρξη των μετασχηματισμών μεταξύ 620-990°C, ενώ η οπτική μικροσκοπία αναγνωρίζει μόνο δύο τρικλινείς μορφές μεταξύ 620-980°C και μόνο δύο μονοκλινείς μεταξύ 980-1070°C). Επίσης είναι πιθανόν από τις θερμικές μεθόδους να μην εντοπίζονται και κάποιες άλλες μορφές λόγω της σχεδόν μηδενικής ενθαλπίας σχηματισμού τους. Στις υψηλές θερμοκρασίες (>1070°C) η φάση του αλίτη εμφανίζει ρομβοεδρική συμμετρία, η οποία μπορεί να ενσωματώνει διάφορα ιόντα σε στερεά διαλύματα, ενώ κατά την ψύξη είναι ασταθής και μεταπίπτει σε άλλες μορφές. Οι υπόλοιπες δομές μπορούν να θεωρηθούν ως διαταραχές της ρομβοεδρικής φάσης, αν και εμφανίζουν διαφορές στις κρυσταλλικές τους παραμέτρους.

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κρυστάλλων του C_3S και η επίδραση των συνθηκών έψησης έχουν μελετηθεί με τη μεθοδολογία της οπτικής μικροσκοπίας. Αναφέρεται μια αστάθεια του C_3S σε ελαφρά αναγωγική ατμόσφαιρα, η οποία αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού του C_3S σε Fe_2O_3 . (Μαραγκός Γ., 1995)

Η ενσωμάτωση προσμείξεων εντός της φάσης R μπορεί να αλλάξει μερικώς την παραπάνω ακολουθία για το αμιγές C_3S , παράλληλα όμως βοηθά τη σταθεροποίησή του (σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 1250°C το C_3S έχει την τάση να διασπάται προς C_2S και CaO). Σε εμπορικά κλίνκερ ανιχνεύεται η ύπαρξη των M δομών ($M^M M_3$ ή μειγμάτων τους) εις βάρος των T δομών και το είδος της M μορφής (M ή M) εξαρτάται, από τις συνθήκες ψύξης και την εισαγωγή του Mg κατά την ανακρυστάλλωση του αλίτη. Γενικά, η σταθεροποιητική δράση του Mg στην M_3 μορφή έχει επιβεβαιωθεί και από άλλους ερευνητές με χρήση οπτικής μικροσκοπίας.

Ετεροάτομα μπορούν να αντικαταστήσουν τα ιόντα του Ca και Si στο κρυσταλλικό πλέγμα του αλίτη ή να καταλάβουν ενδιάμεσες θέσεις. Για παράδειγμα, τα ιόντα του Al^{3+} αντικαθιστούν τα ιόντα Si^{4+} και καταλαμβάνουν ελεύθερες οκταεδρικές θέσεις όταν η συγκέντρωση του Al_2O_3 είναι μικρότερη του 0.45% w/w. Για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Al_2O_3 λαμβάνει χώρα αντικατάσταση των ιόντων Si^{4+} και Ca^{2+} από τα ιόντα Al^{3+} . Η τάση που διαφαίνεται είναι τα μεν ιόντα Na^+ , K^+ , Mg^{2+} και Fe^{3+} να αντικαθιστούν τα Ca^{2+} , τα δε Al^{3+} , P^{5+} και S^{6+} να αντικαθιστούν τα ιόντα Si^{4+} .

Κρύσταλλοι αλίτη που έχουν σχηματιστεί με συνθήκες αργής κρυστάλλωσης εμφανίζουν αρκετά χαμηλή συγκέντρωση ετεροατόμων σε στερεά διαλύματα. Όμως, εντός του πυρήνα των κρυστάλλων του αλίτη εμφανίζεται μεγαλύτερη συγκέντρωση ετεροατόμων από ό,τι στην περιφέρεια. Μεγάλη χρονική παραμονή του κλίνκερ στη θερμοκρασία κλινκεροποίησης οδηγεί στην ανακρυστάλλωση της φάσης του αλίτη με εξαφάνιση των κρυστάλλων μικρού μεγέθους, αλλαγές στην κρυσταλλική συμμετρία και μείωση της ενσωμάτωσης ετεροατόμων. Ακόμη η έγκλειση μικρών κρυστάλλων βελίτη ή υγρής φάσης στη φάση του αλίτη είναι συχνή κατά την ταχεία κρυστάλλωσή του.

Η ανάπτυξη των κρυστάλλων του αλίτη μπορεί να ακολουθήσει δύο πορείες, μια σταθερή και μια ασταθή, οδηγώντας σε διαφορετική κρυσταλλική διαμόρφωση. Η ασταθής, κατά την οποία οι κρύσταλλοι του αλίτη αναπτύσσονται με υψηλούς ρυθμούς εγκλωβίζοντας ένα μεγάλο αριθμό προσμίξεων, οδηγεί σε κρυστάλλους μεγάλου μεγέθους και ακανόνιστου σχήματος. Η σταθερή οδηγεί σε σχηματισμό πολυεδρικών κρυστάλλων που σπάνια εγκλείουν προσμείξεις. Με βάση τα παραπάνω, το περιβάλλον ανάπτυξης των αλιτικών κρυστάλλων μπορεί να χωριστεί, ανάλογα με τους ρυθμούς κρυστάλλωσης και πυρήνωσης, στις εξής κατηγορίες.

1. Υψηλός ρυθμός πυρήνωσης (κύριο στάδιο) και χαμηλός ρυθμός κρυστάλλωσης.

2. Υψηλός ρυθμός ανάπτυξης των κρυστάλλων (κύριο στάδιο) και χαμηλός ρυθμός πυρήνωσης (μικρός αριθμός πυρήνων).

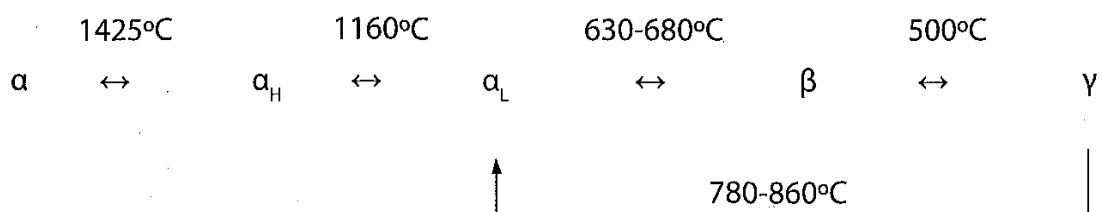
Χαμηλοί ρυθμοί κρυστάλλωσης και πυρήνωσης. (Μαραγκός Γ., 1995)

4.4.2. Πυριτικό διασβέστιο

Βρίσκεται σε πέντε διαφορετικές μορφές ως α -C₂S, α_H -C₂S, α_L -C₂S, β -C₂S και γ -C₂S. Το α -C₂S κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό σύστημα, το β -C₂S στο μονοκλινές, ενώ οι άλλες τρεις μορφές στο ορθορομβικό σύστημα (Σχήμα 35). Η διαφορά μεταξύ τους έγκειται στη διαφορετική πυκνότητα που έχουν. Ανάλογα με το είδος της ψύξης επικρατεί η μία ή η άλλη μορφή.

Τόσο το $\beta\text{-C}_2\text{S}$ όσο και το $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ δημιουργούνται με τη συνήθη διεργασία της δημιουργίας και ανάπτυξης των πυρήνων της νέας φάσης μέσα στη μητρική φάση του $\alpha_{\text{H}}\text{-C}_2\text{S}$. Η μετατροπή του α_{H} , C_2S σε $\beta\text{-C}_2\text{S}$ περιλαμβάνει μια ελαφρά μετατόπιση του κρυσταλλικού πλέγματος, ενώ η μετατροπή του $\beta\text{-C}_2\text{S}$ σε $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ περιλαμβάνει μια πλήρη αναδιάταξη του κρυσταλλικού πλέγματος και επομένως το ενεργειακό φράγμα που πρέπει να υπερπηδηθεί είναι μεγαλύτερο. Για το λόγο αυτό η δημιουργία των πρώτων πυρήνων $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ δε γίνεται ομοιόμορφα σε όλη τη μάζα της μητρικής φάσης, αλλά εντοπίζεται σε σημεία αυξημένης ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs, όπως είναι τα όρια των κόκκων ή οι περιοχές με υψηλή συγκέντρωση αταξιών και παραμορφώσεων του κρυσταλλικού πλέγματος. (Makashev, S.D., 1976)

Η ταχεία ψύξη ευνοεί τη δημιουργία του $\beta\text{-C}_2\text{S}$, το οποίο, σε αντίθεση με το $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες. Ένας επιπλέον λόγος που επιβάλλει την αποφυγή της δημιουργίας του $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ είναι ότι κατά τη μετατροπή του $\beta\text{-C}_2\text{S}$ προς $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, λόγω μη ταχείας ψύξης, το κλίνκερ αποσαθρώνεται εξαιτίας της διαφορετικής πυκνότητας των δύο αυτών μορφών ($\beta\text{-C}_2\text{S}$: 3.28 g/cm^3 , $\gamma\text{-C}_2\text{S}$: 2.95 g/cm^3). Η αύξηση αυτή του όγκου οδηγεί στην αποσάθρωση του κόκκου του κλίνκερ, που εσφαλμένα παλαιότερα θεωρούνταν πλεονέκτημα επειδή ήταν πιο ευάλεστο. Εκτός επομένως από την ταχεία ψύξη που είναι ένας φυσικός τρόπος σταθεροποίησης του $\beta\text{-C}_2\text{S}$, αυτή μπορεί να γίνει με χημικό τρόπο μέσα από την προσθήκη ορισμένων σταθεροποιητών. Τέτοιοι σταθεροποιητές είναι τα ιόντα Sr^{2+} , P^{5+} , V^{5+} , B^{3+} , K^+ , Na^+ με τη μορφή ανθρακικών και θειικών αλάτων ή οξειδίων, καθώς επίσης και περίσσεια 1% σε CaO . Η σταθεροποίηση του $\beta\text{-C}_2\text{S}$ με φυσικό τρόπο μπορεί να επιτευχθεί όταν η σύνθεσή του γίνεται υπό συνθήκες υψηλής πίεσης ή όταν γύρω από τους κόκκους του $\beta\text{-C}_2\text{S}$ δημιουργούνται υμένα που απορροφούν τάσεις, ώστε υπό τις συνθήκες αυτές η μετατροπή του $\beta\text{-C}_2\text{S}$ σε $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ να καθίσταται αδύνατη.



Σχήμα 35: Μορφές C_2S ανάλογα με τη θερμοκρασία

Στη Χημεία του τσιμέντου η πιο σημαντική μορφή είναι αυτή του β - C_2S , στην οποία τα ιόντα του Ca εμφανίζονται με αριθμό ένταξης 6 και 8. Η ένταξη είναι ακανόνιστη, οπότε σχηματίζονται οπές, μικρότερες όμως σε διαστάσεις από αυτές στη δομή του C_3S , ικανές να εγκλείουν ετεροϊόντα. Αν και η δομή του βελίτη εμφανίζεται πιο πυκνή, στη φάση αυτή η δυνατότητα ενσωμάτωσης ετεροϊόντων είναι μεγαλύτερη από αυτή του αλίτη, προερχόμενη όμως κυρίως λόγω διαθέσιμων θέσεων από τη μεριά των ατόμων οξυγόνου. Τα ιόντα του Ca αντικαθίστανται συνήθως από τα στοιχεία K, Na, Fe, Ba, Sr και Mg. Τα πυριτικά τετράεδρα SiO_4^{4-} αντικαθίστανται συνήθως από τα ανιόντα PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , BO_4^{5-} , AlO_4^{5-} , FeO_4^{5-} , CrO_4^{2-} . Υψηλές συγκεντρώσεις προσθήκης σε P_2O_5 και SO_3 σταθεροποιούν τις α' μορφές. Πάντως έχει βρεθεί ότι το α - C_2S υποκατεστημένο με B εμφανίζει δραστικότητα με το H_2O , σχηματίζοντας υδραυλικές ενώσεις.

Οι χαμηλοί ρυθμοί ενυδάτωσης του β - C_2S εμποδίζουν την αμιγή εφαρμογή του σε τσιμέντα. Για την περίπτωση όμως της παραγωγής βελιτικών τσιμέντων (τσιμέντων πλούσιων σε β - C_2S) προσοχή έχει δοθεί στη βελτίωση της ενεργότητάς του. Εκτός της περίπτωσης της χημικής σταθεροποίησης του β - C_2S με την προσθήκη δευτερευόντων στοιχείων, έχει αναφερθεί η αύξηση της ενεργότητάς του με συνθήκες ταχείας έψησης, ταχείας ψύξης αλλά και εφαρμογή μη συμβατικών τεχνικών, όπως η υδροθερμική κατεργασία και η διεργασία sol-gel. Το σχηματιζόμενο β - C_2S εμφανίζει πόρους μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας, μικρότερη κατανομή κρυστάλλων με αυξημένο βαθμό εμφάνισης τάσεων σε μικροσκοπικό επίπεδο και έτσι υψηλότερη υδραυλική ενεργότητα. Ακόμη, έχει μελετηθεί η χρήση των Na_2SO_4 , K_2SO_4 και Ba_2SiO_4 ως ενεργοποιητών της υδραυλικής συμπεριφοράς του βελίτη, και τα καλύτερα αποτελέσματα έδωσε το Ba_2SiO_4 , το οποίο σχηματίζει στερεά διαλύματα με το C_2S αυξάνοντας τη δραστικότητά του. (Μαραγκός Γ., 1995)

4.4.3. Αργιλικό τριασβέστιο

Υπάρχει μόνο μία μορφή του C_3A με πυκνότητα 3.04 g/cm^3 που τήκεται στους 1542°C και ανήκει στο κυβικό σύστημα. Η μεγαλύτερη ποσότητα C_3A στο κλίνκερ εμφανίζεται από την κρυστάλλωση περιοχών υπόψυκτου τήγματος. Η φάση του τήγματος περιέχει σχετικά μικρή ποσότητα SiO_2 και η κρυστάλλωσή της οδηγεί κυρίως σε σχηματισμό C_3A και φερρίτη. Όταν η κρυστάλλωση των C_3A και φερρίτη

από το τήγμα πραγματοποιείται με συνθήκες χαμηλού ρυθμού ψύξης, αυξάνεται ο σχηματισμός στερεών διαλυμάτων που περιέχουν SiO_2 , μειώνοντας έτσι την ικανότητά του να σχηματίσει C_2S , C_3S κ.λπ., επηρεάζοντας έτσι την ορυκτολογική ισορροπία του κλίνκερ. Έτσι το πυρίτιο που δεσμεύεται σε στερεά διαλύματα του C_3A δεν είναι διαθέσιμο για το σχηματισμό των πυριτικών φάσεων, αλλάζοντας το λόγο $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$. Σχηματίζει στερεά διαλύματα σε θερμοκρασίες 1325-1350 °C με τα SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , που προκύπτουν με αντικατάσταση του αργιλίου και του ασβεστίου με τα αντίστοιχα ιόντα. (Παπαϊωάννου Ν., 1998)

4.4.4. Σιδηραργιλικό τετρασβέστιο ή φάση του φερρίτη

Η φάση του φερρίτη (C_4AF) δεν έχει μία καθορισμένη χημική σύνθεση. Το C_4AF είναι μία σειρά στερεών διαλυμάτων της ένωσης C_2F ($x=0$) και ενός υποθετικού C_2A ($x=1$), η οποία μπορεί να παρασκευαστεί για $0 < x < 0.7$ στο γενικό τύπο $\text{Ca}_2(\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{O}_5$. Σε αυτή τη σειρά υπάρχουν μεταξύ των άλλων και τα στερεά διαλύματα C_6AF_2 , C_3AF ($x=0.5$) και $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$. Είναι γνωστοί δύο μετασχηματισμοί του C_2F στους 430°C και 690°C. Το C_4AF σχηματίζει στερεά διαλύματα με διάφορα οξειδία όπως τα CaO , SiO_2 , MgO , Na_2O , Mn_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 . Το MgO μπορεί να διαλυτοποιηθεί μέχρι ποσοστού 1.5-2%. Πέρα από αυτή την περιεκτικότητα κρυσταλλώνεται, ως ελεύθερο MgO με τη μορφή του περίκλαστου. Αν στο C_4AF ένα μικρό μέρος των ιόντων Ca αντικατασταθούν από ιόντα Mg ή/και ένα μικρό μέρος των ιόντων Fe αντικατασταθούν από ιόντα Mn , τότε το προϊόν που προκύπτει ενυδατώνεται ταχύτερα. Αντικαθιστώντας στο C_4AF τμήμα ή ολόκληρο το οξείδιο του σιδήρου με Mn_2O_3 , προκύπτουν ενώσεις που κατά την ενυδάτωση δίνουν τη φτωχή σε άσβεστο εξαγωνικής μορφής ενυδατωμένη φάση του C_2AH_8 . (Παπαϊωάννου Ν., 1998)

4.5. ΕΨΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

4.5.1. Παράγοντες που επιδρούν στην εψησιμότητα

Η εψησιμότητα είναι η ικανότητα για έψηση του μείγματος των πρώτων υλών και είναι παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική για τη βιομηχανία τσιμέντου. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος μέτρησής της είναι με προσδιορισμό της ελευθέρως ασβέστου ($f\text{CaO}$), δηλαδή του CaO που δεν ενώνεται σε κάποια φάση του κλίνκερ, μετά από

ψήσιμο του μείγματος των πρώτων υλών για έναν ορισμένο χρόνο (t) και σε μία ορισμένη θερμοκρασία (T).

$$f_{CaO} = f(t, T) \quad (16)$$

Όταν έχει σχηματισθεί υγρή φάση, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1300°C, η εψησιμότητα ελαττώνεται με την αύξηση του f_{CaO} . Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι για το f_{CaO} υπάρχει μέγιστο όριο συμμετοχής του στο κλίνκερ (2% κ.β.), αφού κατά την ενυδάτωσή του προς $Ca(OH)_2$ ενυδατώνεται με διαφορετικό ρυθμό από τα υπόλοιπα συστατικά του κλίνκερ.

Η εψησιμότητα επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, μερικοί από τους οποίους αναφέρθηκαν και στο κεφάλαιο των πρώτων υλών. Εκτός όμως από τις πρώτες ύλες, η εψησιμότητα επηρεάζεται από παραμέτρους που σχετίζονται άμεσα με την κάμινο και γενικότερα την ακολουθούμενη μεθοδολογία έψησης. Το σύνολο των παραγόντων που επιδρούν στην εψησιμότητα αναφέρεται στη συνέχεια.

α. Ορυκτολογική σύσταση μείγματος πρώτων υλών: Ασβεστόλιθοι, αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες, διορθωτικές πρώτες ύλες, ρυθμιστές έψησης.

Τα σημεία στα οποία επιδρά (θετικά ή αρνητικά) η ποιοτική και ποσοτική ορυκτολογική σύσταση της φαρίνας στην εψησιμότητα (έμμεσα ή άμεσα) είναι τα εξής:

- Ποσοστό απαραίτητου νερού για τους πολτούς των πρώτων υλών (κυρίως για περιπτώσεις υγρής και ημιυγρής μεθόδου).
- Ρεολογικές ιδιότητες μείγματος πρώτων υλών.
- Συμπεριφορά της φαρίνας κατά την ξήρανση.
- Απόδοση της κουφετοποίησης της φαρίνας (ημιυγρή μέθοδος).
- Μηχανική και θερμική σταθερότητα των κόκκων της φαρίνας.
- Κατανάλωση ειδικής θερμότητας κατά την έψηση του κλίνκερ.

Οι ρυθμιστές έψησης (modifiers) είναι ευτηκτικές ενώσεις που προστίθενται στη φαρίνα και επιδρούν στην υγρή ή/και στη στερεή-υγρή φάση. Τέτοιες ενώσεις είναι τα CaF_2 , Na_2SiF_6 , $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $Ca_3(PO_4)_2$, οι οποίες αναφέρονται ως fluxes και mineralizers και οι οποίες χρησιμοποιούνται στο μείγμα σε πολύ μικρές ποσότητες. Στόχοι της χρησιμοποίησής τους είναι η αύξηση της απόδοσης του προϊόντος, η εξοικονόμηση ενέργειας και η βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος. Η δράση τους

έγκειται στη μείωση της θερμοκρασίας που εμφανίζεται η υγρή φάση και στην παράλληλη επιτάχυνση του ρυθμού της κλινκεροποίησης. Επιμέρους δράσεις είναι η επιτάχυνση της διάσπασης του CaCO_3 , η επιτάχυνση των αντιδράσεων στη στερεή φάση, η ελάττωση του ιξώδους και η αύξηση του συντελεστή διάχυσης της υγρής φάσης καθώς και ο μετασχηματισμός των φάσεων. (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

β. Χημική σύνθεση μείγματος πρώτων υλών: Συσχετίσεις μεταξύ των κύριων συστατικών, πτητικά και μη πτητικά συστατικά.

Η χημική σύσταση του μείγματος των πρώτων υλών επιδρά στους χρόνους αντίδρασης που απαιτούνται για το σχηματισμό των βασικών συστατικών του κλίνκερ. Υπάρχουν οξειδία εκτός των βασικών, όπως τα K_2O , Na_2O , MgO , καθώς και άλλα συστατικά (SO_3 και C1) που σε μικρές ποσότητες επιταχύνουν τις αντιδράσεις κλινκεροποίησης. Τα αλκάλια επηρεάζουν τις ιδιότητες του τηγμένου κλίνκερ και εμποδίζουν γενικά την ένωση του CaO με τα άλλα συστατικά και κυρίως με το C_2S .

γ. Κοκκομετρική διαβάθμιση μείγματος πρώτων υλών: Λεπτότητα, κατανομή σωματιδίων, ομοιογένεια συστατικών, συσσωμάτωση σωματιδίων.

Έχει αναλυθεί η σημασία της λεπτότητας του μείγματος των πρώτων υλών στην έψησή του.

δ. Θερμική κατεργασία μείγματος πρώτων υλών: Μέγιστη θερμοκρασία κλινκεροποίησης, ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας, χρονική παραμονή στη ζώνη κλινκεροποίησης.

Η θερμική κατεργασία του μείγματος των πρώτων υλών στοχεύει στην επίτευξη των θερμοκρασιακών εκείνων συνθηκών που θα επιτρέψουν τη δημιουργία του αλίτη (C_3S). Αυτό επιτυγχάνεται με έψηση του μείγματος σε θερμοκρασία $1450 \pm 25^\circ\text{C}$. Μια πολύ υψηλή θερμοκρασία έψησης επιφέρει μεγάλη καταπόνηση του κελύφους και των πυρότουβλων της καμίνου και παράλληλα μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου, μείωση των αντοχών του τσιμέντου και σχηματισμό μεγαλύτερων κρυστάλλων αλίτη. Η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 1360°C στους 1420°C έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου κλινκεροποίησης στο μισό. Η μέγιστη θερμοκρασία κλινκεροποίησης $T(^{\circ}\text{C})$, σε σχέση με την % κ.β. περιεκτικότητα του κλίνκερ στα ορυκτολογικά του συστατικά, δίνεται από τη σχέση (17).

$$T = 1300 + 4.51 C_3S - 3.74 C_3A - 12.64 C_4AF \quad (17)$$

Έτσι για $C_3S=58\%$, $C_3A=9\%$ και $C_4AF=10\%$, η θερμοκρασία κλινκεροποίησης είναι 1401.5°C , ενώ η απαίτηση για αύξηση κατά 2% του C_3S (από 58% σε 60%) προϋποθέτει αύξηση της θερμοκρασίας κατά 9°C . Η ορυκτολογική σύσταση του κλίνκερ προκύπτει από τη χημική του ανάλυση με βάση τις σχέσεις του Bogue.

Αναφορικά με την επίδραση του χρόνου παραμονής στη ζώνη κλινκεροποίησης, μία αύξηση του χρόνου αυτού έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Ελάττωση του C_3A και αύξηση του C_4AF .
- Ελάττωση του C_2S και αύξηση του C_3S .
- Μικρότερες μηχανικές αντοχές στις πρώιμες ηλικίες και μεγαλύτερες στις μετέπειτα ηλικίες.
- Μείωση της θερμότητας ενυδάτωσης.

Ένα μη υπερψημένο κλίνκερ παράγει καλύτερη ποιότητα τσιμέντου ακόμα και με σχετικά υψηλό ποσοστό $fCaO$.

ε. Συνθήκες σχηματισμού υγρής φάσης: Θερμοκρασία σχηματισμού υγρής φάσης, ποσότητα και ιξώδες υγρής φάσης, επιφανειακή τάση, ευκινησία ιόντων.

Ο σχηματισμός της υγρής φάσης και ειδικότερα η θερμοκρασία σχηματισμού της, η ποσότητά της, το ιξώδες, η επιφανειακή τάση και η ευκινησία των ιόντων εξαρτώνται κυρίως από την περιεκτικότητα σε A, F, M όπως επίσης από την περιεκτικότητα στα λιγότερο πτητικά και στα μη πτητικά συστατικά. Εάν μάλιστα το ποσό της υγρής φάσης αυξάνει αργά, τότε η σύσταση του κλίνκερ μεταβάλλεται μέσα σε πλατιά όρια. (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

Το μείγμα των πρώτων υλών, που οδηγεί σε κλίνκερ με ποσοστό υγρής φάσης περίπου 25%, θεωρείται ιδανικό για τη διάρκεια ζωής των πυρότουβλων, την οικονομία καυσίμου, το γρήγορο σχηματισμό του C_3S , μέσα από την αντίδραση C_2S με $fCaO$, και την οικονομικότητα της άλεσης του κλίνκερ.

Η % υγρή φάση (LF) στους 1450°C συνήθως υπολογίζεται με τον τύπο των Lea και Parker, σύμφωνα με τις σχέσεις (18) και (19), όπου ως AR συμβολίζεται ο αργιλικός δείκτης.

$$LF = 3.0A - 2.28F + K + N + M \text{ όταν } AR > 1.38 \quad (18)$$

$$LF = 8.5A - 5.22F + K + N + M \text{ όταν } AR < 1.38 \quad (19)$$

στ. Ποιότητα κλίνκερ: πυριτικές φάσεις, σιδηραργιλικές φάσεις.

Η αύξηση του C_3S επιδρά αρνητικά στην εψησιμότητα του κλίνκερ, ενώ θετική είναι η επίδραση των C_3A και C_4AF και ειδικά του τελευταίου.

ζ. Τέφρα καυσίμου: απορροφούμενη ποσότητα, σύσταση, λεπτότητα.

Αναλύεται η επίδραση της τέφρας του καυσίμου στην εψησιμότητα.

η. Ατμόσφαιρα καμίνου: οξειδωτικές ή αναγωγικές συνθήκες.

Σχετικά με την ατμόσφαιρα της καμίνου, οι αναγωγικές συνθήκες μέσα στην Π.Κ. (ανεπαρκές οξυγόνο στα αέρια της καμίνου) κατά την έψηση του κλίνκερ επηρεάζουν το χρώμα του κλίνκερ λόγω της δημιουργίας FeO , επιταχύνουν την πήξη δεδομένου ότι αυξάνεται το ποσοστό του C_3A σε βάρος του C_4AF και μειώνουν τις αντοχές λόγω της μείωσης του C_3S κατά τη διάρκεια της ψύξης. Ως εκ τούτου επιδιώκεται κατά την έψηση να επικρατούν οξειδωτικές συνθήκες (μικρή περίσσεια οξυγόνου στα καυσαέρια). (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

4.5.2 Ποσοτική έκφραση της εψησιμότητας

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι εμπειρικοί τύποι και έχουν γίνει πολλές προσεγγίσεις για την ποσοτική έκφραση της εψησιμότητας. Υπάρχουν θεωρητικές, ημιπείραματικές και καθαρά πείραματικές προσεγγίσεις.

Ως προς τους θεωρητικούς τύπους, οι πιο γνωστές εκφράσεις για το δείκτη εψησιμότητας (burnability index ή burnability factor) δίνονται στον πίνακα 12 (σχέσεις 20-24).

Οι δείκτες BI_3 και BI_4 φαίνονται ότι είναι περισσότερο πρακτικοί, καθώς περιλαμβάνουν το βαθμό κορεσμού σε άσβεστο (LSF) και τον πυριτικό δείκτη (SR). Οι δείκτες BI_1 και BI_2 προϋποθέτουν υπολογισμό των ορυκτολογικών συστατικών του κλίνκερ, μέσω των τύπων του Bogue. Εντούτοις περισσότερο αποτελεσματικός θεωρείται ο τελευταίος τύπος (24), ο οποίος εκτός από τα χημικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνει τη λεπτότητα των πρώτων υλών καθώς και το ποσοστό της υγρής φάσης.

Πίνακας 12: Εξισώσεις προσδιορισμού του δείκτη εψησιμότητας

Εξίσωση	Επεξηγήσεις
(7.20) $Bl_1 = (C_3S/C_4AF) + C_3A$	$Bl_1, Bl_2, Bl_3, Bl_4, Bl_5$: δείκτης εψησιμότητας
(7.21) $Bl_2 = (C_3S/C_4AF) + C_3A + M + K + N$	M, K, N : % περιεκτικότητα σε MgO, K ₂ O και Na ₂ O αντίστοιχα
(7.22) $Bl_3 = LSF + 10SR - 3(M+K+N)$	SR: πυριτικός δείκτης (σχέση 5.1)
(7.23) $Bl_4 = LSF + 6(SR-2) - (M+K+N)$	LSF: βαθμός κορεσμού σε άσβεστο (σχέση 5.5 ή 5.6)
(7.24) $Bl_5 = 55.5 + 11.9R_{90} + 1.58(LSF-90)^2 - 0.43L_c^2$	L_c : ποσοστό υγρής φάσης στους 1350°C R_{90} : % υπόλειμμα στα 90 μm των πρώτων υλών.

Ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος τύπος ημιπειραματικής προσέγγισης του δείκτη εψησιμότητας αναφερόμενος ως BC (burnability capacity) δίνεται στη σχέση (25), όπου το C υπολογίζεται από τη σχέση (26). Ο τύπος αυτός στηρίζεται σε μετρήσεις που γίνονται σε εργαστηριακή κλίμακα και ειδικότερα στον ποσοτικό προσδιορισμό του fCaO (% κ.β.) μετά από παραμονή του μείγματος των πρώτων υλών για 20 min σε θερμοκρασίες από 1000 έως 1450°C.

$$BC = 600/C \quad (25)$$

$$C = fCaO_{1000} + 2fCaO_{1100} + 2fCaO_{1200} + 3fCaO_{1300} + 4fCaO_{1350} + 4fCaO_{1400} + 2fCaO_{1450} \quad (26)$$

Όσο ο συντελεστής BC μεγαλώνει, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα για έψηση. Η βιομηχανική πείρα ορίζει ότι ένας ικανοποιητικός δείκτης (συντελεστής) εψησιμότητας κυμαίνεται από 1.8 έως 2.8.

Η πειραματική τέλος προσέγγιση είναι ο καλύτερος τρόπος για τον προσδιορισμό της εψησιμότητας, καθώς, περιλαμβάνοντας δοκιμή στο εργαστήριο στο πραγματικό δείγμα, εμπεριέχει όλες τις γνωστές και άγνωστες παραμέτρους που επηρεάζουν το προς έψηση μείγμα των πρώτων υλών. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την πειραματική μέτρηση της εψησιμότητας. Έτσι, 1g του μείγματος πυρώνεται για 20 min στους 1100°C και μετά προσδιορίζεται το fCaO (% κ.β.). Παράλληλα, στο μείγμα των πρώτων υλών προσδιορίζονται η % απώλεια πύρωσης (LOI) και το ολικό CaO.

Τέλος, η εψησιμότητα BS (burnability scale) προσδιορίζεται με βάση τη σχέση (27). (Μαγκανάρη Κ., 2002)

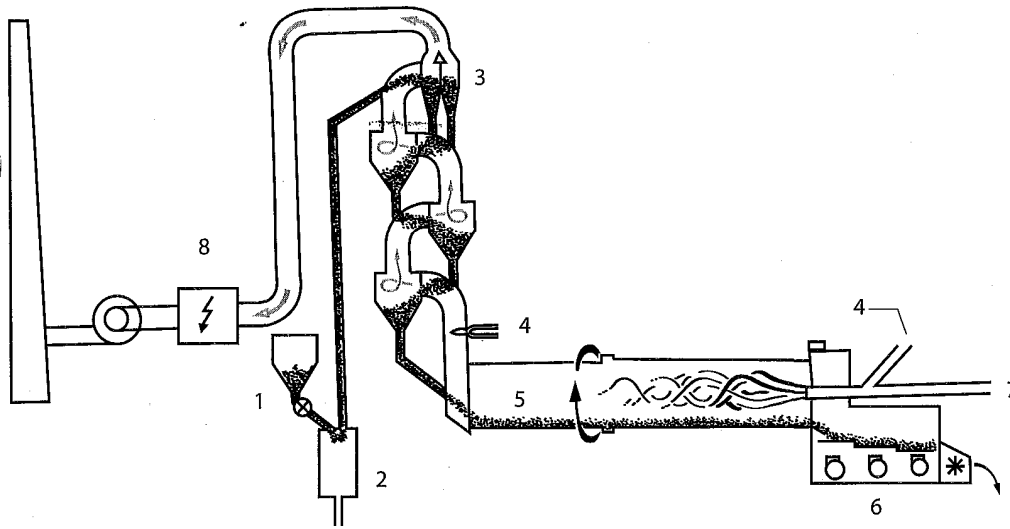
$$BS = fCaO (0.1 LOI) / CaO \quad (27)$$

4.6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΨΗΣΗΣ

4.6.1 Συστήματα έψησης

Η έψηση του μείγματος των πρώτων υλών γίνεται σε περιστροφικές καμίνους (Π.Κ.), όπου μετά από μια σειρά φυσικοχημικών μετασχηματισμών παράγεται το κλίνκερ, που είναι και το βασικό συστατικό του τσιμέντου. Το σύστημα έψησης ή η διάταξη έψησης δεν περιλαμβάνει μόνο την περιστροφική κάμινο, αλλά και μια σειρά άλλων διεργασιών που την υποστηρίζουν, όπως η καύση της χρησιμοποιούμενης καύσιμης ύλης, η εναλλαγή θερμότητας απαερίων και μείγματος πρώτων υλών, η ψύξη του προϊόντος της έψησης (κλίνκερ) και η αποκονίωση των απαερίων της περιστροφικής καμίνου.

Προφανής στόχος των τεχνολογικών εξελίξεων στο πεδίο της έψησης είναι η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και η αύξηση της δυναμικότητας των διατάξεων. Αυτός ο στόχος δεν μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση του μήκους της καμίνου, αφού υπάρχουν σαφείς τεχνολογικοί περιορισμοί σχετικά με τη δυνατότητα στήριξης και περιστροφής, χωρίς παραμορφώσεις, καμίνων μεγάλου μήκους. Ο μόνος λοιπόν τρόπος βελτίωσης της δυναμικότητας και της αποτελεσματικότητας της διεργασίας είναι η κατά το δυνατόν μεταφορά ενός μέρους των δράσεων κατά την έψηση (πίνακας 10) εκτός του περιστρεφόμενου τμήματος της διάταξης. (Μαραγκός Γ., 1995)



Σχήμα 36: Σύστημα έψησης με προασβεστοποιητή

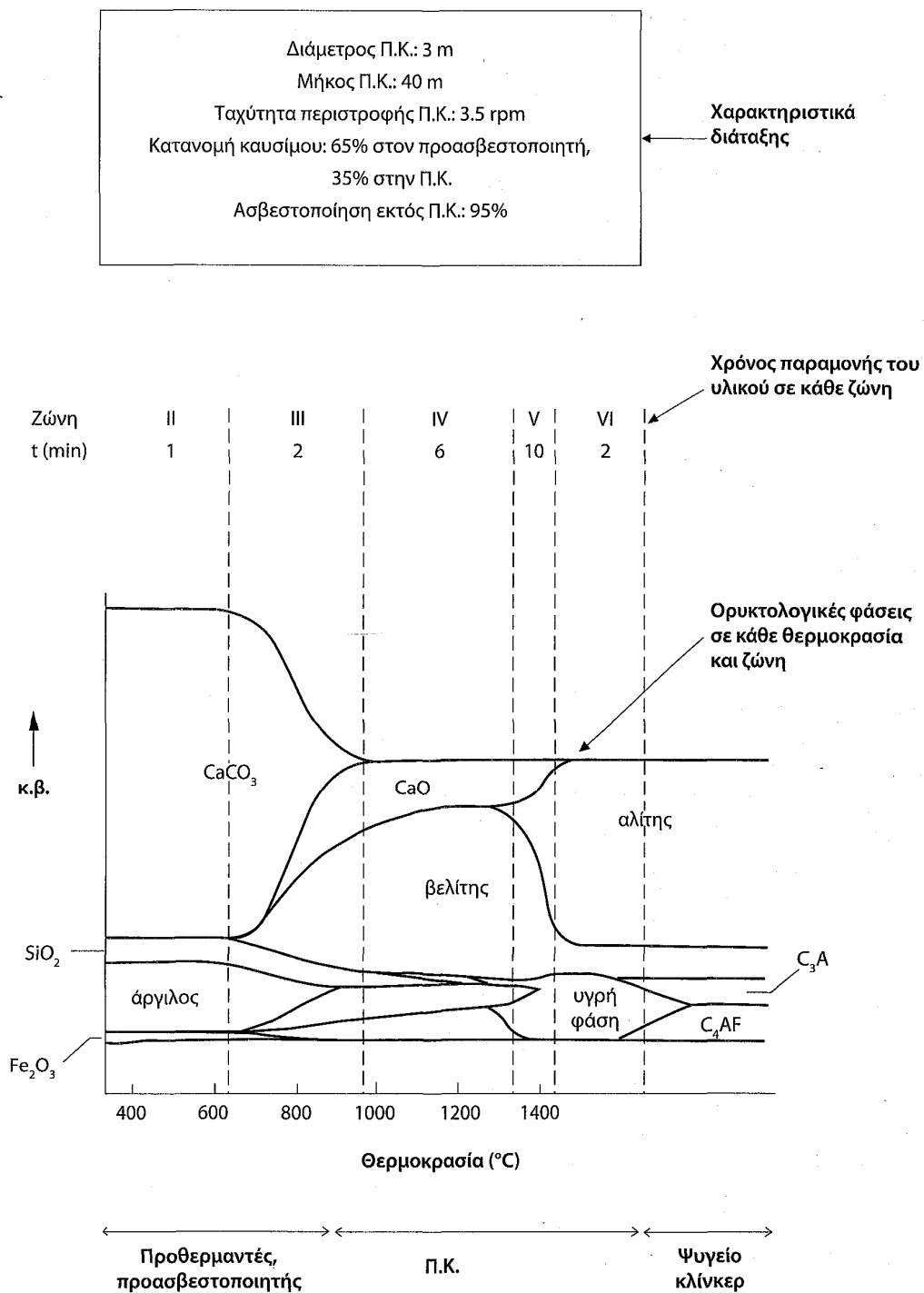
1: σιλό μείγματος Π.Υ., 2: αναβαστήριο, 3: προθερμαντές καμίνου, 4: καύσιμο, 5: περιστροφική κάμινος, 6: ψυγείο κλίνκερ, 7: πρωτογενής αέρας καύσης, 8: ηλεκτροστατικό φίλτρο (στο διάγραμμα δεν εμφανίζεται η διάταξη αποκονίωσης του ψυγείου του κλίνκερ)

Με βάση τα παραπάνω, σε μια σύγχρονη διάταξης έψησης η εξάτμιση και η προθέρμανση πραγματοποιούνται εκτός της περιστροφικής καμίνου και ειδικότερα σε μια σειρά κυκλώνων (ανακομιστές θερμότητας ή προθερμαντές), όπου κυκλοφορούν κατά αντιστροφή το μείγμα των πρώτων υλών και τα απαέρια της καμίνου. Ο αριθμός των κυκλώνων διαμορφώνεται από 4-6 και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με κυριότερο την υγρασία των πρώτων υλών. Ακόμη η ασβεστοποίηση, δηλαδή η διάσπαση του CaCO_3 σε CaO , γίνεται σε ποσοστό περίπου 85-95% εκτός της καμίνου με τη χρήση του προασβεστοποιητή και καύση του 60% περίπου της συνολικά απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου (το υπόλοιπο 40% χρησιμοποιείται στην έξοδο της καμίνου). (Γαζιδέλλη Β., 2007)

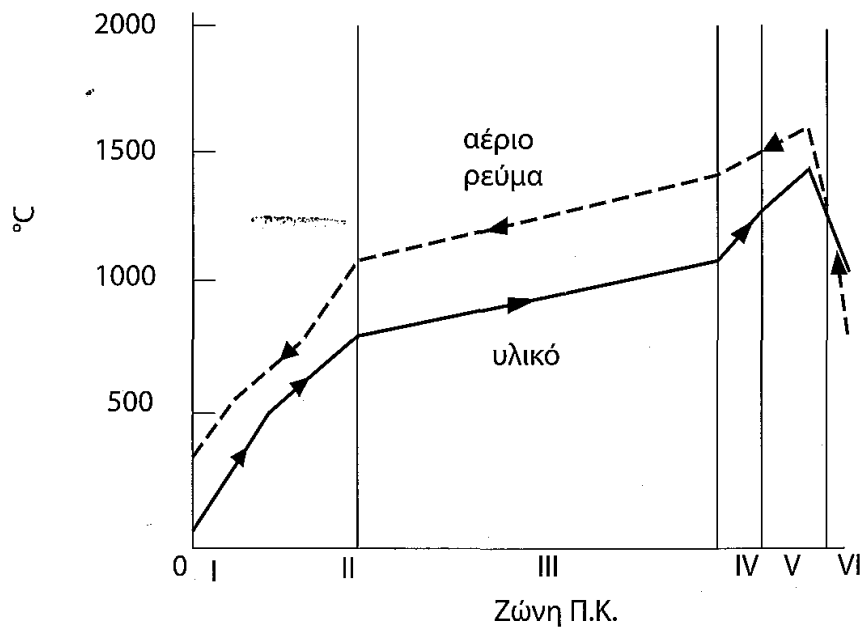
Τα συστήματα έψησης που πληρούν τις παραπάνω απαιτήσεις αναφέρονται ως **συστήματα έψησης με προασβεστοποίηση ή συστήματα έψησης με διπλή καύση** (kiln with precalcination). Στο σχήμα 36 δίνεται ένα τέτοιο σύστημα έψησης.

Στο σχήμα 37 δίνονται τα χαρακτηριστικά μιας διάταξης έψησης, ο χρόνος παραμονής του υλικού στις διάφορες ζώνες όπως και παρατηρούμενες ορυκτολογικές φάσεις σε κάθε θερμοκρασία.

Σε πολλές βιομηχανικές μονάδες είναι εγκατεστημένες διατάξεις έψησης χωρίς προασβεστοποιητή. Η προθέρμανση του υλικού γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο και οι διατάξεις αυτές αναφέρονται ως **συστήματα έψησης με ανακομιστές θερμότητας ή προθερμαντές** (kiln with cyclone-type suspension preheater). Το ποσοστό ασβεστοποίησης εκτός της καμίνου κυμαίνεται από 50-70%. Στο σχήμα 38 δίνονται οι θερμοκρασίες του υλικού και του αέριου ρεύματος κατά την έψηση με τη μεθοδολογία αυτή.



Σχήμα 37: Χαρακτηριστικά διάταξης έψησης με προασβεστοποιητή. Χρόνος παραμονής του υλικού στις διάφορες ζώνες και παρατηρούμενες ορυκτολογικές φάσεις σε κάθε θερμοκρασία

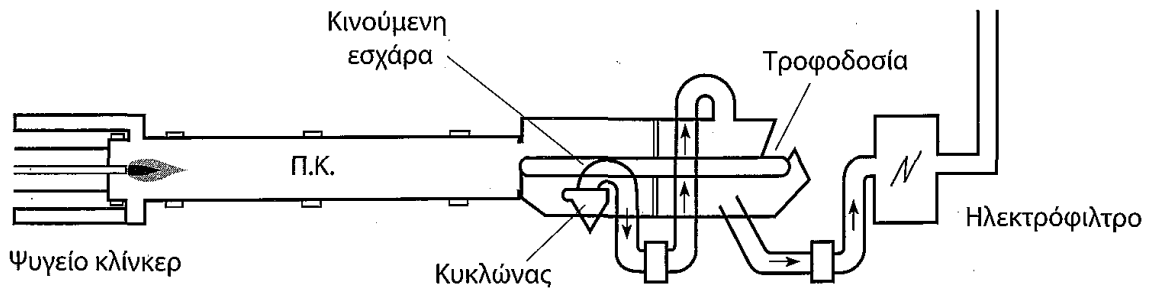


Σχήμα 38: Θερμοκρασίες υλικού και αέριου ρεύματος σε διάταξη έψησης με ανακομιστές θερμότητας

Τέλος, μια άλλη μεθοδολογία έψησης είναι η ημιυγρή μεθοδολογία ή **μέθοδος Lepol**, όπου η φαρίνα τροφοδοτείται υπό μορφή κουφέτων, διαστάσεων 10-20 mm. Τα κουφέτα παρασκευάζονται με ψεκασμό νερού (~18%) σε περιστρεφόμενα τύμπανα, όπου τροφοδοτείται η φαρίνα. Τα κουφέτα που παράγονται με αυτόν τον τρόπο ξηραίνονται και ασβεστοποιούνται μερικώς μέσω εσχαρών προθέρμανσης και στη συνέχεια μεταφέρονται στον περιστρεφόμενο κλίβανο προς έψηση. Το ποσοστό ασβεστοποίησης εκτός της καμίνου είναι της τάξης του 30%. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ομοιογένεια του υλικού και η μικρή επιβάρυνση των απαερίων με σκόνη. Στο σχήμα 39 παρουσιάζεται η μέθοδος Lepol. (Μαραγκός Γ., 1995)

Εκτός από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχει και η **υγρή μέθοδος**, η οποία εφαρμόζεται σε περιοχές όπου λόγω των κλιματολογικών συνθηκών οι πρώτες ύλες έχουν μεγάλα ποσά φυσικής υγρασίας. Στην περίπτωση αυτή η ξήρανση των πρώτων υλών γίνεται στο αρχικό τμήμα της Π.Κ. ή στους ανακομιστές θερμότητας. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η πολύ καλή ομοιογένεια του υλικού και η μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Το μειονέκτημά της είναι η υψηλή κατανάλωση καυσίμου και η μικρή σχετικά δυναμικότητα (συγκρινόμενη με την ξηρή μέθοδο).

Στον πίνακα 13 γίνεται μια σύγκριση των μεθόδων έψησης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Πράγματι η μέθοδος με προασβεστοποιητή μπορεί να δώσει τις μεγαλύτερες δυναμικότητες από όλα τα συστήματα έψησης. Η κατανάλωση καυσίμου είναι σχεδόν ίδια στις διατάξεις με προασβεστοποιητή και προθερμαντές, ενώ στη διάταξη Lerol είναι σχετικά μεγαλύτερη. Η υγρή μέθοδος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και τα μεγαλύτερα μήκη της Π.Κ..



Σχήμα 39: Μέθοδος έψησης Lerol

Πίνακας 13: Σύγκριση μεθόδων έψησης

Χαρακτηριστικά	Υγρή μέθοδος	Ημιυγρή μέθοδος (Lerol)	Ξηρή προθερμαντές	μέθοδος προασβεστοποιητής
Μήκος καμίνου (m)	40-232	40-90	40-95	54-110
Διάμετρος καμίνου (m)	2.4-6.6	3.6-6.0	2.8-6.0	3.5-5.9
Δυναμικότητα (t/d)	100-3350	400-3000	200-3500	1500-8500
Υγρασία τροφοδοσίας (%)	24-48	17-22	<8.0	<8.0
Κατανάλωση καυσίμου κλίνκερ (kJ/kg)	4200-9200	3000-5000	3400-4000	3400-4000

4.6.2. Λειτουργικά χαρακτηριστικά περιστροφικής καμίνου

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της Π.Κ. είναι τα παρακάτω:

α. Βαθμός πλήρωσης

Ως βαθμός πλήρωσης (kiln filling degree, f) ορίζεται ο λόγος της επιφάνειας του κυκλικού τομέα που δημιουργεί το υλικό προς την επιφάνεια μιας κάθετης τομής της

περιστροφικής καμίνου (Π.Κ.) και λαμβάνει τιμές από 5-17%. Το σχήμα 40 παρουσιάζει τη συσχέτιση του βαθμού πλήρωσης, της δυναμικότητας και της διαμέτρου της Π.Κ..

β. Κλίση

Η κλίση εξαρτάται από τη διάμετρο και το βαθμό πλήρωσης της Π.Κ.. Συνήθως λαμβάνει τιμές από 2-6%. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι Π.Κ. διαμέτρου 3.4 m και βαθμού πλήρωσης 10% λειτουργεί με κλίση 4%. Ακόμη, όσο αυξάνονται ο βαθμός πλήρωσης και η διάμετρος, μειώνεται η κλίση της Π.Κ.. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ως κλίση ορίζεται η εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζει η Π.Κ. με το οριζόντιο επίπεδο πολλαπλασιασμένη επί 100. Έτσι γωνία 2° 18' αντιστοιχεί σε κλίση 4%.

γ. Περιφερειακή ταχύτητα περιστροφής

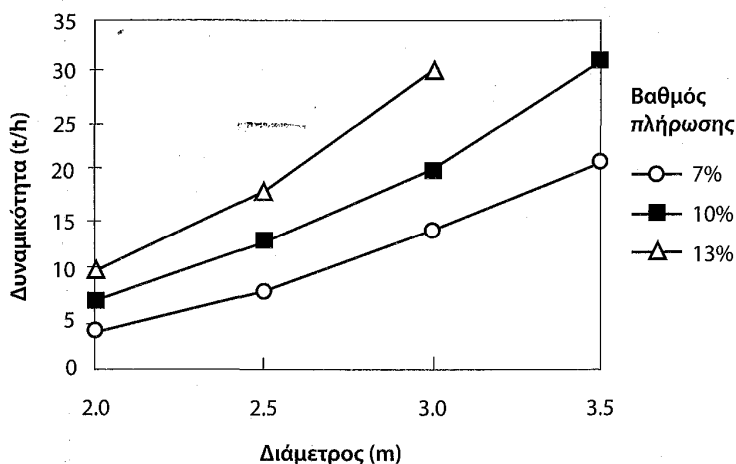
Η περιφερειακή ταχύτητα περιστροφής των Π.Κ. είναι συνήθως 36-40 cm/s.

δ. Χρόνος παραμονής

Ο χρόνος παραμονής (t) του υλικού στις Π.Κ. δίνεται από τη σχέση (7.28).

$$t = (1.77 L \sqrt{\Theta}) / (\rho D \eta) \quad (28)$$

όπου t: χρόνος παραμονής (min) L: μήκος Π.Κ. (m)



Σχήμα 40: Σχέση βαθμού πλήρωσης, διαμέτρου και δυναμικότητας περιστροφικής καμίνου

Θ : γωνία απόθεσης (36° για φαρίνα) ρ : κλίση Π.Κ. ($^\circ$) D : διάμετρος Π.Κ. (m) n : ταχύτητα περιστροφής (rpm) Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε Π.Κ. με $D=3.15$ m, $L=100$ m, $\rho=4.5\%$, $n=3.5$ rpm ο χρόνος παραμονής του υλικού είναι 63 min. (Παπαγεωργίου Δ., Θεολόγος Φ., Τέας Χ., Χανιωτάκης Ε., ΤΕΕ, 2007)

4.6.3. Τα καύσιμα

α. Συμβατικά καύσιμα

Η έψηση της φαρίνας απαιτεί υψηλή κατανάλωση καυσίμου και για το λόγο αυτό η επιλογή του καυσίμου είναι από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους στη λειτουργία μιας βιομηχανίας τσιμέντου. Αέρια (φυσικό αέριο), υγρά (μαζούτ, πετρέλαιο, παραπροϊόντα) και στερεά καύσιμα (κάρβουνο, κοκ και παραπροϊόντα) έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως καύσιμη ύλη στις περιστροφικές καμίνους της βιομηχανίας τσιμέντου. Η επιλογή του καυσίμου καθορίζεται κυρίως από το κόστος του, αφού κατά μια εκτίμηση το 25-30% του συνολικού κόστους παραγωγής αποδίδεται στο καύσιμο. Πάντως τα τελευταία έτη ο περιορισμός της ρύπανσης του περιβάλλοντος είναι καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή της καύσιμης ύλης.

Το φυσικό αέριο είναι το πιο εύχρηστο καύσιμο, αφού λόγω της καθαρότητάς του δεν εισάγονται στην κάμινο άλλα συστατικά, τα οποία να επηρεάζουν τις φυσικοχημικές δράσεις που πραγματοποιούνται. Η χρήση μαζούτ, παρότι από οικονομική σκοπιά συνιστάται, δημιουργεί πολλά προβλήματα, κυρίως στο περιβάλλον αλλά και στην ποιότητα του προϊόντος λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε θειικά (S: 4-5%). Σήμερα οι περισσότερες βιομηχανίες χρησιμοποιούν κάρβουνο και κοκ είτε ανεξάρτητα το καθένα είτε σε συγκεκριμένες αναλογίες. Στον Πίνακα 14 δίνονται ενδεικτικά τα χαρακτηριστικά διαφόρων στερεών καυσίμων, ενώ στον Πίνακα 15 παρουσιάζεται η χημική ανάλυση τέφρας από λιθάνθρακα. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Πίνακας 14: Χαρακτηριστικές ιδιότητες στερεών καυσίμων

Είδος καυσίμου	Υγρασία (%)	Τέφρα (%)	Πτητικά (%)	Μόνιμος άνθρακας (%)	Θερμογόνος δύναμη (Kj/Kg)	S	Cl
Λιθάνθρακας	13.2	15.5	27.7	43.6	24000	1.4	0.65
Λιγνίτης	15.0	5.0	45.0	56.0	20200	1.5	0.12
Κοκ	8.0	0.3	10.3	81.5	32500	5.2	0.00

Πίνακας 15: Ενδεικτική χημική ανάλυση τέφρας (%)

SiO ₂	AlO ₂	FeO ₃	CaO	MgO	K ₂ O+Na ₂ O
51.32	10.19	16.11	14.30	4.15	2.03

Η τέφρα των καυσίμων ενσωματώνεται στο μείγμα των πρώτων υλών και επιδρά στην ορυκτολογική σύνθεση του κλίνκερ. Για τον λόγο αυτό σε κάθε βιομηχανική μονάδα η σύνθεση των πρώτων υλών ρυθμίζεται λαμβάνοντας υπ' όψη και την ενσωμάτωση της τέφρας στις πρώτες ύλες. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι εάν η βιομηχανία θέλει π.χ. φαρίνα με LSF=99% θα πρέπει το τροφοδοτούμενο στην Π.Κ. υλικό να έχει LSF της τάξης του 105%, ανάλογα βέβαια και με την % περιεκτικότητα του καυσίμου σε τέφρα, τη χημική της σύσταση και την ειδική κατανάλωση καυσίμου.

β. Εναλλακτικά καύσιμα

Η βιομηχανία τσιμέντου, με συνεχώς εντονότερους ρυθμούς, έχει εισαγάγει το σχεδιασμό και την κατασκευή εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν απόβλητα και παραπροϊόντα ως δευτερογενή καύσιμα.

Εναλλακτικά ή δευτερογενή καύσιμα ονομάζονται τα υλικά που προέρχονται από διάφορες δραστηριότητες, έχουν υποστεί κάποια προεπιλογή ή προεπεξεργασία, περιέχουν σημαντικό ενεργειακό φορτίο και μπορούν να υποκαταστήσουν παραδοσιακά καύσιμα, όπως το κάρβουνο και το πετ κοκ (petroleum coke). (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Σε αυτά μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται: i) τα παραπροϊόντα από την αποφλοίωση ρυζιού και σιτηρών (rice husk and straw), ii) η σκόνη από την

Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου

επεξεργασία bambou (bambou dust), iii) η ιλύς από την επεξεργασία αστικών αποβλήτων (sewage sludge), iv) οι ασφαλτούχοι σχιστόλιθοι (oil shale), v) τα ελαστικά οχημάτων, vi) τα πλαστικά, vii) η όξινη ιλύς (acid sludge), viii) η ιλύς ασφαλτικών παραπροϊόντων (asphalt sludge) κ.ά.. Επίσης πολλά υποσχόμενη είναι η περίπτωση αποβλήτων από πετρελαιοειδή όπως βαριά κατάλοιπα διαχωρισμού καυσίμων, ορυκτέλαια, αποπλύματα δεξαμενών πλοίων, νερά ιζημάτων τα οποία περιέχουν υδρογονάνθρακες (σεντινόνερα), πετρελαιοειδή που προέρχονται από πετρελαιοκηλίδες, βαριά και ελαφρά υπολείμματα απόσταξης χρησιμοποιημένων ορυκτέλαιων και λιπαρών οξέων.

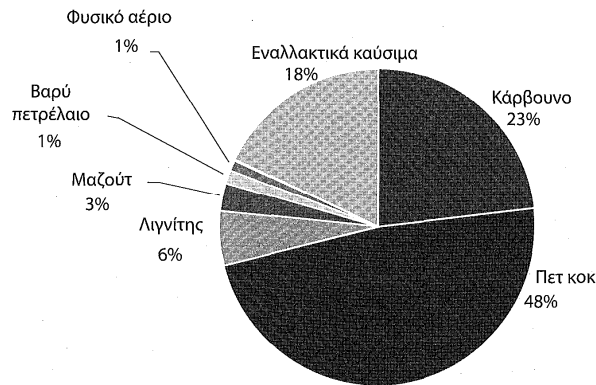
Πίνακας 16: Υλικά που χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά καύσιμα από τις βιομηχανίες τσιμέντου

Βιομηχανικά απόβλητα	Πετρελαιοειδή Λιπαντικά Ιλύς από την παραγωγή ασφάλτου Απόβλητα χημικής βιομηχανίας Απόβλητα άνθρακα από μονάδες παραγωγής λιπασμάτων Διαλύτες
Συνθετικά υλικά	Επαναχρησιμοποιημένα ελαστικά Πλαστικά Πολυμερή Σκόνη από την παραγωγή γραφίτη Χρησιμοποιημένες μπαταρίες
Γεωργικά απόβλητα	Παραπροϊόντα από την αποφλοίωση ρυζιού, σιτηρών, καρύδας, κακάο Παραπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου και χάρτου Παραπροϊόντα της βιομηχανίας τροφίμων
Άλλες πηγές	Ασφαλτούχοι σχιστόλιθοι Αστικά απόβλητα

Κωδικοποιημένα σε διάφορες κατηγορίες τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικά καύσιμα παρουσιάζονται στον πίνακα 16, ενώ στο σχήμα 41, με βάση στοιχεία του CEMBUREAU, αποτυπώνεται ο καταμερισμός των διαφόρων καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν το 2007 για την παραγωγή τσιμέντου στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι το ποσοστό υποκατάστασης καυσίμων στα εργοστάσια τσιμέντου της Ε.Ε. έχει φθάσει κατά μέσο όρο το 18%. Σε

Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου

χώρες με υψηλή περιβαλλοντική συνείδηση, όπως η Γαλλία, η Γερμανία, η Αυστρία, η Ελβετία, το ποσοστό υποκατάστασης ξεπερνά το 25%, ενώ υπάρχουν στον κόσμο πολλά εργοστάσια όπου το ποσοστό υποκατάστασης πρωτογενών καυσίμων φθάνει ή και ξεπερνά το 70%.



Σχήμα 41: Καταμερισμός καυσίμων για την παραγωγή τσιμέντου στην Ε.Ε.
(Cembureau 2007)

Η δυναμική της αλλαγής από παραδοσιακά σε εναλλακτικά καύσιμα μπορεί να συμπεριλάβει πρακτικά όλη την καταναλισκόμενη ενέργεια, η οποία ανέρχεται περί τους $3 \cdot 10^{17}$ καυσίμων ετησίως. Αν και η σημερινή κατάσταση δεν αναμένεται να αλλάξει ριζικά τα επόμενα χρόνια, εντούτοις προσδοκάται μια μέση τιμή αντικατάστασης στερεών από δευτερογενή καύσιμα μεγαλύτερη του 20%, που ισοδυναμεί με κατανάλωση $6 \cdot 10^{16}$ οργανικών παραπροϊόντων ετησίως.

Επιγραμματικά τα οφέλη από τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων είναι τα εξής:

- Μείωση της χρήσης ορυκτών μη ανανεώσιμων καυσίμων (π.χ. κάρβουνο) και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από εξόρυξη και διακίνηση.

- Μείωση των εκπομπών (αέρια θερμοκηπίου) με αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων από υλικά που θα αποτεφρώνονταν με ανάλογες εκπομπές και υπολείμματα.

- Μεγιστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας από τα απορρίμματα. Απευθείας χρήση ενέργειας για παραγωγή κλίνκερ.

• Μεγιστοποίηση της ανάκτησης του μη καύσιμου μέρους των απορριμμάτων και ελάττωση της ανάγκης απόθεσης τυχόν υπολειμμάτων, αφού το ανόργανο μέρος παραμένει στο προϊόν.

Είναι προφανές ότι ο σημαντικότερος όρος που πρέπει να πληρείται κατά τη χρήση οποιουδήποτε δευτερογενούς καυσίμου ή ακόμα και πρώτης ύλης είναι η απαίτηση οι φυσικομηχανικές ιδιότητες του προκύπτοντος τσιμέντου και η συμπεριφορά του ως δομικού υλικού να παραμένουν ανεπηρέαστες. Εκτός αυτού, η προσθήκη υλικών που δυνητικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικά καύσιμα διέπεται από μία σειρά όρων και απαιτήσεων που κωδικοποιημένοι είναι οι εξής:

- ανεπηρέαστες μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά του παραγόμενου τσιμέντου
- περιβαλλοντική συμβατότητα του παραγόμενου τσιμέντου και σκυροδέματος
- περιβαλλοντική συμβατότητα της παραγωγικής διαδικασίας
- σταθερή και ομοιόμορφη παραγωγική διαδικασία

μείωση του κόστους ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος (Μαγκανάρη Κ., 2002)

4.6.4. Η πυρίμαχη επένδυση της περιστροφικής καμίνου

Η εξασφάλιση υψηλής διάρκειας ζωής στην κάμινο, η ελαχιστοποίηση των διακοπών λειτουργίας της για συντήρηση ή επισκευή και η αριστοποίηση της διαχείρισης θερμότητας επιβάλλει την επένδυση της καμίνου με κατάλληλα πυρίμαχα υλικά. Η περιστροφική κάμινο είναι επενδεδυμένη εσωτερικά με πυρότουβλα πάχους 175-250 mm. Η ποιότητα των εγκατεστημένων πυρότουβλων ποικίλλει ανάλογα με τη ζώνη κατεργασίας στην οποία εφαρμόζονται, αφού διαφοροποιούνται ανάλογα και οι υφιστάμενες μηχανικές, φυσικές και χημικές καταπονήσεις.

Στο πρώτο 15-20% του μήκους μιας καμίνου, που λειτουργεί με την ξηρά μεθοδολογία και η θερμοκρασία του υλικού είναι 850-950°C, χρησιμοποιούνται αργιλοπυριτικά πυρότουβλα (SiO_2 : 60%, Al_2O_3 : 40%). Στο επόμενο 20% του μήκους της καμίνου τοποθετούνται πυρότουβλα περιεκτικότητας σε Al_2O_3 μεγαλύτερης από 55% και SiO_2 μικρότερης από 40%. Ακολούθως το επόμενο 20% του μήκους της καμίνου επενδύεται με βασικά πυρότουβλα που περιέχουν τουλάχιστον 55% MgO και λιγότερο από 15% Cr_2O_3 και 10-15% Al_2O_3 . Στη ζώνη έψησης, όπου

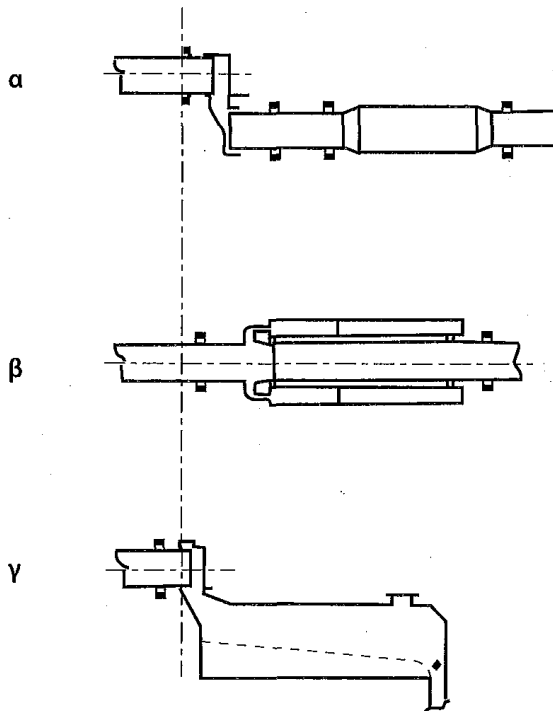
παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες, χρησιμοποιούνται πυρότουβλα υψηλής περιεκτικότητας σε MgO (>85%) και χαμηλής περιεκτικότητας σε Al_2O_3 (<15%). Η θερμική αγωγιμότητα και η αντοχή των πυρίμαχων αυτών είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των πυρότουβλων που χρησιμοποιούνται στις ψυχρότερες ζώνες της καμίνου. Στη ζώνη ψύξης της καμίνου ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των πυρότουβλων θα πρέπει να είναι η αντοχή στην τριβή και η σύνθεσή τους περιλαμβάνει περίπου 55% MgO και λιγότερο από 15% Al_2O_3 .

Στη βιομηχανική πράξη επιδιώκεται η κατά το δυνατόν επιμήκυνση του χρόνου συνεχούς λειτουργίας της καμίνου. Συνήθως η κάμιнос λειτουργεί απρόσκοπτα για χρονικό διάστημα από 3-12)μήνες και ο χρόνος αυτός επηρεάζεται κυρίως από την επένδυση της ζώνης κλινκεροποίησης όπου το πυρίμαχο υλικό υφίσταται τις μεγαλύτερες μηχανικές, φυσικές και χημικές καταπονήσεις. (Μαραγκός Γ., 1995)

4.6.5 Συστήματα ψύξης

Βασικό σημείο της αριστοποιημένης λειτουργίας μιας βιομηχανικής μονάδας είναι η ανάκτηση του θερμικού περιεχομένου των διακινούμενων υλικών. Έτσι το θερμικό περιεχόμενο του κλίνκερ, που παράγεται στην περιστροφική κάμινο και έχει θερμοκρασία της τάξης των $1450^{\circ}C$, ανακτάται μέσω κατάλληλων διατάξεων. Τα ψυγεία του κλίνκερ επιπρόσθετα στοχεύουν στην ταχεία ψύξη του υλικού από τους $1450^{\circ}C$ στους $1200^{\circ}C$. Έχει αποδειχθεί ότι η βραδεία ψύξη του κλίνκερ οδηγεί σε μερική μετατροπή του αλίτη σε βελίτη και ελευθέρα άσβεστο, αυξάνει τη δραστικότητα του C_3A , δημιουργώντας προβλήματα στην πήξη του τσιμέντου, ενώ ακόμη, στην περίπτωση μεγάλης περιεκτικότητας σε MgO, αυτό μπορεί να κρυσταλλωθεί ως περικόλαστο με αποτέλεσμα μειωμένη σταθερότητα όγκου του τσιμέντου.

Οι τύποι των ψυγείων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την ψύξη του κλίνκερ είναι τα πλανητικά ψυγεία, τα περιστροφικά ψυγεία και τα ψυγεία με σχάρες (σχήμα 42).



Σχήμα 42: Χρησιμοποιούμενα ψυγεία κλίνκερ, α: περιστροφικό ψυγείο, β: πλανητικό ψυγείο, γ: ψυγείο με σχάρες

Το 1986 τα πλανητικά ψυγεία αποτελούσαν το 10% των εγκατεστημένων ψυγείων παγκοσμίως. Αποτελούνται από 9-11 ανεξάρτητους σωλήνες ψύξης (διαμέτρου 2-2.5 m), οι οποίοι είναι προσκολλημένοι με κυκλική συμμετρία στην άκρη της καμίνου. Η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα κατά αντιρροή. Η δυναμικότητα ενός τέτοιου ψυγείου είναι περίπου 4000 t/d και το βασικό μειονέκτημά τους είναι η χαμηλή ανάκτηση θερμότητας της τάξης του 70% και η μερική ασυμβατότητά τους με συστήματα έψησης με προασβεστοποιητές, όπου απαιτείται η προσαγωγή του θερμού αέρα του ψυγείου στον πύργο προασβεστοποίησης. Η αριστοποίηση της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων συνίσταται στη βελτίωση της συμπεριφοράς τους με χρήση διαφόρων εσωτερικών εξαρτημάτων, που κάνουν αποτελεσματικότερη την εναλλαγή θερμότητας, λόγω της μεγάλης επιφάνειάς τους.

Το περιστροφικό ψυγείο είναι το παλιότερο σχεδιαστικά από τα χρησιμοποιούμενα συστήματα ψύξης. Είναι κατασκευασμένο είτε ως συνέχεια της περιστροφικής καμίνου είτε, για λόγους χώρου, στην αντίθετη κατεύθυνση. Περίπου 5% από τα εγκατεστημένα συστήματα έψησης παγκοσμίως χρησιμοποιούν αυτό τον τύπο ψυγείου. Η μεταφορά θερμότητας από το διάπυρο κλίνκερ στον αέρα ψύξης γίνεται

με ένα συνδυασμό αντιρροής και ομορροής. Το εύρος δυναμικότητας κυμαίνεται μεταξύ 2000 t/d για παλιές εγκαταστάσεις και 4500 t/d για νεότερες. Η χαρακτηριστική παράμετρος είναι ο ρυθμός (ταχύτητα) περιστροφής, που μπορεί να καθοριστεί ανεξάρτητα από την αντίστοιχη της περιστροφικής καμίνου. Με κάπως μεγαλύτερη ζώνη πρόψυξης από την αντίστοιχη των ψυγείων με σχάρες, η θερμοκρασία εισόδου του κλίνκερ συχνά κυμαίνεται μεταξύ 1200°C και 1400°C. Η ποσότητα του αέρα που χρησιμοποιείται για την ψύξη είναι συχνά ανεπαρκής για να επιτευχθούν θερμοκρασίες ψύξης του κλίνκερ κάτω από τους 300°C. Οι προσπάθειες για αριστοποίηση στοχεύουν στη βελτίωση της ανταλλαγής θερμότητας διαμέσου γεωμετρικών τροποποιήσεων και τοποθέτησης εσωτερικών εξαρτημάτων ανάκτησης θερμότητας. Βασικά μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλή ανάκτηση θερμότητας της τάξης του 70%, το πολύ μεγάλο απαιτούμενο μέγεθος ψυγείου στην περίπτωση καμίνου ξηρής μεθοδολογίας και η απαίτηση για τοποθέτηση της καμίνου και των ανακομιστών θερμότητας σε υψηλότερη στάθμη από το έδαφος, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πτώση του κλίνκερ διά της βαρύτητας μέσα στο ψυγείο. (Μαραγκός Γ., 1995)

Τα ψυγεία με σχάρες είναι τα πιο χρησιμοποιούμενα, αντιπροσωπεύοντας ένα 85% της αγοράς. Ο αέρας συναντά εγκάρσια δύο ή περισσότερες φορές το κλίνκερ, το οποίο μετακινείται πάνω σε κινούμενες σχάρες και η δυναμικότητά τους μπορεί να φθάσει μέχρι 10000 t/d. Έχουν τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα από τα χρησιμοποιούμενα συστήματα ψύξης του κλίνκερ και τα μειονεκτήματά τους εντοπίζονται στη μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της απαίτησης μεγάλων ποσοτήτων αέρα (3-3.5 kg αέρα ανά kg κλίνκερ). Οι μεγάλες ποσότητες αέρα δημιουργούν επιπρόσθετα προβλήματα, αφού υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις της καύσης στην κάμινο (περίπου 1.5 kg αέρα ανά kg κλίνκερ), ενώ θα πρέπει επιπρόσθετα να προηγηθεί αποκονίωση, πριν από την απομάκρυνσή τους στο περιβάλλον. Πάντως σε βιομηχανικές μονάδες με συστήματα έψησης με προασβεστοποιητές ο αέρας μπορεί να αξιοποιηθεί στους ανακομιστές θερμότητας, ενώ χρησιμοποιείται ακόμη και στους μύλους άλεσης των πρώτων υλών για την ξήρανση των υλικών. (Παπαϊωάννου Ν., 1998)

4.7. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΨΗΣΗΣ

Η όλη προσπάθεια επικεντρώνεται στη μείωση του κόστους λειτουργίας, χωρίς να επηρεαστεί η ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος, ενώ παράλληλα καθίσταται απαραίτητο να μην επιβαρύνεται σημαντικά το περιβάλλον (μείωση NO_x, SO_x, σκόνης κ.λπ.) από τη λειτουργία της εγκατάστασης. Τα επενδυτικά σχέδια αξιολογούνται με τη μέθοδο του χρόνου αποπληρωμής της επένδυσης (payback period) και επιδιώκεται η περίοδος αυτή να μην υπερβαίνει τα τέσσερα χρόνια.

Από τα τέλη της δεκαετίας του '80, με τη χρήση αποβλήτων ή υπολειμμάτων ως καυσίμων έγινε ένα σημαντικό βήμα για τη μείωση του λειτουργικού κόστους, αν και απαιτείται πρόσθετος έλεγχος των ρυπαντών και ειδικός εξοπλισμός. Στη δεκαετία του '90 επιδιώχθηκε η αύξηση της ανακτούμενης θερμότητας, ενώ ελήφθησαν αυστηρά μέτρα για τη μείωση των NO_x, SO_x, υδρογονανθράκων και σωματιδίων, με τροποποιήσεις των επιμέρους διατάξεων και τοποθέτηση πρόσθετου εξοπλισμού, που μειώνει αυτές τις εκπομπές. (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

Στην Ευρώπη δεν κατασκευάζονται πολλές νέες μονάδες, αλλά αναβαθμίζονται οι ήδη λειτουργούσες. Στη Βόρεια Αμερική οι υπό κατασκευή μονάδες έχουν δυναμικότητα μικρότερη από 3500 tpd και αυστηρά όρια εκπομπών, ενώ η διεύρυνση της αγοράς στην Άπω Ανατολή οδήγησε στη δημιουργία μονάδων με δυναμικότητα 4000-10.000 tpd (Κορέα, Ταϊλάνδη) και χαμηλό κόστος παραγωγής. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

Οι τάσεις οι οποίες διαμορφώνονται στις διατάξεις έψησης αναλύονται παρακάτω.

Προθέρμανση - Ασβεστοποίηση

Όταν τα απαέρια του προθερμαντή χρησιμοποιούνται για την ξήρανση των πρώτων υλών, απαραίτητη είναι η χρησιμοποίηση ενός πενταβάθμιου προθερμαντή, όταν η μέση υγρασία των πρώτων υλών είναι κάτω του 8%, και ενός τετραβάθμιου, όταν η υγρασία υπερβαίνει το 8%. Για πολύ ξηρές τοποθεσίες, όπου τα απαέρια δεν απαιτούνται για την ξήρανση των πρώτων υλών, συνιστάται ένας εξαβάθμιος προθερμαντής. Τελευταία τεχνολογική εξέλιξη είναι η ύπαρξη και χαμηλότερου σημείου τροφοδοσίας σε έναν πενταβάθμιο προθερμαντή, ώστε αυτός να λειτουργεί

και ως τετραβάθμιος, όταν η μέση υγρασία των πρώτων υλών είναι μεγαλύτερη από 8%.

Τα τελευταία χρόνια επίσης αυξήθηκε ο όγκος του ασβεστοποιητή, ώστε ο χρόνος παραμονής να είναι τουλάχιστον 3.0 sec, ενώ δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στη μείωση των παραγόμενων NO_x και στην ενεργειακή ευελιξία του συστήματος. (Τριανταφύλλου Α., 1998)

Περιστροφική κάμιнос

Οι βελτιώσεις στην Π.Κ. εντοπίζονται σε τροποποιήσεις στον τρόπο στήριξής της, στην αυτοματοποίηση του ελέγχου της ευθυγράμμισης και των θερμοκρασιών του κελύφους της, όπως και στην αριστοποίηση των διαστάσεών της (L/D) στις διάφορες θερμοκρασιακές ζώνες.

Καυστήρες

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες κατασκευής καυστήρων με μειωμένο ποσοστό πρωτογενούς αέρα και μειωμένη παραγωγή NO_x . Έτσι στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται καυστήρες με απαίτηση πρωτογενούς αέρα σε ποσοστό μικρότερο από 10% και πολλαπλά κανάλια, ενώ επιτυγχάνεται παράλληλα μείωση των παραγόμενων NO_x έως και 50%, ώστε να τηρηθούν τα αυστηρότατα όρια των κανονισμών.

Ψύξη

Το μέγεθος των ψυγείων έχει αυξηθεί, ώστε να ανταποκρίνεται στις νέες απαιτήσεις για ικανοποιητική ψύξη σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Ο αυξανόμενος έλεγχος του αέρα ψύξης, η γεωμετρία και η κλίση των σχαρών είναι τα σημεία όπου εντοπίζεται η τεχνολογική εξέλιξη, ώστε να αυξηθεί η απόδοση του ψυγείου πάνω στο 70%. Επίσης υπάρχει η τάση αντικατάστασης των μηχανικών οδηγών με υδραυλικούς.

Πυρίμαχη επένδυση

Τα πυρότουβλα μαγνησίας-χρωμίου τείνουν να εξαφανιστούν από την αγορά, ενώ υπάρχει η τάση για αντικατάστασή τους με πυρότουβλα μαγνησίας-ζιρκονίας στις ζώνες μετατροπής. Στη ζώνη ασβεστοποίησης εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται

πυρότουβλα υψηλής περιεκτικότητας σε αλουμίνα, ενώ στη ζώνη έψησης αυξάνεται η χρήση πυρότουβλων δολομίτη ή μαγνησίτη. (Τριανταφύλλου Α., 1998)

Συστήματα ελέγχου

Οι τεχνικές ελέγχου χρησιμοποιούνται επιτυχώς στη βιομηχανία τσιμέντου και, καθώς αποκτάται συνεχώς καινούργια εμπειρία και η τεχνολογία εξελίσσεται, νέα προηγμένα και βελτιωμένα συστήματα αναμένεται να χρησιμοποιηθούν τα επόμενα χρόνια. Ο ρόλος των συστημάτων ελέγχου γίνεται ολοένα και πιο σημαντικός, λόγω του αυξανόμενου ανταγωνισμού και της προσπάθειας για συμπίεση του κόστους παραγωγής στη βιομηχανία τσιμέντου.

Γενικότερα, η τάση σήμερα στη βιομηχανία τσιμέντου είναι η τεχνολογική αναβάθμιση των μονάδων, ώστε να αυξηθεί η δυναμικότητά τους κατά 10-20% και να μειωθούν το λειτουργικό κόστος και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. (Παπαγεωργίου Δ., Θεολόγος Φ., Τέας Χ., Χανιωτάκης Ε., ΤΕΕ, 2007)

5. Η ΑΛΕΣΗ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΛΕΣΗ

Οι διεργασίες ελάττωσης μεγέθους στη βιομηχανία τσιμέντου έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 2.3, που αναφέρεται στην άλεση του μείγματος των πρώτων υλών. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούν οι τεχνολογικές εξελίξεις στο πεδίο αυτό, οι οποίες έχουν εφαρμογή κυρίως στην άλεση του τσιμέντου, δηλαδή στη συνάλεση του κλίνκερ με τη γύψο και άλλα κύρια συστατικά του τσιμέντου (ποζολάνες, σκωρίες ιπτάμενες τέφρες κ.λπ.), ανάλογα και με τον τύπο του παραγόμενου τσιμέντου.

Από τα μέσα της δεκαετίας του '80 ξεκίνησε μια σημαντική αναβάθμιση των διατάξεων παραγωγής τσιμέντου και ειδικότερα αυτών που αφορούν στη διαχείριση των στερεών υλικών (material handling). Ο εκσυγχρονισμός των διατάξεων άλεσης του τσιμέντου είχε ως στόχο αφενός τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και την αύξηση της δυναμικότητας των διατάξεων, αφετέρου τη βελτίωση των ιδιοτήτων του παραγόμενου προϊόντος. Οι στόχοι αυτοί επιτεύχθηκαν με την εισαγωγή στην παραγωγική διαδικασία σύγχρονων μηχανημάτων όπως οι κυλινδρόπρες (high pressure grinding rolls) και οι διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας (high efficiency separators). (Μαραγκός Γ., 1995)

5.2. ΟΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Μετά την άλεση του τσιμέντου αυτό είναι έτοιμο για χρήση. Απαιτείται ένας χώρος αποθήκευσης του, που συνήθως είναι μεγάλα σιλό, αντίστοιχα με αυτά της προομογενοποίησης της φαρίνας, χωρίς βεβαίως τα εσωτερικά συστήματα ανάδευσης του υλικού που αναλύθηκαν.

Όταν το τσιμέντο εκτίθεται σε περιβάλλον υγρασίας, η πήξη του καθυστερεί ή επιταχύνεται, αλλά σε κάθε περίπτωση μειώνονται οι αντοχές του. Ως αποτέλεσμα παρατεταμένης έκθεσής του αυτό στερεοποιείται και αρχίζουν να σχηματίζονται τεμάχια διαφόρων αξιοσημείωτων διαστάσεων. Αυτή η στερεοποίηση οφείλεται στους βελονοειδείς κρυστάλλους του ετρινγκίτη και του συγκενίτη, που σχηματίζονται από την αντίδραση του C A με γύψο ή ημιυδρική γύψο και θειικό κάλιο, παρουσία

της υγρασίας του αέρα. Ως εκ τούτου μεγαλύτερα ποσοστά αλκαλίων και C_3A , σε συνδυασμό με μεγαλύτερες λεπτότητες και την παρουσία της γύψου, ευνοούν το σχηματισμό τέτοιων τεμαχίων, ενώ η χρήση βελτιωτικών άλεσης τα περιορίζει.

Κύρια πηγή της υγρασίας που θα προκαλέσει αυτές τις ανεπιθύμητες αντιδράσεις μέσα στα σιλό είναι το νερό που υπάρχει στο γύψο, ενώ δεν μπορεί να λεχθεί ότι δεν ευθύνεται και το νερό που προέρχεται από τον ψεκασμό μέσα στο μύλο, όπως επίσης και η υγρασία που προστίθεται κατά τη συνάλεση με κάποιο από τα άλλα κύρια συστατικά του τσιμέντου, όταν παράγονται ειδικοί τύποι.

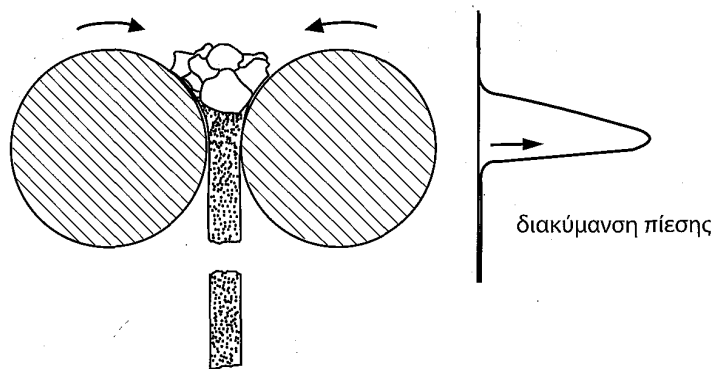
Κυρίως το νερό απορροφάται από το C_3A και το C_3S , με αποτέλεσμα να μειώνεται η δραστηκότητά τους. Η μειωμένη δραστηκότητα του C_3A είναι δυνατόν να οδηγήσει σε καθυστέρηση της πήξης, κυρίως όταν τα περιεχόμενα θειικά είναι πολύ λίγα. Εντούτοις, όταν υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση θειικών είναι δυνατόν να προκληθεί ψευδής πήξη ή γρήγορη πήξη που θα οφείλεται στον ανασχηματισμό του γύψου. Ειδικότερα ψευδής (δηλαδή προσωρινή) πήξη του μείγματος συμβαίνει όταν η ανασχηματισμένη γύψος, η οποία είναι πολύ λίγη (καθόσον υπάρχει μία μικρή περίσσεια θειικών μόνο), ξαναδιασπάται με την αντίδραση με το C_3A στα πρώτα λεπτά της προσθήκης του νερού στο τσιμέντο. Αντιθέτως μεγαλύτερες ποσότητες ανασχηματισμένης γύψου, συνδυαζόμενες με μεγαλύτερα ποσοστά θειικών επιφέρουν γρήγορη πήξη. Η ελαττωμένη δραστηκότητα του C_3S οδηγεί σε μικρότερες αντοχές. Η στερεοποίηση του τσιμέντου στα σιλό έχει αντίστοιχο αποτέλεσμα με την έκθεση σε υγρό αέρα, λόγω του σχηματισμού ετρινγκίτη και συγκενίτη.

Οι παράμετροι που πρωταρχικά επηρεάζουν την αφυδάτωση του γύψου στα σιλό του τσιμέντου είναι η θερμοκρασία και η διάρκεια της αποθήκευσης. Έχει βρεθεί ότι μετά από αποθήκευση 28 ημερών υπάρχουν ενδείξεις αφυδάτωσης γύψου ακόμα και στους $40^{\circ}C$. Επίσης μετά από 7 ημέρες αποθήκευσης εμφανίζεται αφυδάτωση σε θερμοκρασία $75^{\circ}C$, η οποία όμως είναι πλήρης στους $90^{\circ}C$. Το συμπέρασμα είναι ότι όταν το τσιμέντο αποθηκεύεται σε θερμοκρασίες ίσες ή μεγαλύτερες των $70^{\circ}C$ - $80^{\circ}C$, το ποσό του νερού που με οποιοδήποτε τρόπο εισάγεται στο σιλό πρέπει να κρατηθεί όσο το δυνατό μικρότερο. Σε αυτή την παρατήρηση στηρίζεται και η πρόταση πολλών σχετικά με την αντικατάσταση του γύψου από τον ανυδρίτη ή από μείγμα γύψου και ανυδρίτη. (Γαζιδέλλη Β., 2007)

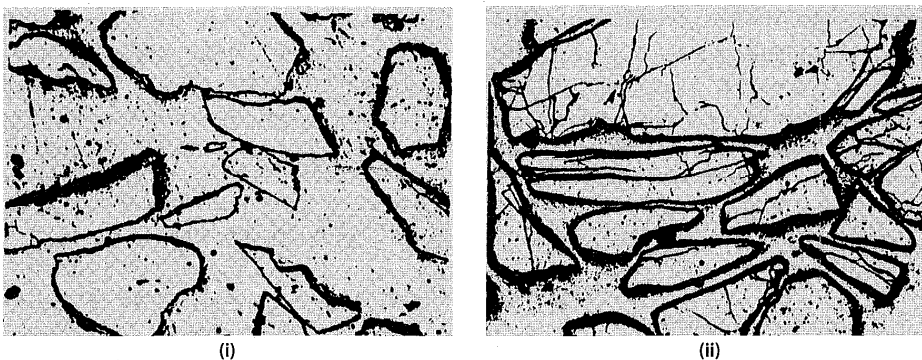
5.3. ΚΥΛΙΝΔΡΟΠΡΕΣΣΕΣ

Η πρώτη κυλινδρόπρεσα (high pressure grinding rolls) εγκαταστάθηκε το 1985. Στο τέλος του 1990 βρίσκονταν σε λειτουργία 92 παρόμοια μηχανήματα, εκ των οποίων τα 45 αναφέρονταν στην άλεση του κλίνκερ και τα 17 στην άλεση των πρώτων υλών. Το 2007 ήταν εγκατεστημένες περίπου 500 κυλινδρόπρεσες.

Η κυλινδρόπρεσα (ΚΠ), όπως φαίνεται και στο σχήμα 43, αποτελείται από 2 κυλίνδρους, εκ των οποίων ο ένας είναι σταθερός ενώ ο άλλος μετακινούμενος, έτσι ώστε να μπορεί να ρυθμιστεί το άνοιγμα (απόσταση) των κυλίνδρων. Οι κύλινδροι αυτοί περιστρέφονται με μικρή ταχύτητα (πίνακας 17) και το υλικό συμπιέζεται με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα «κέικ» (compacted cake) πάχους 8-30 mm, όσο δηλαδή και το άνοιγμα των κυλίνδρων της ΚΠ. Η εξασκούμενη πίεση είναι της τάξης των 50 MPa.

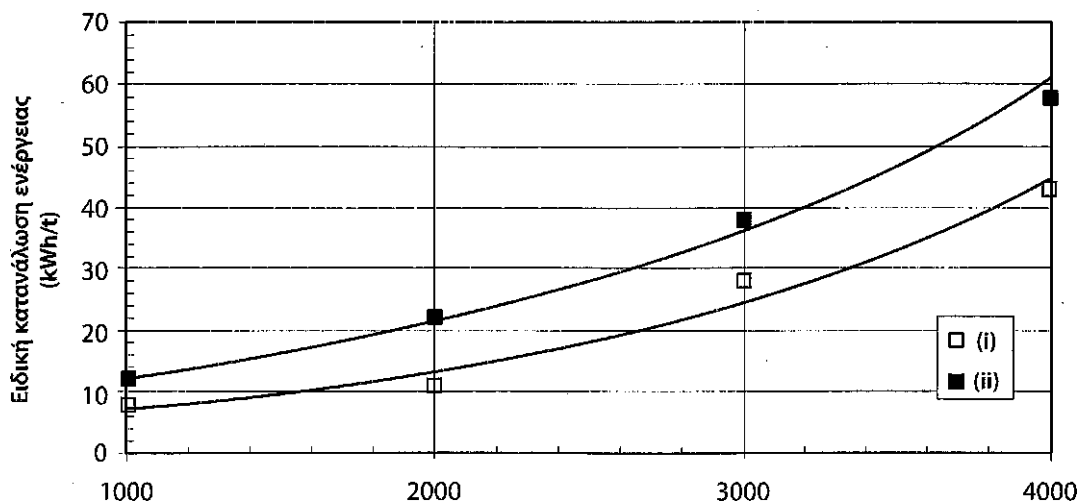


Σχήμα 43: Αρχή λειτουργίας κυλινδρόπρεσας



Σχήμα 44: Δείγμα χαλαζία σε μικροσκόπιο (μέγεθος 100- 300 μπι), (i) άλεση σε θραυστήρα με σιαγόνες, (ii) άλεση σε κυλινδρόπρεσα

Το δημιουργούμενο cake περιέχει στερεά σε ποσοστό 60-80%, ενώ το 10-30% του υλικού είναι ήδη λεπτόκοκκο (<100 μm). Το αξιοσημείωτο είναι ότι εξαιτίας της εφαρμοζόμενης πίεσης τα τεμαχίδια του cake που είναι χονδρόκοκκα έχουν ήδη ένα μεγάλο αριθμό ρωγμών και ασθενών σημείων (weakpoints), με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη ενέργεια για την πλήρη ελάττωση μεγέθους τους με συμβατικά μέσα. Στο σχήμα 44 φαίνονται οι ρωγμές που παρουσιάζει δείγμα χαλαζία μεγέθους 100-300 μm που αλέσθηκε σε ΚΠ, σε αντίθεση με δείγμα χαλαζία ίδιου μεγέθους που προέκυψε από άλεση σε θραυστήρα με σιαγόνες. Στο σχήμα 45 είναι σαφές ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας για την άλεση του κλίνκερ είναι σαφώς μικρότερη όταν το κλίνκερ έχει ήδη υποστεί προκαταρκτική ελάττωση μεγέθους σε ΚΠ. (Μαραγκός Γ., 1995)



Ειδική επιφάνεια (cm²/g)

Σχήμα 45: Αλεστικότητα κλίνκερ (i) μετά την προκαταρκτική θραύση σε κυλινδρόπρεσα και (ii) χωρίς προκαταρκτική θραύση

Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά μεγέθη κυλινδρόπρεσας

Διάμετρος κυλίνδρων (mm)	1150	
Πλάτος κυλίνδρων (mm)	1000	

Α/Γύοταση κυλίνδρων (mm)		
Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	22.5	
Περιφερειακή ταχύτητα (m/s)	1.34	
Ασκούμενη δύναμη (kN)	10000	
Ισχύς (kW)	900	
Δυναμικότητα (t/h)	200	

Ο ρυθμός παραγωγής μίας κυλινδρόπρεσας (t/h) προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση (7.29):

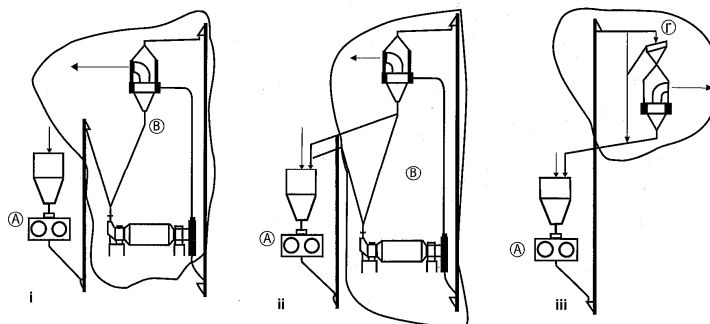
$$P=V \cdot S_F \cdot B_F \cdot \rho_F \cdot 3600 \quad (7.29)$$

όπου V_u : η περιφερειακή ταχύτητα (m/s) - είναι μεταξύ 0.9 και 1.8 m/s.

S_p : το πάχος του «κέικ» (m) - είναι μεταξύ 8 και 30 mm και είναι περίπου της ίδιας διάστασης με το άνοιγμα των κυλίνδρων της πρέσας. B_p : το πλάτος του «κέικ» (m) - είναι περίπου 1.4 m.

ρ_F : η πυκνότητα του «κέικ» (t/m^3) - είναι περίπου 60 έως 80% της απόλυτης πυκνότητας του υλικού.

5.3.1. Κυκλώματα άλεσης με κυλινδρόπρεσα

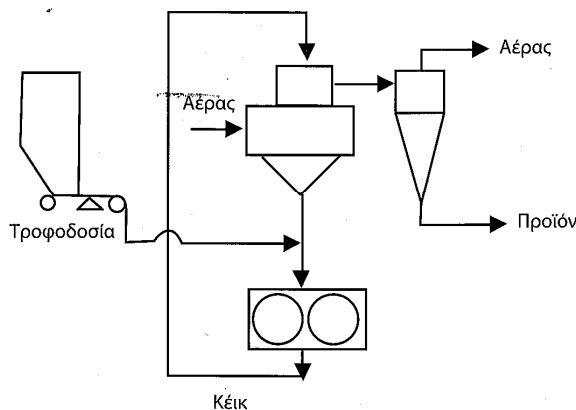


Σχήμα 46: Κυκλώματα άλεσης με κυλινδρόπρεσα

Κυκλώματα: i) διάταξη ανοικτού κυκλώματος, ii) διάταξη κλειστού κυκλώματος, iii) διάταξη αποκλειστικής άλεσης με κυλινδρόπρεσα

Μηχανήματα: Α. κυλινδρόπρεσα, Β. κύκλωμα άλεσης-διαχωρισμού, Γ. κύκλωμα διαχωρισμού

Οι κυλινδρόπρεσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά κανόνα με τρεις διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με το αν συνδυάζονται με σφαιρόμυλο και αν επανατροφοδοτούνται με κάποιο ενδιάμεσο υλικό του κυκλώματος άλεσης (σχήμα 46).



Σχήμα 47: Άλεση πρώτων υλών με κυλινδρόπρεσα

α. Διάταξη ανοικτού κυκλώματος (Single pass press)

Στη διάταξη αυτή η κυλινδρόπρεσα χρησιμοποιείται για την προκαταρκτική άλεση του υλικού, ενώ η τελική άλεση γίνεται σε σφαιρόμυλο. Η νέα τροφοδοσία οδηγείται στην κυλινδρόπρεσα και το προϊόν αποτελούμενο κυρίως από συσσωματώματα μεταφέρεται στο σφαιρόμυλο και ακολούθως στο διαχωριστή. Επομένως η φρέσκια τροφοδοσία (original feed) διέρχεται μία μόνο φορά μέσω της κυλινδρόπρεσας, ενώ η διάταξη άλεσης είναι ανοικτού κυκλώματος ως προς την ΚΠ και κλειστού βέβαια κυκλώματος ως προς το σφαιρόμυλο. Στο σχήμα 46 αποδίδεται η διάταξη αυτή. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

β. Διάταξη κλειστού κυκλώματος (Recycle press)

Στη διάταξη αυτή η κυλινδρόπρεσα διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στο κύκλωμα άλεσης, καθώς το χονδρόκοκκο υλικό του διαχωριστή επανατροφοδοτείται στην ΚΠ. Με τη διάταξη αυτή επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση δυναμικότητας του συστήματος, μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και βελτίωση της ποιότητας του τσιμέντου. Στο σχήμα 46 αποδίδεται η διάταξη αυτή, η οποία είναι κλειστού κυκλώματος τόσο ως προς την ΚΠ όσο και ως προς το σφαιρόμυλο, αφού υπάρχει ανακυκλοφορία του υλικού.

γ. Διάταξη αποκλειστικής άλεσης με κυλινδρόπρεσα (Integral grinding process)

Στη διάταξη αυτή η ΚΠ είναι το μοναδικό μηχάνημα ελάττωσης μεγέθους. Το πρωτογενές υλικό και οι επιστροφές του διαχωριστή (σχήμα 46) οδηγούνται στην ΚΠ, το προϊόν της οποίας μεταφέρεται στη διάταξη διαχωρισμού Γ. Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα της απλότητας αφού απαιτούνται μια ΚΠ, ένας διαχωριστής, ένα αναβατόριο και μια διάταξη κοσκίνισης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το προϊόν της ΚΠ είναι συσσωματωμένο, αφού παράγεται υπό μορφή «κέικ», γεγονός που δε δημιουργεί πρόβλημα στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η διάταξη ανοικτού κυκλώματος (σχήμα 46), και αυτό οδηγείται στην είσοδο του σφαιρόμυλου, όπου και αποσυσσωματώνεται. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις την ΚΠ ακολουθεί κάποια συσκευή αποσυσσωμάτωσης, που συνήθως είναι ένας σφυρόμυλος, ενώ μια πολύ σύγχρονη τεχνική είναι η αποσυσσωμάτωση να πραγματοποιείται στους διαχωριστές με ειδικές κατασκευαστικές μετατροπές.

Οι ΚΠ χρησιμοποιούνται κυρίως για την άλεση του κλίνκερ, λόγω του ενεργειοβόρου της διεργασίας, αλλά δίνουν ομοίως πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και στην άλεση των πρώτων υλών. Στο σχήμα 47 δίνεται το κύκλωμα άλεσης πρώτων υλών με ΚΠ. Αξιοσημείωτο είναι ότι για την αποσυσσωμάτωση του υλικού χρησιμοποιείται ένας σφυρόμυλος, ενώ η ξήρανση των πρώτων υλών γίνεται στο διαχωριστή με προσαγωγή των θερμών αερίων από τους ανακομιστές της περιστροφικής καμίνου. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται εξοικονόμηση ενέργειας της

τάξης του 40%, αφού η κατανάλωση ενέργειας κυκλώματος με ΚΠ είναι περίπου 13.0 kWh/t. (Μαραγκός Γ., 1995)

5.3.2 Επίδραση της χρήσης κυλινδρόπρεσας στην παραγωγική διαδικασία και στην ποιότητα του προϊόντος

Στον πίνακα 18 φαίνονται τα αποτελέσματα που επιφέρει η μετάβαση από συμβατικό κύκλωμα άλεσης με σφαιρόμυλο σε κύκλωμα άλεσης με ΚΠ και σφαιρόμυλο ταυτόχρονα (κύκλωμα ii του σχήματος 46) στην καταναλισκόμενη ενέργεια και στη δυναμικότητα του συστήματος. Επιτυγχάνεται αύξηση της παραγωγής κατά 41%, με ταυτόχρονη μείωση κατά 20% της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας, για το ίδιο επίπεδο λεπτότητας του προϊόντος.

Στον πίνακα 19 φαίνονται τα αποτελέσματα που επιφέρει η μετάβαση από συμβατικό κύκλωμα άλεσης με σφαιρόμυλο σε κύκλωμα άλεσης με ΚΠ και σφαιρόμυλο ταυτόχρονα (κύκλωμα ii του σχήματος 46) στις ιδιότητες του παραγομένου τσιμέντου. Φαίνεται ότι με τη χρήση ΚΠ το προϊόν είναι πιο ομοιόμορφο (συντελεστής ομοιομορφίας 1.07 έναντι 0.93), με αποτέλεσμα καλύτερες αντοχές για το ίδιο επίπεδο λεπτότητας. Πάντως θα πρέπει να τονισθεί ότι αποτελούν αντικείμενο ερευνητικών μελετών οι ιδιότητες του τσιμέντου που προκύπτει από κύκλωμα άλεσης αποκλειστικά με ΚΠ. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

Πίνακας 18: Σύγκριση συμβατικών κυκλωμάτων άλεσης και κυκλωμάτων με κυλινδρόπρεσα ως προς τη δυναμικότητα και την καταναλισκόμενη ενέργεια (άλεση κλίνκερ)

Χαρακτηριστικά μεγέθη	Συμβατικό κύκλωμα	Κύκλωμα με ΚΠ
Δυναμικότητα (t/h)	103	144
Λεπτότητα (cm ² /g)	4000	3950
Αύξηση παραγωγής (t/h)	-	41
Αύξηση παραγωγής (%)	-	40
Κατανάλωση ενέργειας		

Σφαιρόμυλος (kWh/t)	40.9	28.2
Κυλινδρόπρεσα (kWh/t)	-	5.6
Βοηθητικός εξοπλισμός (kWh/t)	10.5	7.2
Σύνολο (kWh/t)	51.4	41
Εξοικονόμηση ενέργειας (kWh/t)	-	10.4
Εξοικονόμηση ενέργειας (%)	-	20

Πίνακας 19: Σύγκριση συμβατικών κυκλωμάτων άλεσης και κυκλωμάτων με κυλινδρόπρεσα ως προς τις ιδιότητες του τσιμέντου

Χαρακτηριστικά τσιμέντου	Συμβατικό κύκλωμα	Κύκλωμα με ΚΠ
Λεπτότητα (cm ² /g)	3350	3350
I Συντελεστής ομοιομορφίας (η)	0.93	1.07
Διερχόμενο στα 8 μηι (%)	30.8	33.0
Διερχόμενο στα 32 μηι (%)	79.0	85.0
Εργασιμότητα στα 30 min	11	10
Απαίτηση σε νερό (%)	27-29	29.7-30
SO ₃ (%)	3.3	3.3
Αντοχές 1 ημέρας (MPa)	15.4	17.7
Αντοχές 2 ημερών (MPa)	27.0	31.5
Αντοχές 7 ημερών (MPa)	47.0	57.8
Αντοχές 28 ημερών (MPa)	65.0	71.0

5.3.3 Προβλήματα από τη χρήση κυλινδρόπρεσας στην παραγωγική διαδικασία

Τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην παραγωγική διαδικασία από τη χρήση των κυλινδρόπρεσων και ο τρόπος αντιμετώπισής τους είναι:

α. Η επικάλυψη (wear) των κυλίνδρων. Αντιμετωπίζεται συνήθως με τη χρήση μανδύων από ανθεκτικά σε επικάλυψη χυτά κράματα (wear resistant cast alloy). Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι στην άλεση κλίνκερ η επικάλυψη είναι 1 mm για 1000 h λειτουργίας της ΚΠ ή 100 mg/(t κλίνκερ). Συνήθως απαιτείται αλλαγή των μανδύων κάθε 5000 h (περίπου 7 μήνες).

β. Η ομοιογένεια των τροφοδοτούμενων υλικών. Η άλεση σε σφαιρόμυλο συνεπάγεται χρόνους παραμονής του υλικού της τάξης των 5-10 min, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται οποιαδήποτε προανάμειξη κατά την περίπτωση άλεσης πολυσύνθετων μειγμάτων, αφού ο σφαιρόμυλος θεωρείται ιδανικός αναμεικτήρας. Αντίθετα, επειδή στην ΚΠ ο χρόνος παραμονής του υλικού στο χώρο συμπίεσης είναι της τάξης δεκάτων του δευτερολέπτου, θα πρέπει να προηγείται πολύ καλή ανάμειξη τυχόν πολυσύνθετων μειγμάτων και θα πρέπει να αποφεύγεται ο διαχωρισμός της τροφοδοσίας (κατά μέγεθος ή κατά υλικό) στην τροφοδοτική διάταξη. Ακόμη, η διάταξη άλεσης με κυλινδρόπρεσα, λόγω των πολύ μικρών χρόνων παραμονής του υλικού, είναι πολύ ευαίσθητη σε μεταβολές της κοκκομετρικής κατανομής της τροφοδοσίας και απαιτούνται όσο το δυνατόν σταθερότερες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Επίσης θα πρέπει να αποφεύγεται η εισαγωγή στην ΚΠ μεταλλικών αντικειμένων. Αντιμετωπίζεται συνήθως με τοποθέτηση ανιχνευτών μετάλλων και προστατευτικών πλεγμάτων, ώστε να αποφεύγονται τα μεγάλα μεγέθους ξένα σώματα. Ακόμη, το μέγιστο μέγεθος των σωματιδίων της τροφοδοσίας δε θα πρέπει να υπερβαίνει 3 φορές το άνοιγμα των κυλίνδρων. (Μαραγκός Γ., 1995)

5.4. ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στο κεφάλαιο 2.3.8 αναλύθηκαν οι συμβατικοί διαχωριστές πρώτης γενιάς και οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα (Cyclone type separators), που θεωρούνται ως η δεύτερη γενιά διαχωριστών.

Η τρίτη γενιά διαχωριστών, οι αποκαλούμενοι διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας (High Efficiency Separators-HES), εμφανίσθηκαν στην αρχή της δεκαετίας του 1980 από την εταιρεία ONODA με την επωνυμία O-SEPA separator. Μέχρι σήμερα και άλλοι κατασκευαστές έχουν σχεδιάσει HES. Στην Ελλάδα ο πρώτος διαχωριστής υψηλής αποτελεσματικότητας εγκαταστάθηκε το 1987.

Η αρχή λειτουργίας των διαχωριστών είναι η διασπορά του υλικού μέσω ενός περιστρεφόμενου δίσκου διασποράς και λόγω του εισερχομένου αέρα οι μεν «λεπτοί» κόκκοι (fines) ανέρχονται και απομακρύνονται τελικά ως προϊόν του κυκλώματος άλεσης, οι δε «χονδροί» κόκκοι (coarse) καταπίπτουν και επιστρέφουν στο μύλο. Το αποτέλεσμα του διαχωρισμού εξαρτάται από τη σύνθεση των εφαρμοζόμενων δυνάμεων στα σωματίδια, δηλαδή του βάρους, της φυγόκεντρης δύναμης και της εξασκούμενης δύναμης από το αέριο ρεύμα. (Τριανταφύλλου Α., 1998)

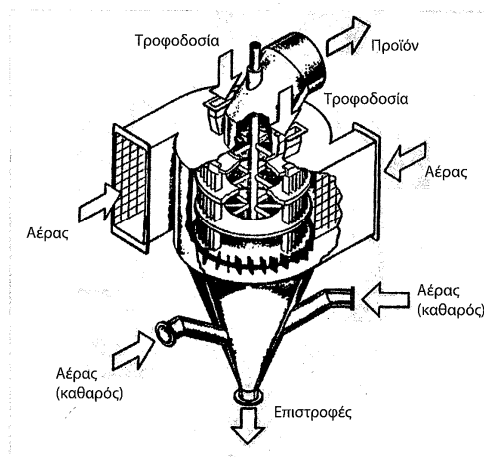
Χαρακτηριστικό των συμβατικών διαχωριστών είναι ότι ο ανεμιστήρας του ανακυκλούμενου αέρα και του κυκλώνα είναι κοινός, ενώ στους διαχωριστές τύπου κυκλώνα υπάρχει ένα εξωτερικό κύκλωμα αέρα από τον ανεμιστήρα, μέσω του διαχωριστή και του κυκλώνα, πίσω στο διαχωριστή. Οι συμβατικοί διαχωριστές όπως και οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα, σε μικρότερο όμως βαθμό, έχουν τα εξής μειονεκτήματα:

α. Λόγω της ατελούς διασποράς και της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων, ένα μεγάλο μέρος των σωματιδίων δρα ως μια ασθενώς συνδεδεμένη μάζα και, αφού παρακάμπτει τη ζώνη διαχωρισμού, επιστρέφει στο μύλο μαζί με τα διαχωρισθέντα μεγάλου μεγέθους σωματίδια.

β. 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 σε σημείο μέσα στο διαχωριστή ο διαχωρισμός δεν είναι ικανοποιητικός.

Με βάση τα ανωτέρω μειονεκτήματα σχεδιάστηκε ο διαχωριστής υψηλής αποτελεσματικότητας (ΔΥΑ ή HES), στον οποίο τόσο ο μηχανισμός διαχωρισμού όσο και οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις είναι απόλυτα καθορισμένα.

Στο σχήμα 48 περιγράφεται ένας διαχωριστής υψηλής αποτελεσματικότητας. Τα σωματίδια τροφοδοτούνται μέσω των αγωγών τροφοδοσίας, διασπείρονται μέσω του δίσκου διασποράς και έρχονται σε επαφή με τον αέρα διαχωρισμού, που εισέρχεται στο διαχωριστή από τους εφαπτομενικούς αγωγούς. Ο αέρας διαχωρισμού οδηγείται στη ζώνη διαχωρισμού μέσω ρυθμιστικών πτερυγίων. Έτσι μία απόλυτα 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, ανάλογα με το μέγεθος τους, δέχονται την επίδραση του δευτερεύοντος αέρα και ακολούθως του τριτεύοντος αέρα. (Μαραγκός Γ., 1995)



Σχήμα 48: Διαχωριστής υψηλής αποτελεσματικότητας (HES)

Με τον παραπάνω μηχανισμό δίνονται σε κάθε σωματίδιο πολλές ευκαιρίες διαχωρισμού και ακόμα ο διαχωρισμός είναι αποτέλεσμα ενός καθορισμένου ισοζυγίου δυνάμεων. Η ταχύτητα περιστροφής των εσωτερικών τμημάτων του διαχωριστή δεν είναι τόσο μεγάλη όσο στους συμβατικούς διαχωριστές, αφού ο χρόνος παραμονής του υλικού είναι μεγάλος και αυτός ο ίδιος ο διαχωρισμός γίνεται σταδιακά και με πολλαπλό τρόπο. Οι ΔΥΑ έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογής και

αξιοποιούνται σε πολλά βιομηχανικά πεδία. (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

Στο σχήμα 49 φαίνεται πώς η εφαρμογή της φυγόκεντρης δύναμης (centrifugal force - C) και της δύναμης από το ρεύμα του αέρα (drag force -T) οδηγεί, ανάλογα με το μέγεθος του σωματιδίου, στο διαχωρισμό του ως προϊόν ($T>C$) ή στην απόρριψή του στις επιστροφές ($T<C$).

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 υπάρχοντων συστημάτων άλεσης, ενώ το δεύτερο σε νέα συστήματα άλεσης. Το δεύτερο κύκλωμα έχει το επιπρόσθετο πλεονέκτημα των χαμηλών θερμοκρασιών τσιμέντου.

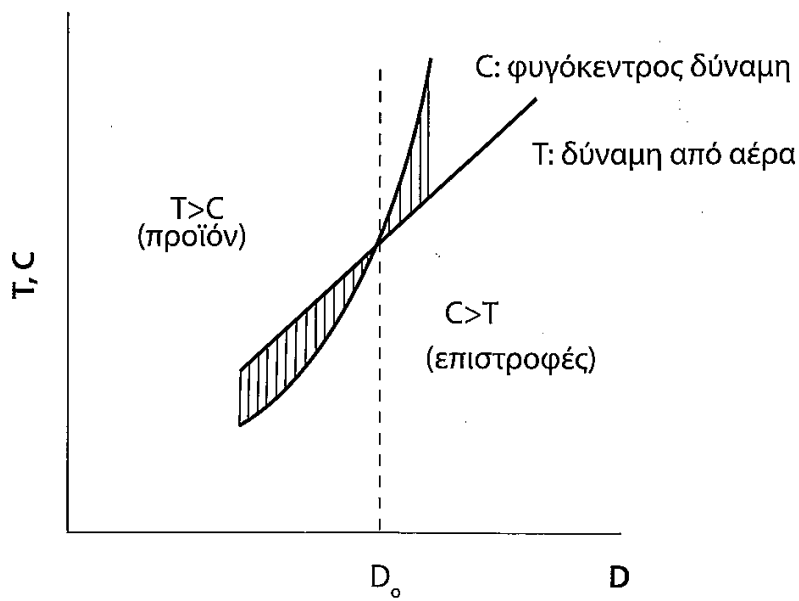
Τα κυριότερα θετικά αποτελέσματα από την αναβάθμιση διατάξεων άλεσης κλίνκερ με εισαγωγή των ΔΥΑ είναι τα εξής:

- Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης περίπου κατά 20%.
- Αύξηση της δυναμικότητας του συστήματος σε ποσοστό από 1(3 έως 30%.

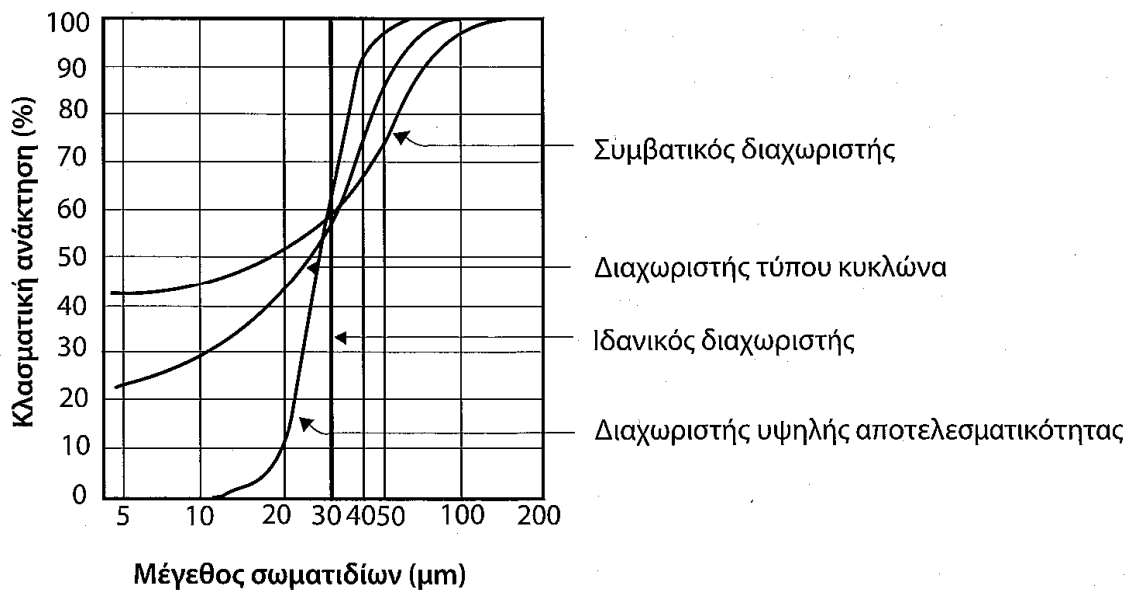
Βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος, αφού το παραγόμενο τσιμέντο έχει ομοιόμορφη κοκκομετρική κατανομή και επομένως βελτιωμένες αντοχές. Ο συντελεστής ομοιομορφίας της κατανομής Rosin-Rammler του τσιμέντου που παράγεται από διάταξη άλεσης με ΔΥΑ είναι 1.00-1.05 έναντι 0.80-0.95 με τη χρήση παλαιότερου τύπου διαχωριστή. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

Στον πίνακα 20 γίνεται μια σύγκριση της χρήσης διαχωριστών διαφόρων τύπων στην άλεση του τσιμέντου.

Στο σχήμα 50 δίνονται οι καμπύλες Tromp των τριών βασικών τύπων διαχωριστή. Από το σχήμα αυτό είναι σαφής η αποτελεσματικότητα του ΔΥΑ, αφού η καμπύλη Tromp του προσεγγίζει την καμπύλη Tromp ενός ιδανικού διαχωριστή (η ανάλυση της καμπύλης Tromp δίνεται στην παράγραφο 5.5).



Σχήμα 49: Θεωρητική αρχή διαχωρισμού



Σχήμα 50: Σύγκριση διαχωριστών διαφόρων τύπων μέσω της καμπύλης Tromp

Πίνακας 20: Σύγκριση λειτουργίας διαφόρων τύπων διαχωριστών

Χαρακτηριστικά	2 συμβατικοί διαχωριστές	1 διαχωριστής τύπου κυκλώνα (2)	1 διαχωριστής υψηλ. Αποτελ. (3)
Δυναμικότητα (t/h)	85	98	105
Λεπτότητα (cm ² /g)	3400	3300	3240
Αντοχή 28 ημερών (MPa)	40.0	40.0	41.2
Ειδική κατανάλωση ενέργειας μύλου (kWh/t)	37.1	32.9	31.0
Ειδική κατανάλωση ενέργειας 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%		

F: Τροφοδοσία, Feed (t/h)

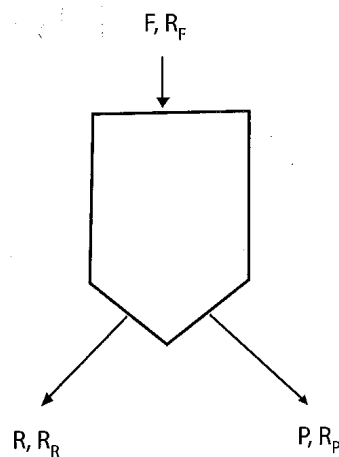
R: Επιστροφές, Rejects, Tailings

P: Προϊόν, Product, Fines

R_F, R_R, R_P : % υπόλειμμα (residue)

σε κάποιο μέγεθος της τροφοδοσίας,

των επιστροφών και του προϊόντος αντίστοιχα.



Σχήμα 51: Ανάλυση λειτουργίας διαχωριστή

5.5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΑΛΕΣΗΣ

Στους διαχωριστές τα «λεπτά» σωματίδια διαχωρίζονται από τα «χονδροκόκκα». Έτσι ένας διαχωριστής είναι αποτελεσματικός όταν το «λεπτό» κλάσμα (προϊόν διαχωριστή) έχει μικρή περιεκτικότητα σε μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια, ενώ το «χονδροκόκκο» κλάσμα (επιστροφές διαχωριστή) έχει μικρή περιεκτικότητα σε σωματίδια μικρού μεγέθους. Στο σχήμα 51 δίνεται ένας διαχωριστής με τις εισροές και τις εκροές του, όπως και τις λεπτότητες αυτών. Για την αξιολόγηση της λειτουργίας των διαχωριστών και κατ' επέκταση των κλειστών κυκλωμάτων άλεσης χρησιμοποιούνται τα παρακάτω μεγέθη. (Μαραγκός Γ., 1995)

Κυκλοφορούν φορτίο μύλου (Circulated load)

Ο ορισμός και η σημασία του κυκλοφορούντος φορτίου του μύλου έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.3.

Αριθμός ανακυκλοφορίας (Circulation number)

Ορίζεται ως το πηλίκο της τροφοδοσίας του διαχωριστή προς το προϊόν του και δείχνει πόσες φορές πρέπει να διέλθει το υλικό από το διαχωριστή μέχρι να παραληφθεί ως τελικό προϊόν. Λαμβάνει τιμές στην περιοχή του 3 και όσο μεγαλώνει τόσο βελτιώνεται η λεπτότητα του προϊόντος σε βάρος βέβαια της δυναμικότητας του συστήματος. Μπορεί να υπολογισθεί και από τα υπολείμματα σε συγκεκριμένο κόσκινο των φορτίων του διαχωριστή, όπως φαίνεται και από τη σχέση (30)

$$C=F/P=(R_R-R_P)/(R_R-R_F) \quad (30)$$

Ανάκτηση λεπτόκοκκου υλικού (Recovery of fines)

Ορίζεται ως το ποσοστό του υλικού, με μέγεθος κόκκων μικρότερο από κάποιο μέγεθος αναφοράς, που απομακρύνεται με το προϊόν του διαχωριστή. Έχει έννοια για το συγκεκριμένο μέγεθος αναφοράς και όταν λάβει την τιμή 100% αναφερόμαστε σε ιδανικό διαχωρισμό. Έτσι ο όρος ανάκτηση «λεπτών» 80% στα 32 μm σημαίνει ότι το 80% του υλικού της τροφοδοσίας με μέγεθος μικρότερο από 32 μm έχει

οδηγηθεί στο προϊόν του διαχωριστή (το υπόλοιπο 20% έχει απομακρυνθεί με τις επιστροφές του διαχωριστή).

$$RF = \frac{(100-R_P)(R_R-R_F)}{(100-R_F)(R_R-R_P)} \cdot 100 = \frac{(100-R_P) \cdot P}{(100-R_F) \cdot F} \cdot 100 \quad (31)$$

Ανάκτηση χονδρόκοκκου υλικού (Recovery of coarse)

Ορίζεται ως το ποσοστό του υλικού, με μέγεθος μεγαλύτερο από κάποιο μέγεθος αναφοράς, που απομακρύνεται με τις επιστροφές του διαχωριστή. Έχει έννοια για συγκεκριμένο μέγεθος κόκκων και όταν λάβει την τιμή 100% αναφερόμαστε σε ιδανικό διαχωρισμό. Έτσι ο όρος «ανάκτηση χονδρόκοκκου υλικού» 70% στα 90 μμ σημαίνει ότι το 70% του υλικού της τροφοδοσίας με μέγεθος μεγαλύτερο από 90 μμ έχει οδηγηθεί στις επιστροφές του διαχωριστή (το υπόλοιπο 30% έχει απομακρυνθεί με το προϊόν του διαχωριστή).

$$RC = \frac{R_R}{r_F} \cdot \frac{R_F-R_P}{r_r-r_p} \cdot 100 = \frac{R \cdot R_R}{f-r_f} \quad (32)$$

Ιδανική ανάκτηση (Ideal recovery)

Στόχος του διαχωρισμού είναι τόσο η ανάκτηση των «λεπτών» όσο και η ανάκτηση των «χονδρών» να είναι 100% (ιδανικός διαχωριστής). Αν αντί διαχωρισμού το υλικό διαμοιραζόταν σε δυο κλάσματα, τότε προφανώς θα ίσχυε $RF=RC=50\%$. Επομένως το πραγματικό έργο του διαχωριστή, εκφραζόμενο μέσω της RF και RC , θα είναι το υπερβάλλον του 50%. Με βάση τα παραπάνω ως ιδανική ανάκτηση % ορίζεται το άθροισμα $(RF-50)+(RC-50)$ και πράγματι αναφέρεται στο πραγματικό έργο το οποίο κάνει ο διαχωριστής.

$$IR=RF+RC-100 \quad (33)$$

Κλασματική ανάκτηση (Fractional recovery)

Τα μεγέθη RF και RC, όπως αυτά ορίστηκαν παραπάνω, δε δίνουν μια πλήρη εικόνα για τη λειτουργία του διαχωριστή, αφού δείχνουν πώς συμπεριφέρεται το υλικό με μέγεθος μικρότερο η μεγαλύτερο από κάποιο μέγεθος αναφοράς και όχι το υλικό συγκεκριμένου μεγέθους. Γι' αυτόν το λόγο, σαφέστερη εικόνα σχετικά με την ορθή λειτουργία του διαχωριστή δίνει η κλασματική ανάκτηση του υλικού και η καμπύλη Tromp.

Ως κλασματική ανάκτηση (FR) ορίζεται το % ποσοστό του υλικού συγκεκριμένου μεγέθους $d[d=(d_1 + d_2)/2$ - μέσος όρος 2 μεγεθών], που μεταφέρεται στις επιστροφές του διαχωριστή. Έτσι $FR=95\%$ για τα 90 μm σημαίνει ότι από το υλικό της τροφοδοσίας με μέγεθος 90 μm το 95% μεταφέρεται στις επιστροφές του διαχωριστή. Η καμπύλη Tromp είναι το διάγραμμα της συνάρτησης $FR=f(d)$

$$FR((d_1 + d_2)/2) = \frac{R_{R1}-R_{R2} \cdot (C-1)}{(R_{P1}-R_{P2}+(R_{R1}-R_{R2})) \cdot (C-1)} \quad (34)$$

Από την καμπύλη Tromp προκύπτουν τα παρακάτω μεγέθη:

α. Μέγεθος ισοκατανομής (cut size): το μέγεθος των σωματιδίων σε μm που ισοκατανέμει στο προϊόν και στις επιστροφές του διαχωριστή. Είναι η διάμετρος του υλικού για την οποία ισχύει ότι η κλασματική ανάκτηση $FR=50\%$.

β. By-pass: Το ποσοστό % της τροφοδοσίας του διαχωριστή που ανεξαρτήτως μεγέθους κόκκων μεταφέρεται στις επιστροφές. Ουσιαστικά είναι το ελάχιστο σημείο της καμπύλης Tromp και αναφέρεται στο ποσοστό της τροφοδοσίας που ούτως ή άλλως δεν διαχωρίζεται.

γ. Συντελεστής οξύτητας (sharpness factor): Είναι ο λόγος του μεγέθους των σωματιδίων σε μm για το οποίο το 25% του υλικού μεταφέρεται στις επιστροφές του διαχωριστή, προς το μέγεθος των σωματιδίων για το οποίο το 75% του υλικού πάει στις επιστροφές του διαχωριστή. Επομένως, είναι ο λόγος των διαμέτρων του υλικού για τις οποίες ισχύει $FR=25\%$ και $FR=75\%$ αντίστοιχα.

Συνήθως όσο μικρότερο είναι το "μέγεθος ισοκατανομής" ή το "by-pass" και όσο μεγαλύτερος ο "συντελεστής οξύτητας" τόσο αποτελεσματικότερη είναι η λειτουργία του διαχωριστή. Στο σχήμα 52 δίνεται η καμπύλη Tromp ενός διαχωριστή, όπως και τα χαρακτηριστικά της μεγέθθ. (Μαραγκός Γ., 1995)

Μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας (Maximum energy saving)

Αποδίδει την εξοικονόμηση ενέργειας στο κύκλωμα άλεσης, σε σχέση πάντα με ανοικτό κύκλωμα άλεσης, όταν ο διαχωριστής είναι ιδανικός, δηλαδή όταν οι επιστροφές του διαχωριστή δεν περιέχουν σωματίδια με μέγεθος μικρότερο του μεγέθους αναφοράς.

Προσδιορίζεται θεωρώντας ότι η ελάττωση μεγέθους είναι μία δράση πρώτης τάξης.

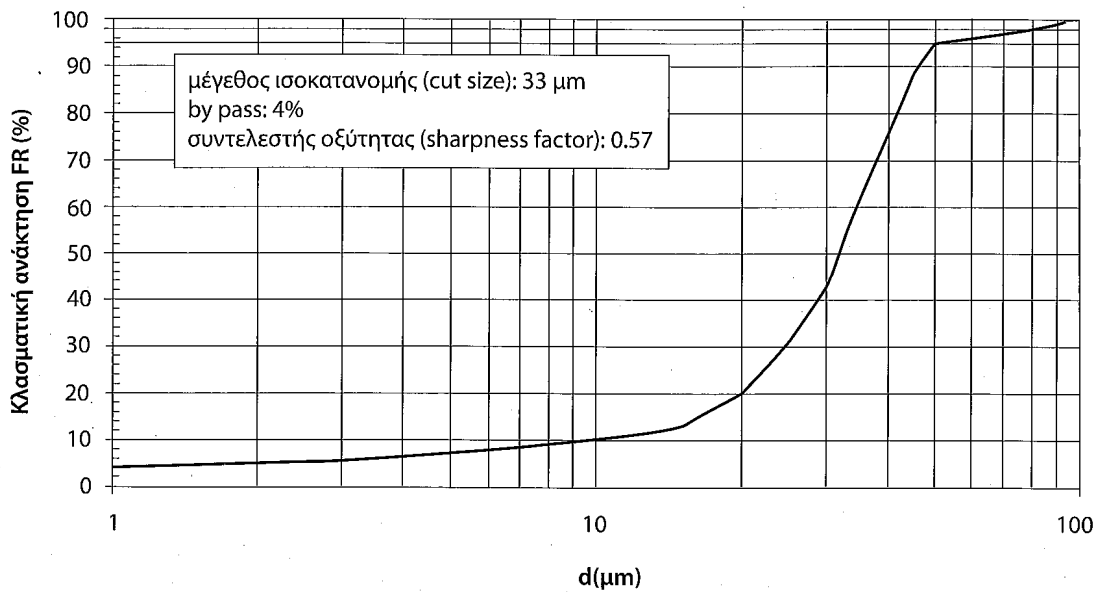
$$B_{\max} = 1 - C \frac{\log(C/(r_p + C - I))}{\log(I/r_p)} \quad \text{όπου } r_p = R_p/100 \quad (35)$$

Αποτελεσματικότητα διαχωριστή (separator efficiency)

Ορίζεται ως ο λόγος της % εξοικονόμησης ενέργειας σε κλειστό κύκλωμα άλεσης σε σχέση με ανοικτό κύκλωμα άλεσης (χωρίς διαχωριστή) προς την αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας αν ο διαχωριστής ήταν ιδανικός. Έτσι $V_s = 80\%$ σημαίνει ότι με τη χρήση του διαχωριστή εξοικονομείται σε σχέση με ανοικτό κύκλωμα άλεσης το 80% της ενέργειας που θα εξοικονομείτο αν ο διαχωριστής ήταν ιδανικός.

$V_s = B/B_{\max} = \text{Εξοικονόμηση ενέργειας} / \text{Μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας}$

$$V_s = \frac{\log(I/r_p) - C \cdot \log((I + (C - I) \cdot r_R) / (r_p + (C - I) \cdot r_R))}{\log(I/r_p) - C \cdot \log(C / (r_p + C - I))} \quad (36)$$



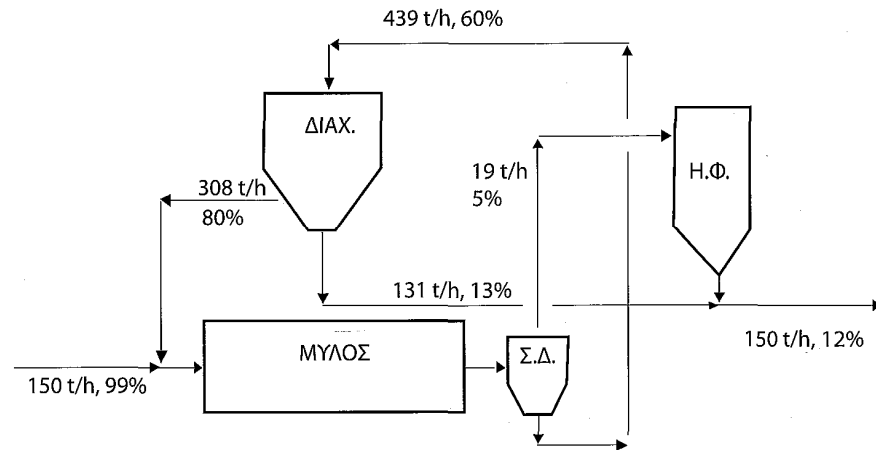
Σχήμα 52: Καμπύλη Tromp διαχωριστή

Εξοικονόμηση ενέργειας (Energy saving)

Αποδίδει την εξοικονόμηση ενέργειας σε κλειστό κύκλωμα άλεσης σε σχέση με ανοικτό κύκλωμα άλεσης (χωρίς διαχωριστή). Έτσι εξοικονόμηση ενέργειας 25% σημαίνει ότι με το κλειστό κύκλωμα άλεσης καταναλίσκεται 25% λιγότερη ενέργεια από το αντίστοιχο ανοικτό κύκλωμα. Προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$B = V_S - B_{\max} \quad (37)$$

Στο σχήμα 53 δίνεται η μαζική ροή και η λεπτότητα των υλικών στα διάφορα σημεία ενός κλειστού κυκλώματος άλεσης τσιμέντου. Με εφαρμογή των σχέσεων (30)-(39) και (6) προκύπτουν τα μεγέθη του πίνακα 21 που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του κυκλώματος.



Σχήμα 53: Μαζική ροή και λεπτότητα (ως υπόλειμμα % στα 32 μm) υλικών σε κλειστό κύκλωμα άλεσης τσιμέντου

Πίνακας 21: Αξιολόγηση του κυκλώματος άλεσης του σχήματος 53

κυκλοφορούν φορτίο μύλου, CL	205%
αριθμός ανακυκλοφορίας διαχωριστή, C	3.35
ανάκτηση λεπτόκοκκου υλικού, RF	64.9%;
ανάκτηση χονδροκόκκου υλικού, RC	93.5%
ιδανική ανάκτηση, IR	58.4%
εξοικονόμηση ενέργειας, B	41.2%
μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, B	50.8%
αποτελεσματικότητα διαχωριστή, Vs	81%

6. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΓΕΝΙΚΑ

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

Παρ' όλο που οι εκπομπές μιας βιομηχανίας τσιμέντου είναι περισσότερο ενοχλητικές παρά βλαπτικές για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, η αντιμετώπιση τους είναι απαραίτητη στο αυστηρό σήμερα νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία του περιβάλλοντος. 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. (Μαραγκός Γ., 1995)

6.1. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου εντοπίζονται στις επιμέρους διεργασίες, όπως αναλύονται παρακάτω:

Λατομεία - Εξόρυξη

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εντοπίζονται στον προκαλούμενο θόρυβο, στη σκόνη, στις δονήσεις όπως και στην καταστροφή του τοπίου λόγω της απολαβής του υλικού. Οι βιομηχανικές μονάδες παραγωγής τσιμέντου εντοπίζουν τις προσπάθειες τους στην αποκατάσταση του περιβάλλοντος, ενώ λαμβάνονται μέτρα και για την αντιμετώπιση άλλων οχλήσεων.

Διατάξεις προομογενοποίησης

Η σκόνη που εκλύεται κατά την απόθεση και απόληψη του υλικού, όπως και κατά τη μεταφορά του με 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, μερική απόληψη υλικού, ψεκασμός υλικών με νερό κ.λπ.

Διατάξεις θραύσης

Κατά τη λειτουργία ενός συγκροτήματος θραύσης παράγεται θόρυβος (100-110 dB(A)) και δονήσεις, ενώ διαχέεται και σκόνη στο περιβάλλον. Λαμβάνονται διάφορα μέτρα για τον περιορισμό των παραπάνω επιπτώσεων, όπως η τοποθέτηση των εγκαταστάσεων σε ειδικά ηχομονωμένα κτήρια, κατά προτίμηση κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ειδική θεμελίωση των κτηρίων, ψεκασμός με νερό των φορτίων του θραυστήρα και εφαρμογή κατάλληλων διατάξεων αποκονίωσης, όπως σακόφιλτρων. (Τριανταφύλλου Α., 1998)

Διατάξεις άλεσης φαρίνας και τσιμέντου

Από τη λειτουργία των συγκροτημάτων των μύλων οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εντοπίζονται στην εκπομπή σκόνης, στην ηχητική ρύπανση και στους κραδασμούς. Η εκπομπή σκόνης από τα τροφοδοτικά μηχανήματα, το μύλο και τα βοηθητικά μηχανήματα γενικά αντιμετωπίζεται με τη χρήση διατάξεων αποκονίωσης πολύ μεγάλης αποτελεσματικότητας (σακόφιλτρα, ηλεκτρόφιλτρα). Ο θόρυβος είναι ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα, αφού σε απόσταση 1 m από ένα λειτουργούντα 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 μηχανημάτων και χώρων επιτυγχάνεται μείωση του θορύβου στο επίπεδο των 65 dB (A). (Τσιμας Μ., 2005)

Διατάξεις ομογενοποίησης

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

Διατάξεις έψησης

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 κ.λπ.). Τα ολοένα 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 ολοένα και αυστηρότεροι.

Σχεδόν αποκλειστικά η αποκονίωση των αερίων επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρόφιλτων υψηλής αποτελεσματικότητας.

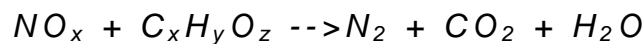
Οι εκπομπές SO , αποτελούν πρόβλημα σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν καύσιμο με μεγάλη περιεκτικότητα σε S (μαζούτ), οπότε και είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός conditioning tower. Στην περίπτωση που και οι πρώτες ύλες της βιομηχανίας έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε θειικά, η κατακράτηση των SO_2 γίνεται 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 της 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. Στη 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.

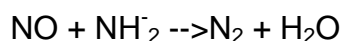
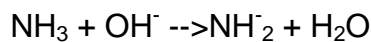
Όσον αφορά τα καύσιμα, η σειρά περιεκτικότητας σε N των διαφόρων καυσίμων είναι: κοκ, ανθρακίτης, λιθάνθρακας, λιγνίτης, βαριά αποστάγματα πετρελαίου, ελαφριά αποστάγματα πετρελαίου, φυσικό αέριο, με μείωση της περιεκτικότητας (N) από αριστερά προς τα δεξιά. Είναι φανερό ότι τα φθηνότερα καύσιμα είναι και αυτά που προκαλούν τα περισσότερα NO_x . (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

Ο ψεκασμός καυσίμου στην είσοδο της καμίνου γίνεται με στόχο τη δημιουργία αναγωγικής ατμόσφαιρας και τη διατήρησή της για κάποιο χρόνο ώστε να λάβει χώρα η αντίδραση:



Αν και η αρχή της μεθόδου είναι απλή, η εφαρμογή της είναι δύσκολη, γιατί η αντίδραση έχει σύνθετη κινητική που εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την αναγωγική ισχύ των αερίων και το αναγωγικό αντιδραστήριο. Πρακτικά το καύσιμο που ψεκάζεται στα απαέρια της καμίνου πρέπει να καταναλώνει το οξυγόνο γρήγορα και να προκαλεί ένα περιβάλλον που να περιέχει αναγωγικά αέρια. Όλες οι παραπάνω δυσκολίες περιορίζουν την εφαρμογή της μεθόδου.

Η αμμωνία, αφού ψεκαστεί στο σωλήνα των αερίων, μπορεί να αντιδράσει με το NO , δημιουργώντας άζωτο και νερό. Η αντίδραση μπορεί να λάβει χώρα χωρίς καταλύτη σε θερμοκρασίες μεταξύ 800-1100°C (ζώνη με αντίστοιχες θερμοκρασίες υπάρχει στον προασβεστοποιητή). Θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω χημικές αντιδράσεις: Αρχικά η αμμωνία μετατρέπεται σε NH_2 και στη συνέχεια αντιδρά με το μονοξείδιο:



Η αμμωνία τροφοδοτείται από ένα δοχείο διά μέσου πεπιεσμένου αέρα και οδηγείται σε ένα ακροφύσιο που την ψεκάζει στον αγωγό, όπου ρέουν τα αέρια. Η μείωση του NO_x είναι συνήθως 60-70%, μπορεί να φθάσει ακόμη και το 90%, αλλά το λειτουργικό κόστος είναι υψηλό (υψηλή τιμή NH_3), αν και δεν απαιτείται μεγάλο κόστος επένδυσης.

Διατάξεις ψύξης του 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. Η αποκονίωση στα ψυγεία με εσχάρες επιτυγχάνεται με χρήση σακόφιλτρων. Σημαντική πάντως είναι και η προκαλούμενη ηχητική επιβάρυνση στην περίπτωση των πλανητικών ψυγείων.

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. Πάντως η ριζική αντιμετώπιση των προβλημάτων προϋποθέτει τη χρήση κλειστών αποθηκευτικών χώρων, τάση που έχει επικρατήσει ειδικά για την αποθήκευση του κλίνκερ.

Αποθήκευση και διάθεση τσιμέντου

Η αποθήκευση του τσιμέντου γίνεται σε σιλό κυλινδρικού σχήματος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (εκπομπές σκόνης) κατά τη 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. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

Μέσα μεταφοράς

Τα μέσα μεταφοράς υλικών στη βιομηχανία τσιμέντου είναι οι κοχλιοφόροι μεταφορείς, οι μεταφορικές ταινίες, οι πνευματικοί μεταφορείς (αερογλυσιέρες - air slides), 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 κ.λπ. (Τριανταφύλλου Α., 1998)

6.2. ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ. ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Τριάντα χρόνια πριν (1980), μικρής κλίμακας εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα θεωρούνταν ακίνδυνες από τους εκάστοτε υπεύθυνους μιας βιομηχανικής εγκατάστασης. Επιπροσθέτως, η εύρεση λύσης σε τέτοιου είδους προβλήματα δεν ήταν από τις πρώτες προτεραιότητες των μηχανικών της εγκατάστασης. Παρ' όλα αυτά, τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια το ενδιαφέρον της κοινής γνώμης για περιβαλλοντικής φύσης προβλήματα έχει ενταθεί, οδηγώντας σε πλήρη επανεκτίμηση των προτεραιοτήτων αυτών.

Περαιτέρω ώθηση έχει δοθεί από τις νέες διαρκώς αυστηρότερες νομοθεσίες σε θέματα περιβάλλοντος και δημόσιας υγιεινής. Σε ό,τι αφορά τη βιομηχανία τσιμέντου, η EPA (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 βιομηχανίας τσιμέντου. Στον Πίνακα 6.1 φαίνεται η διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών σκόνης από τη βιομηχανία τσιμέντου.

Σε μια εγκατάσταση παραγωγής τσιμέντου τα σημεία συνεχούς μέτρησης των εκπομπών σκόνης είναι δυνατό να διαιρεθούν σε τέσσερις τομείς:

- Σύστημα καμίνου εφοδιασμένο με σύστημα μέτρησης τόσο της σκόνης όσο και των αέριων ρύπων (όπως NO_x , SO_2).

- Εγκατάσταση αποκονίωσης των αερίων του ψυγείου κλίνκερ, εφοδιασμένη με σύστημα μέτρησης των εκπομπών 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 6.1.: Διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών σκόνης στη βιομηχανία τσιμέντου

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

Στην Ελλάδα απαιτείται η συνεχής μέτρηση των εκπομπών σκόνης από τις καμίνους. Ο εξοπλισμός μέτρησης είναι δυνατό να επιλεγεί από τον υπεύθυνο της εγκατάστασης. Ο εξοπλισμός πρέπει να ελέγχεται μια φορά το χρόνο και οι χρησιμοποιούμενες καμπύλες αναφοράς πρέπει να υποβάλλονται στις αρμόδιες εθνικές υπηρεσίες. Επίσης, μετρήσεις των εκπομπών σκόνης (όχι συνεχείς) απαιτούνται για τους μύλους των πρώτων υλών, τους μύλους άνθρακα, τα ψυγεία κλίνκερ και τους 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 στη Γερμανία τα ισχύοντα όρια εκπομπών είναι συνδυασμένα με ένα αυστηρά καθορισμένο πλαίσιο ελέγχου των εκπομπών αποτελούμενο από απλές μετρήσεις, συνεχείς μετρήσεις και από Η/Υ ελέγχου των εκπομπών, εφοδιασμένους με αυστηρά καθορισμένα προγράμματα εκτίμησης των εκπομπών. Οι σχετικές πηγές εκπομπών σκόνης για τη βιομηχανία τσιμέντου έχουν καθοριστεί από τις υπεύθυνες περιβαλλοντικές αρχές. Αυτές είναι οι κάμινοι, τα ψυγεία κλίνκερ και οι μύλοι. Στις καμίνους 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 μεταξύ 2 και 5 kg/h η μέτρηση της αδιαφάνειας (opacity) του αερίου είναι επαρκής, ενώ για ρυθμούς ροής πάνω από 5 kg/h απαιτείται συνεχής μέτρηση των εκπομπών σκόνης. Τα αποτελέσματα των συνεχών μετρήσεων πρέπει να εκτιμούνται αδιάκοπα μέσω ειδικά προγραμματισμένων Η/Υ σε συμφωνία με τις αυστηρά διατυπωμένες Οδηγίες Clean Air Regulations 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. (Παπαϊωάννου Ν., 1998)

Στον πίνακα 6.1. δίνονται τα επίπεδα εκπομπών που μπορούν να επιτευχθούν στην Ελλάδα με την υιοθέτηση των βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών (ΒΔΤ). Τα επίπεδα αυτά θα αποτελέσουν τη βάση για τις οριακές εκπομπές στις άδειες λειτουργίας από τη στιγμή της εναρμόνισης της οδηγίας IPPC (ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της ρύπανσης στη βιομηχανία) με την ελληνική νομοθεσία. Ακόμη τίθενται ανώτατα όρια εκπομπών για πτητικές ενώσεις μετάλλων και ειδικότερα των Hg (0.05 mg/m^3), Cd και Ti (0.05 mg/m^3 αθροιστικά) και As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni και V (0.5 mg/m^3).

Πίνακας 6.2: Επίπεδα εκπομπών με βάση τις ΒΔΤ (Οδηγία IPPC).

Ρυπαντής	Νέες εγκαταστάσεις	Παλιές εγκαταστάσεις
Ενέργεια (MJ/t κλίνκερ)	3200-3400	3500-4500
Σκόνη (mg/Nm ³)	30-50	<80
NO _x (mg/Nm ³)	500-800	400-1000
SO ₂ (mg/Nm ³)	200	200

Το κόστος της περιβαλλοντικής προστασίας στη βιομηχανία τσιμέντου κυμαίνεται στις χώρες της Δυτικής Ευρώπης από 10% έως 20% του συνολικού κόστους παραγωγής, εξαιτίας τόσο των διαφορετικών περιβαλλοντικών απαιτήσεων όσο και των γενικότερων συνθηκών σε κάθε χώρα και ιδιαίτερα εξαιτίας των σημαντικών διαφορών στο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι πολύ πιθανόν να προκύψουν ιδιαίτερα έντονες πιέσεις εξομάλυνσης του περιβαλλοντικού κόστους σε όλες τις χώρες μέλη της Ε.Ε, αφού μάλιστα άμεσα θιγόμενες είναι οι ιδιαίτερα ισχυρές χώρες μέλη της Ένωσης.

Στον πίνακα 6.3 γίνεται σύγκριση των διατάξεων αποκονίωσης με βάση το επίπεδο εκπομπών σκόνης και το κόστος επένδυσης και λειτουργίας. (Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., ΤΕΕ, 2006)

Πίνακας 6.3: Κόστος και αποτελεσματικότητα διατάξεων αποκονίωσης

Διάταξη	Εφαρμογή	Εκπομπές σκόνης		Κόστος		
		mg/Nm ³	kg/t*	Επένδυση (εκατομ. €)	Λειτουργία (€/t)	
Ηλεκτρόφιλτρα	περιστρ. κάμιнос ψυγείο κλίνκερ μύλοι τσιμέντου	<10-<20	0.02-0.05	2.1-6.0	0.8-0.1-0.2	
		<10-<20	0.02-0.05	1.2	0.8-1.2	0.09-0.18
		<10	0.02			0.09-0.18
Σακόφιλτρα	περιστρ. κάμιнос ψυγείο κλίνκερ μύλοι	<5	0.01	2.1-6.0	0.15-0.35	
		<5	0.01	1.0-1.4	0.1-0.15	
		<10	0.02	0.3-0.5	0.03-0.04	

*kg/t κλίνκερ με βάση 2300 Nm³/t κλίνκερ

6.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΠΟΚΟΝΙΩΣΗΣ

Για την κατακράτηση της σκόνης στην τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποιούνται κυρίως τα σακόφιλτρα και τα ηλεκτρόφιλτρα. Η χρήση κυκλώνων έχει περιορισθεί σημαντικά λόγω της χαμηλής αποτελεσματικότητας τους στην αποκονίωση αέριων ρευμάτων με σωματίδια πολύ μικρού μεγέθους. Πάντως σε πολλές βιομηχανικές μονάδες οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται ως προαποκονιωτές, με στόχο τη διευκόλυνση της λειτουργίας των σακόφιλτρων και των ηλεκτρόφιλτρων. (Τσιμας Μ., 2005)

6.3.1 Σακόφιλτρα

Τα σακόφιλτρα (bag filters, baghouses) είναι διατάξεις αποκονίωσης στις οποίες η απομάκρυνση της σκόνης πραγματοποιείται με το πέρασμα του προς καθαρισμό αερίου διαμέσου υφάσματος ενός συγκεκριμένου τύπου. 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 περισυλλεγεί ικανοποιητικός αριθμός σωματιδίων που θα σχηματίσουν το λειτουργικό στρώμα σκόνης στους πόρους του υφάσματος.

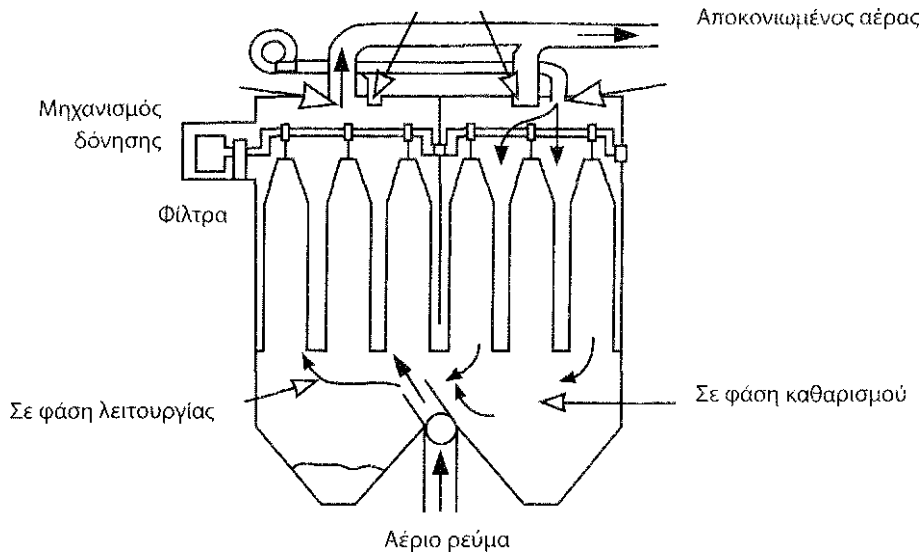
Εξαιτίας του ιδιαίτερα υψηλού βαθμού απόδοσής τους (της τάξης του 99.95%) σε σκόνης ενός μεγάλου εύρους διαμέτρου σωματιδίων, τα σακόφιλτρα χρησιμοποιούνται για τη συλλογή ιδιαίτερα λεπτόκοκκων κόνεων για πάνω από εκατό χρόνια. Ο μεγαλύτερος περιορισμός στη λειτουργία των σακόφιλτρων προέρχεται από τις θερμοκρασιακές ανοχές των μέσων φιλτραρίσματος. Για τις 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. Οι προσπάθειες παραγωγής περισσότερο θερμοανθεκτικών και παράλληλα φθηνότερων μέσων φιλτραρίσματος αποτελούν τον κύριο τομέα έρευνας γύρω από τα σακόφιλτρα. (Τσιμας Μ., 2005)

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 το 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.

Τα υπάρχοντα είδη σακόφιλτρων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες με βάση τη μέθοδο καθαρισμού τους: (i) **Σακόφιλτρα δόνησης** (shaker-cleaned), (ii) **Σακόφιλτρα αντίστροφης ροής** (reverse-flow-cleaned) και (iii) **Σακόφιλτρα πεπιεσμένου αέρα** (reverse pulse cleaned).

Τα σακόφιλτρα δόνησης είναι ο παλαιότερος τύπος σακόφιλτρων (Σχήμα 7). 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 και απομακρύνοντας τη σκόνη. Αν το σακόφιλτρο είναι συνεχούς λειτουργίας, θα πρέπει να αποτελείται από πολλαπλά διαμερίσματα, έτσι ώστε τα ξεχωριστά διαμερίσματα να είναι δυνατό να τίθενται 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 (woven) ύφασμα ώστε να ανθίστανται στην κάμψη και την ένταση κατά τη 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. (Τσιμας Μ., 2005)

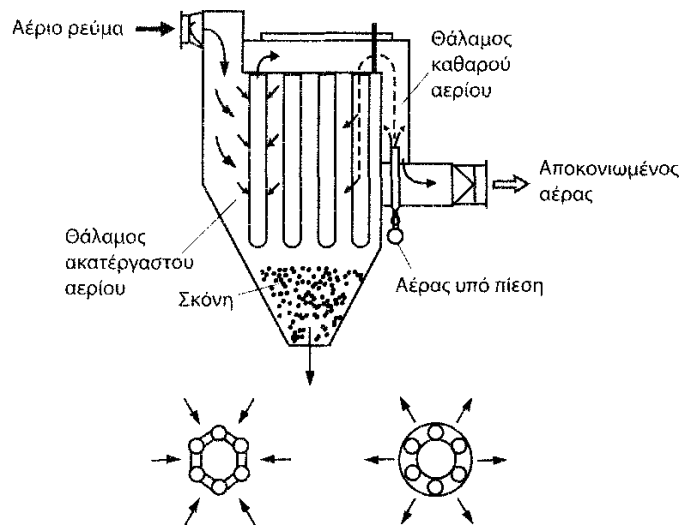


Σχήμα 7: Σακόφιλτρο δόνησης

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 αερίου, 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 προσαρμίζονται 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. (Τσιμας Μ., 2005)

Στα σακόφιλτρα πεπιεσμένου αέρα (σχήμα 8), το φίλτρο σχηματίζει ένα μακρόστενο σωλήνα, ο οποίος εφάπτεται σε ένα φέροντα σκελετό (support cage). Ο φέρον σκελετός ενισχύει το φίλτρο από την πλευρά του καθαρού αερίου, 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 (τυπική διάρκεια 100 ms ή και λιγότερο), από

μια παροχή πεπιεσμένου αέρα μέσω μιας ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας. Ο παλμός του αέρα διαστέλλει το φίλτρο και εκτοπίζει τη συσσωρευμένη σκόνη. Οι σειρές των φίλτρων καθαρίζονται μέσω μιας προαποφασισμένης χρονικής ακολουθίας, με κατάλληλο προγραμματισμό της λειτουργίας της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας. Η πίεση του παλμού είναι ικανή να εκτοπίσει τη συσσωρευμένη σκόνη χωρίς διακοπή της λειτουργίας του σακόφιλτρου.



Φάση λειτουργίας Φάση καθαρισμού

Σχήμα 8: Σακόφιλτρο πεπιεσμένου αέρα

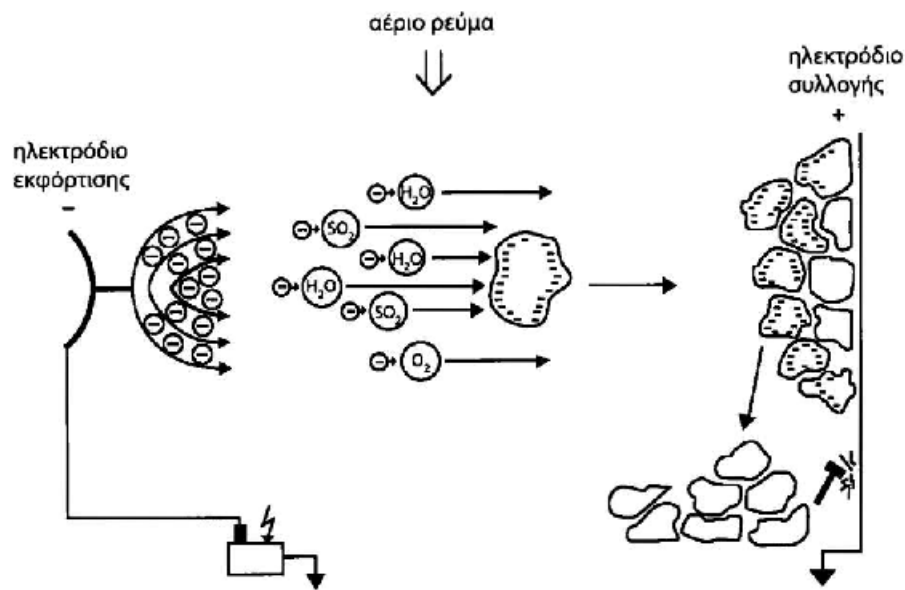
Μια βασική παράμετρος σχεδιασμού και λειτουργίας ενός σακόφιλτρου είναι η ταχύτητα φιλτραρίσματος εκφρασμένη μέσω του λόγου της ροής του αερίου (m^3/h) προς την επιφάνεια του φίλτρου (m^2). Ο παραπάνω λόγος «αέρας προς ύφασμα» (air-to-cloth ratio $m^3/(m^2h)$) λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές στα σακόφιλτρα πεπιεσμένου αέρα. Οι συνήθεις τιμές του παραπάνω λόγου για τη βιομηχανία τσιμέντου είναι 80-160. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το αέριο προϊόν διαχωριστή κυκλώματος άλεσης τσιμέντου, ροής $260000 m^3/h$, περιεκτικότητας σε υλικό $1100 g/m^3$ και θερμοκρασίας $90^\circ C$, απαιτεί μία συνολική επιφάνεια φίλτρων από πολυεστέρα $3250 m^2$, ο λόγος air-to-cloth ratio είναι $86 m^3/(m^2h)$ και το απομακρυνόμενο αέριο ρεύμα από το σακόφιλτρο έχει περιεκτικότητα σε σκόνη $100 mg/m^3$ (απόδοση διαχωρισμού: 99.99%).

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. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

6.3.2 Ηλεκτρόφιλτρα

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% ή και μεγαλύτερος είναι συνήθη μεταβλητή σχεδιασμού για τις περισσότερες εφαρμογές. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ηλεκτρόφιλτρων, που ίσως και να εξηγεί τους ιδιαίτερα υψηλούς βαθμούς απόδοσής 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 στην εκπομπή ηλεκτρονίων από τα ηλεκτρόδια εκφόρτισης (discharge or emitting electrodes), τα οποία με τη σειρά τους έχουν φορτιστεί με τη βοήθεια ανορθωτή ώστε να αποκτήσουν υψηλό αρνητικό δυναμικό. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτροδίων εκφόρτισης, η ορθή επιλογή των οποίων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επιτυχή λειτουργία του ηλεκτρόφιλτρου. Τα ηλεκτρόνια κινούμενα προς τα ηλεκτρόδια συλλογής (collecting electrodes) συμπαρασύρουν ταυτόχρονα τόσο τα μόρια των αερίων όσο και τα σωματίδια σκόνης, όπως φαίνεται στο σχήμα 9. Καθώς τα ηλεκτρόνια συσσωρεύονται στα σωματίδια σκόνης, τα τελευταία φορτίζονται αρνητικά, οπότε με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου οδηγούνται στα γειωμένα ηλεκτρόδια συλλογής όπου και αποτίθενται. Η διάταξη αυτή δημιουργεί μια συστοιχία περασμάτων, διαμέσου των οποίων οδηγείται το προς καθαρισμό αέριο. Ξεχωριστές διατάξεις «καθαρίζουν» τα ηλεκτρόδια συλλογής, συνήθως με τη μορφή περιοδικών μηχανικών κτυπημάτων. (Παπαγεωργίου Δ., Θεολόγος Φ., Τέας Χ., Χανιωτάκης Ε., ΤΕΕ, 2007)



Σχήμα 9: Αρχή λειτουργίας ηλεκτρόφιλτρων

6.3.3 Συγκριτική μελέτη σακόφιλτρων - ηλεκτρόφιλτρων

Από τα 10-15 m³ αερίου που εκλύονται κατά την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου, με διαφορά το μεγαλύτερο μέρος τους είναι αέρας εξαγωγής που εκλύεται από τους μύλους, τα ψυγεία κλίνκερ, τους ξηραντήρες και τον εξοπλισμό μεταφοράς και υφίσταται αποκονίωση με σακόφιλτρα. Από την άλλη μεριά τα αέρια εξαγωγής από τις καμίνους υφίστανται αποκονίωση σε πολύ μεγάλο βαθμό με τη χρήση ηλεκτρόφιλτρων εξαιτίας κυρίως των υψηλών θερμοκρασιών. Η περιοχή όπου η χρήση των διατάξεων είναι μοιρασμένη είναι στην αποκονίωση των αερίων εξόδου από τα ψυγεία κλίνκερ και τους ξηραντήρες.

Το ηλεκτρόφιλτρο θεωρείτο για πάρα πολύ καιρό ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί η αποτελεσματική αποκονίωση των αερίων εξόδου της καμίνου. Το γεγονός αυτό ήταν η απόρροια συνδυασμού παραγόντων όπως:

- Το ηλεκτρόφιλτρο είναι σε θέση να επεξεργαστεί αέρια υψηλής θερμοκρασίας.
- Είναι μηχανικά ιδιαίτερα αξιόπιστο.

- Σε περίπτωση που προκύψει κάποιο πρόβλημα, τα επίπεδα εκπομπών είναι δυνατό να επηρεαστούν, όχι όμως και η λειτουργία της καμίνου, αφού το ηλεκτρόφιλτρο δεν αποτελεί φραγμό στο πέρασμα του αερίου.

- Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης είναι σχετικά χαμηλά.

Σήμερα τα ηλεκτρόφιλτρα επιτυγχάνουν ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα εκπομπών. Για παράδειγμα, 20 mg/Nm^3 είναι το τυπικά εγγυημένο όριο, αλλά τα πραγματικά επίπεδα εκπομπών είναι πολύ συχνά χαμηλότερα από 5 mg/Nm^3 , πλησιάζοντας τα κατώτερα όρια των διατάξεων μέτρησης.

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν κάποιες διαφορές ανάμεσα στα ηλεκτρόφιλτρα και τα σακόφιλτρα, οι οποίες είναι δυνατό να λειτουργήσουν υπέρ των τελευταίων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι κανονισμοί ελέγχου των εκπομπών είναι ιδιαίτερα αυστηροί. (Τσιμας Μ., 2005)

Το ηλεκτρόφιλτρο δεν αποτελεί φυσικό φραγμό στο πέρασμα του αερίου (ή των στερεών σωματιδίων). Το χαρακτηριστικό αυτό παλαιότερα θεωρείτο πλεονέκτημα, μιας και τυχόν προβλήματα στο ηλεκτρόφιλτρο δεν επηρέαζαν τη λειτουργία της καμίνου, όμως σήμερα εκπομπές σκόνης πάνω από το επιτρεπόμενο όριο είναι δυνατό να απαιτούν το σταμάτημα λειτουργίας της καμίνου. Στα σακόφιλτρα προβληματική λειτουργία σημαίνει συνήθως μια αύξηση στην πτώση πίεσης και συνεπώς και στην ενεργειακή κατανάλωση, γεγονός που όμως δεν επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της αποκονίωσης. Ένα κατεστραμμένο μέσο φιλτραρίσματος είναι δυνατό να αυξήσει τα επίπεδα εκπομπών, είναι όμως εύκολο να αντιμετωπισθεί είτε με την άμεση αντικατάστασή του, είτε τιθέμενο προσωρινά εκτός λειτουργίας ώστε να αντικατασταθεί στην επόμενη διακοπή λειτουργίας της καμίνου.

Τα ηλεκτρόφιλτρα είναι πολύ ευαίσθητα στη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων τόσο του αερίου όσο και της σκόνης και λειτουργούν καλά μόνο σε σταθερές συνθήκες. Τα σακόφιλτρα αντίθετα δεν είναι καθόλου ευαίσθητα σε οποιαδήποτε διαφοροποίηση τόσο των ιδιοτήτων των αερίων εξόδου της καμίνου όσο και της σύστασης των στερεών σωματιδίων. Ακόμη τα υψηλά σημεία δρόσου δεν αποτελούν πρόβλημα, εφόσον επιλεγεί φίλτρο με κατάλληλη σύσταση ινών.

Το μονοξειδίο του άνθρακα προκαλεί πολλές εκρήξεις στα ηλεκτρόφιλτρα παρά τα μέτρα ασφαλείας. Ο επαρκής έλεγχος της καύσης είναι ικανός πρακτικά να μηδενίσει το σχηματισμό μονοξειδίου του άνθρακα, αλλά επί της αρχής ο κίνδυνος είναι υπαρκτός και τα μέτρα ασφαλείας πρέπει να παραμένουν ενεργά και έτοιμα να θέσουν εκτός λειτουργίας το ηλεκτρόφιλτρο σε περίπτωση σχηματισμού μονοξειδίου του άνθρακα.

Το μόνο αδιαμφισβήτητο πλεονέκτημα των ηλεκτρόφιλτρων σε σχέση με τα σακόφιλτρα είναι ότι τα πρώτα δεν καταστρέφονται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ενώ τα δεύτερα καταστρέφονται ακόμα και για μικρές χρονικά περιόδους υπέρβασης της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας.

Στον πίνακα 6.3 έχει ήδη παρουσιαστεί μια σύγκριση των σακόφιλτρων και των ηλεκτρόφιλτρων με βάση τόσο το επίπεδο εκπομπών σκόνης όσο και το κόστος επένδυσης και λειτουργίας. (Boynton, R.S., 1980)

7. ΕΙΔΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ

7.1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΕΙΔΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται μια σειρά από τσιμέντα, τα οποία έχουν κάποια ειδικά χαρακτηριστικά και κατά κανόνα διαφοροποιούνται από τα κοινά τσιμέντα. Πολλά από αυτά τα τσιμέντα απαιτούν διαφοροποιημένη είτε σύνθεση πρώτων υλών είτε παραγωγική διαδικασία. Έτσι στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθούν:

- Τσιμέντα που μπορούν να ενταχθούν και να καλυφθούν από ορισμένους από τους πέντε τύπους του EN 197-1, αλλά έχουν προβεβλημένη μία χαρακτηριστική ιδιότητα. Ενδεικτικά αναφέρονται τα: i) τσιμέντα ανθεκτικά στην επίδραση των θειικών αλάτων, ii) τσιμέντα χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης, iii) τσιμέντα υψηλών αρχικών αντοχών, iv) λευκά τσιμέντα v) τσιμέντα τοιχοποιίας.

- Τσιμέντα χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων, στα οποία υπάγονται τα αλινιτικά, τα αλουμι- νοθειικά και κυρίως τα βελιτικά τσιμέντα.

- Ειδικά τσιμέντα (special cements) ή τσιμέντα για εντελώς εξειδικευμένες εφαρμογές και αγορές, στα οποία, μεταξύ άλλων, υπάγονται τα: i) τσιμέντα ταχείας πήξης και σκλήρυνσης, ii) διογκούμενα τσιμέντα, iii) τσιμέντα τροποποιημένα με διάφορες πολυμερείς ίνες, iv) τσιμέντα που ενδείκνυνται για σταθεροποιήσεις των πετρελαιοπηγών, v) τσιμέντα που είναι ανθεκτικά στην επίδραση του παγετού.

Στη συνέχεια εξετάζονται συνοπτικά κάποια από τα παραπάνω τσιμέντα, τα οποία έχουν επιλεγεί με βάση το εύρος των εφαρμογών τους. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

7.2. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΪΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ

Η ανάγκη για τα τσιμέντα αυτά πηγάζει από τις απαιτήσεις ποιότητας που πρέπει να έχουν σκυροδέματα τα οποία εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον όπως είναι αυτό των θειικών αλάτων. Η δράση των θειικών εκδηλώνεται είτε ως σταδιακή απώλεια μάζας και αντοχών του σκυροδέματος είτε λόγω της δημιουργίας ογκωδών προϊόντων από τις χημικές αντιδράσεις ενυδάτωσης.

Κατηγορίες:

· **Αμελητέα επίπτωση θειικών:** Όταν τα περιεχόμενα θειικά είναι μικρότερα του 0.1% στο έδαφος ή <150 ppm στο νερό. Δεν υπάρχει περιορισμός στον τύπο τσιμέντου και στο λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C).

· **Ενδιάμεση επίπτωση:** Για $0.1\% < SO_3 < 0.2\%$ στο έδαφος ή $150 \text{ ppm} < SO_3 < 1500 \text{ ppm}$ στο νερό. Απαιτείται τσιμέντο τύπου II ή τσιμέντο με ποζολάνη ή τσιμέντο με σκωρία με λόγο $W/C < 0.5$

· **Σοβαρή επίπτωση:** Για $0.2\% < SO_3 < 2.0\%$ στο έδαφος ή $1500 \text{ ppm} < SO_3 < 10000 \text{ ppm}$ στο νερό. Απαιτείται τσιμέντο τύπου V με λόγο $W/C < 0.45$

Πολύ σοβαρή επίπτωση: Για $2\% < SO_3$ στο έδαφος ή $10000 \text{ ppm} < SO_3$ στο νερό. Απαιτείται τσιμέντο τύπου V και επιπλέον ποζολανικό πρόσθετο με λόγο $W/C < 0.5$. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

7.3. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ

Τα τσιμέντα χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης (low heat cements) παρασκευάστηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του '30 στις ΗΠΑ και χρησιμοποιήθηκαν σε ογκώδεις κατασκευές, όπου η εκλυόμενη θερμότητα ενυδάτωσης προκαλούσε σημαντική άνοδο της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της κατασκευής. Αργότερα τα τσιμέντα αυτά τυποποιήθηκαν κατά ASTM ως τσιμέντα τύπου IV. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι οι μειωμένες αντοχές, ιδιαίτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη των τσιμέντων μέσης θερμότητας ενυδάτωσης που τυποποιήθηκαν ως τσιμέντα τύπου II. Μειωμένη θερμότητα ενυδάτωσης παρουσιάζουν επίσης σύνθετα τσιμέντα τα οποία περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, ποζολάνες ή ασβεστόλιθο.

7.4. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΥΨΗΛΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ

Τα τσιμέντα υψηλών αρχικών αντοχών παρουσιάζουν αυξημένους ρυθμούς ενυδάτωσης, έναντι των κοινών τσιμέντων Portland, και αναπτύσσουν υψηλές

πρώιμες αντοχές. Συνήθως περιέχουν κλίνκερ με αυξημένο ποσοστό αλίτη και μικρό ποσοστό βελίτη, το οποίο παράγεται μετά από έψηση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες με τη βοήθεια ευτηκτικών ουσιών όπως CaF_2 , CaSO_4 , CaO .

7.5. ΛΕΥΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND

Τα λευκά τσιμέντα είναι τσιμέντα Πόρτλαντ που χρησιμοποιούνται σε πολλές δομικές εφαρμογές και τα οποία καλύπτονται από τα ίδια πρότυπα με τα τσιμέντα Πορτλαντ. Τα λευκά αλλά και τα έγχρωμα τσιμέντα Portland χρησιμοποιούνται για διακοσμητικούς και αισθητικούς λόγους, σε κατασκευές όπως εξωτερικές επιφάνειες κτηρίων, γέφυρες, πισίνες κλπ.

Το λευκό τσιμέντο παράγεται με διαδικασία παρόμοια με αυτή του φαιού αλλά με διαφοροποιημένες πρώτες ύλες. Για την παραγωγή λευκού τσιμέντου επιλέγονται αυστηρά οι πρώτες ύλες και ρυθμίζονται οι συνθήκες παραγωγής έτσι ώστε να αποφεύγεται η παρουσία προσμείξεων που επηρεάζουν τη λευκότητα του προϊόντος. Τα έγχρωμα τσιμέντα παράγονται με προσθήκη, κατά τη συνάλεση, κατάλληλων χρωστικών ουσιών συνήθως στο λευκό και σε ειδικές περιπτώσεις στο φαιό τσιμέντο. (Μαγκανάρη Κ., 2002)

7.6 ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Τα τσιμέντα τοιχοποιίας (masonry cements) είναι εργοστασιακά παρασκευασμένες λεπτόκοκκες υδραυλικές κονίες που ενεργοποιούνται σημαντικά και αναπτύσσουν αντοχές με την παρουσία κλίνκερ τσιμέντου Πόρτλαντ, το οποίο είναι τουλάχιστον 25 ή 40% (πίνακας 12.11). Όταν αναμειγνύονται μόνο με άμμο και νερό, χωρίς άλλα πρόσθετα, παράγουν ένα εργάσιμο κονίαμα κατάλληλο για τοιχοδομές και επιχρίσματα. Η περισσότερο σημαντική τους χρήση είναι για κονιάματα τοιχοδομών καθώς και για το πρώτο χέρι των επιχρισμάτων, καθόσον πλεονεκτούν μεν ως προς τις αντοχές που προσδίδουν στο κονίαμα, μειονεκτούν όμως σε άλλες ιδιότητες και κυρίως στην πρόσφυση μεταξύ του κονιάματος και των μονάδων της τοιχοποιίας.

Τα τσιμέντα τοιχοποιίας παράγονται με συνάλεση κλίνκερ, ασβεστόλιθου (ή υδρασβέστου) και ενός αερακτικού μέσου. Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες αντοχών

MC 5, MC 12.5 και MC 22.5, όπου στην πρώτη το κλίνκερ είναι τουλάχιστον 25%, ενώ στις άλλες είναι τουλάχιστον 40%. Τα οργανικά υλικά σε όλες τις περιπτώσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 1%. Τα τσιμέντα τοιχοποιίας διακρίνονται σε αυτά που επιτρέπουν (air entraining) ή όχι (non-air entraining) τη διείσδυση του αέρα. (Boynton, R.S., 1980)

7.7. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ

Τα τελευταία χρόνια και ιδίως μετά την εγκατάσταση των συστημάτων έψησης με προασβεστοποιητή (διπλή καύση) η ενεργειακή κατανάλωση για την παραγωγή τσιμέντου έχει μειωθεί σημαντικά. Ο στόχος όμως για παραγωγή τσιμέντου με την κατά το δυνατόν μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί πάντα καίρια στρατηγική όλων των εμπλεκόμενων με την παραγωγή του τσιμέντου. Στις πρώτες προσπάθειες των ανά τον κόσμο ερευνητών για περαιτέρω μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας περιλαμβάνονται:

1. Η μείωση της θερμοκρασίας έψησης με χρήση βελτιωτικών έψησης όπως είναι ουσίες που επιδρούν στην κινητική των αντιδράσεων έψησης (mineralizers) και ουσίες που δρουν ως ευτηκτικές (fluxes).

2. Η μείωση του περιεχόμενου ανθρακικού ασβεστίου στο μείγμα των πρώτων υλών (με χρήση υλικών που περιέχουν CaO αντί CaCO₃), έτσι ώστε να μειωθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις που σχετίζονται με την ασβεστοποίηση. Παράλληλα μειώνονται οι εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα, στόχος που για την τσιμεντοβιομηχανία την τρέχουσα περίοδο που υλοποιούνται οι αποφάσεις του πρωτοκόλλου του Κιότο, έχει ιδιαίτερη βαρύτητα καθόσον σημαντικό ποσοστό του εκπεμπόμενου από αυτή CO₂ προέρχεται από τη διεργασία της διάσπασης των ασβεστόλιθων.

3. Συνάλεση του κλίνκερ με συμπληρωματικά υλικά που έχουν ποζολανικές ιδιότητες, όπως η σκωρία και η ιπτάμενη τέφρα.

Η ακολουθούμενη σήμερα στρατηγική, όσον αφορά τις προσπάθειες για μείωση της θερμοκρασίας έψησης κλίνκερ, εστιάζονται στο σχηματισμό δραστικών

Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου: Οι διεργασίες και ο ρόλος του Μηχανολόγου υδραυλικών ενώσεων, στις οποίες οι ενώσεις του οξειδίου του ασβεστίου βρίσκονται σε μικρότερο ποσοστό. (Μαραγκός Γ., 1995)

7.7.1. Βελιτικά Τσιμέντα

Τα βελιτικά τσιμέντα είναι τσιμέντα με μειωμένο ή και μηδενικό περιεχόμενο σε αλίτη» σε σχέση με το τυπικό τσιμέντο Portland, με ταυτόχρονη αύξηση του περιεχομένου σε βελίτη. Τα βελιτικά τσιμέντα προκύπτουν από τη συνάλεση βελιτικού κλίνκερ με γύψο ή ανυδρίτη. Τα βελιτικά κλίνκερ περιέχουν πυριτικό διασβέστιο ως κύρια (ή και μόνη) ασβεστοπυριτική φάση. Επίσης περιέχουν αργιλικό τριασβέστιο και τη φάση του φερρίτη. Ένα βελιτικό κλίνκερ, ανάλογα και με τις συνθήκες έψησης, ενδέχεται να περιέχει και τη φάση του αλίτη αλλά σε ποσοστά σημαντικά μικρότερα από αυτά του τυπικού κλίνκερ Portland. Σημαντική επίσης διαφορά του βελιτικού κλίνκερ από το τυπικό κλίνκερ είναι η μικρότερη περιεκτικότητα του πρώτου σε CaO, η οποία οδηγεί σε βαθμούς κορεσμού σε άσβεστο (LSF) μικρότερους του 83.

7.7.2. Θειοασβεσταργυλικά Τσιμέντα

Είναι τσιμέντα τα οποία περιέχουν σε σημαντικά ποσοστά αργιλικό θειασβέστιο (C,A S), το οποίο είναι γνωστό στη βιβλιογραφία και ως «Klein's compound». Σε αρκετές χώρες τα τσιμέντα αυτά παράγονται ήδη βιομηχανικά και διατίθενται στην αγορά. Στην Κίνα για παράδειγμα, έγινε εμπορική αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας με στόχο όχι μόνο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και την αξιοποίηση διαθέσιμων πρώτων υλών. Το C A S είναι πολύ ενεργό συστατικό και συνδυάζεται με το γύψο προς σχηματισμό ετρινγκίτη, ο οποίος μπορεί να παρέχει υψηλές αντοχές μέσα σε λίγες ώρες. Εναλλακτικά, παρουσία ελευθέρας ασβέστου, ο σχηματισμός του ετρινγκίτη είναι βραδύτερος αλλά πιο διογκωτικός, δημιουργώντας έτσι τη βάση για το σχεδιασμό διογκούμενων τσιμέντων ή τσιμέντων ανθεκτικών στη συρρίκνωση. Η παραγωγή θειοασβεσταργυλικών τσιμέντων πλούσιων σε βελίτη είναι επίσης δυνατή. (Boynton, R.S., 1980)

7.7.3. Αλινιτικά Τσιμέντα

Η παρασκευή του αλινιτικού κλίνκερ, που γίνεται σε θερμοκρασία 1150(M200°C, απαιτεί την προσθήκη στο μείγμα των πρώτων υλών ποσότητας CaCl_2 (5-10% επί του μείγματος των Π.Υ., μη υπολογιζομένης της Α.Π. τους) καθώς και MgO σε ποσοστά λίγο μεγαλύτερα από ο,τι στο κλίνκερ Πόρτλαντ. Το χλώριο που περιέχεται εισέρχεται έτσι κατά την έψηση στον κρύσταλλο μιας διαφοροποιημένης ασβεστοπυριτικής ένωσης που σχηματίζεται, αντί του C_2S που υπάρχει στο κλίνκερ Portland. Αυτή η νέα ισχυρώς βασική ασβεστοπυριτική ορυκτή φάση ονομάζεται αλινίτης, περιέχει C, S, A, M και C1 και ο προσεγγιστικός τύπος της είναι $\text{C}_2\text{MS}_6\text{A-CaCl}_2$. Υπάρχει ακόμη η γνωστή φάση του βελίτη, ενώ ως ασβεσταργλική φάση υπάρχει το $\text{CuA}_7\text{-CaCl}_2$, που περιέχει κρυσταλλωμένο χλώριο όπως και ο αλινίτης. Ακόμα εμφανίζεται και ασβεστοσιδηρική φάση με πιθανή σύνθεση CF. Οι φάσεις του βελίτη και η ασβεστοσιδηρική, ενώ δεν έχουν στον τύπο τους χλωριόντα, μπορούν να έχουν εγκλείσει χλώριο (έως 1%) ως πρόσμειξη.

Μία τυπική σύσταση του αλινιτικού κλίνκερ μπορεί να αποδοθεί ως εξής: αλινίτης 50-80%, βε-λίτης 10-40%, χλωροασβεσταργλική φάση 5-10%, ασβεστοσιδηρική φάση <5%. (Boynton, R.S., 1980)

7.8. ΤΣΙΜΕΝΤΑ OILWELL

Τα τσιμέντα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως σε εγκαταστάσεις εξόρυξης πετρελαίου και παραγωγής φυσικού αερίου. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ο σχηματισμός υδαρούς κονίας, χαμηλού ιξώδους, η οποία μπορεί να διακινηθεί σε μεγάλα βάθη αλλά και να σκληρυνθεί γρήγορα όταν φθάσει στην τελική της θέση. Όπως είναι φανερό, τα τσιμέντα αυτά πρέπει να ελέγχονται αυστηρά, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η καλή συμπεριφορά τους σε συνθήκες αυξημένης πίεσης και θερμοκρασίας.

Η τυποποίηση του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (API), η οποία έχει υιοθετηθεί διεθνώς, ορίζει οκτώ τύπους τσιμέντων (A, B, C, D, E, F, G και H) ανάλογα με το βάθος στο οποίο θα χρησιμοποιηθούν. Ένα πλήθος προσθέτων αναμειγνύεται με τα τσιμέντα αυτά, πριν από τη χρήση τους, έτσι ώστε να αποκτηθούν τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται στις συγκεκριμένες συνθήκες

πίεσης και θερμοκρασίας. Τα πρόσθετα αυτά χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση των χρόνων πήξης (επιβραδυντές και επιταχυντές), την αύξηση της πυκνότητας της υδαρούς κονίας σε μεγάλο βάθος, την παρεμπόδιση αναστροφής στην ανάπτυξη των αντοχών, την αποφυγή απώλειας νερού κατά τη διακίνηση, την κατακράτηση του πλεονάζοντος νερού που προστίθεται για να αποκτηθεί η επιθυμητή ρευστότητα κ.ά. (Παπαγεωργίου Δ., Θεολόγος Φ., Τέας Χ., Χανιωτάκης Ε., ΤΕΕ, 2007)

Τα oilwell τσιμέντα παράγονται από τις ίδιες πρώτες ύλες και με την ίδια διαδικασία όπως και τα κοινά τσιμέντα Portland με μέση ή υψηλή προστασία έναντι της διάβρωσης από θειικά. Τα κύρια συστατικά τους είναι ο αλίτης, ο βελίτης, η ασβεσταργιλική και η αργιλοφερριτική φάση, η αναλογία τους, όμως, ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το υλικό. Γενικά, η δραστηριότητα των τσιμέντων αυτών είναι μικρότερη των κοινών τσιμέντων, έτσι ώστε το μείγμα νερού - τσιμέντου να μην πήζει και σκληραίνει κατά τη διακίνησή του.

Η ενυδάτωση των τσιμέντων oilwell είναι παρόμοια με αυτή του κοινού τσιμέντου σε συνθήκες περιβάλλοντος, αλλά διαφοροποιείται σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Έτσι, είναι δυνατόν να παρατηρούνται διαφορετικά προϊόντα ενυδάτωσης στο ίδιο τσιμέντο, ανάλογα με τις συνθήκες στο χώρο κατασκευής του έργου. Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα είναι ο μετασχηματισμός των ένυδρων ασβεσταργιλικών προϊόντων, σε υψηλές θερμοκρασίες, προς $\text{Ca}_2(\text{HSiO}_4)\text{OH}$ και $\text{Ca}_6\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_6$ τα οποία προκαλούν αναστροφή της ανάπτυξης των αντοχών. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με προσθήκη, περίπου 35% κ.β., πυριτίας, η οποία εμποδίζει τον παραπάνω μετασχηματισμό και ευνοεί το σχηματισμό του τομπερμορίτη. Όσον αφορά την ενυδάτωση της αργιλικής και αργιλοφερριτικής φάσης, το κύριο προϊόν είναι ο hydrogarnet, ενώ δεν παρατηρείται σχηματισμός ετρινγκίτη και μονοθειικού αργιλικού ασβεστίου.

Η παραγωγή τσιμέντων oilwell περιέχουν διάφορα υδραυλικά ή ποζολανικά υλικά, όπως ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, φυσικές ποζολάνες ή θερμικά επεξεργασμένες αργίλους, κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος, γιατί παρουσιάζει τεχνικά και οικονομικά οφέλη. Τσιμέντα με σκωρία και μικροσίλικα έχουν ήδη δοκιμασθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα. (Τριανταφύλλου Α., 1998)

8. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Ένας μηχανολόγος μηχανικός μπορεί να εργαστεί τόσο στην παραγωγή όσο και στη συντήρηση. Επιπλέον μπορεί να εργαστεί στον ποιοτικό έλεγχο που πραγματοποιείται σε διάφορα στάδια κατά τη διαδικασία της παραγωγής.

α) Παραγωγή

Κατά την προετοιμασία του μείγματος των πρώτων υλών, ένας Μηχανολόγος οφείλει να ρυθμίσει τις μηχανές ώστε να προσδώσει στο μείγμα τόσο την κατάλληλη λεπτότητα έτσι ώστε να ψηθεί με την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα του. Επιπλέον οφείλει να ελέγξει εάν το μίγμα διαθέτει την απαραίτητη ομοιογένεια για την σταθερότητα στην ποιότητα.

Ο ρόλος του Μηχανολόγου συνδέεται και με την άλεση των πρώτων υλών και του τσιμέντου. Οι στόχοι που επιδιώκονται κατά την άλεση είναι οι εξής:

1. Σταθερότητα στην ποιότητα του προϊόντος
2. Ελαχιστοποίηση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας
3. Να πετύχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης

Η μηχανή στην οποία πραγματοποιείται η άλεση ονομάζεται Μύλος. Ο Μηχανολόγος που εργάζεται σε αυτό το στάδιο οφείλει να ελέγξει την πλήρωση της μηχανής (παρακολουθεί εάν υπάρχει η σωστή ποσότητα υλικού και ρυθμίζει την μηχανή εάν χρειαστεί).

Ένα άλλο στάδιο όπου μπορεί να εργαστεί ένας μηχανολόγος είναι στο διαχωριστή όπου παρακολουθεί αν το μηχάνημα είναι σε θέση να διαχωρίζει το έτοιμο υλικό από το χονδρόκοκκο, όπου το γυρίζει πάλι στον Μύλο.

Η πιο βασική κατεργασία κατά την διάρκεια παραγωγής του τσιμέντου είναι αυτή της έψησης. Οι αντιδράσεις που γίνονται σε διάφορες θερμοκρασίες (4.3.)

καταγράφονται και παρατηρούνται από Μηχανολόγο. Ο χειριστής μετράει το οξυγόνο, το θείο, το μονοξειδίο του άνθρακα, μέσω μηχανημάτων προκειμένου να ελέγξει εάν έχει την κατάλληλη καύση και εάν είναι μέσα στα περιβαλλοντικά όρια που λειτουργεί το εργοστάσιο. Λαμβάνει δείγμα από το κάρβουνο για να ελέγξει την ποιότητά του. Επίσης λαμβάνει δείγμα τσιμέντου ανά μία ώρα και πραγματοποιεί διάφορους ελέγχους (προσθέτει νερό και παρατηρεί σε πόση ώρα στεγνώνει ή πραγματοποιεί μέτρηση αντοχής) για να ελέγξει την ποιότητα του και εάν κινείται στα πρότυπα του εργοστασίου. Το τελευταίο μέρος καταλαμβάνει χώρο στο κομμάτι του ποιοτικού ελέγχου. (Μαραγκός Γ., 1995)

β) Συντήρηση

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στην λειτουργία της τσιμεντοβιομηχανίας είναι και αυτό της συντήρησης. Σκοπός της συντήρησης είναι να προλαβαίνει την ζημιά ώστε να μην βρεθεί κάποια μονάδα του εργοστασίου εκτός λειτουργίας όπου το κόστος παραγωγής θα ανέβει πολύ ψηλά. Όλες οι μονάδες παραγωγής έχουν μηχανολογικά εξαρτήματα και έτσι η συντήρηση βρίσκει εφαρμογή καθ' όλο το μήκος της. Ο Μηχανολόγος κρατάει αρχείο συντήρησης των μηχανημάτων και γνωρίζει πότε πρέπει να συντηρηθεί ένα εξάρτημα ή και να αντικατασταθεί. Για παράδειγμα στους θραυστήρες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους (2.3) παρατηρεί την κατάσταση των σταγόνων, των σφυριών και όταν έχει κλείσει ο κύκλος ζωής τους προβαίνει στην αντικατάστασή τους.

Ακόμα ο Μηχανολόγος επιβλέπει τα διάκενα που έχουν τα ρουλμάν (με βάση την διάρκεια ζωής τους από τον κατασκευαστή), ελέγχει τις τσιμούχες για διαρροή και προβαίνει στην αντικατάστασή τους όταν χρειάζεται.

Στην περιστροφική κάμινο ελέγχει εάν η επένδυση (4.6.4.) είναι σε καλή κατάσταση και ανα χρονικά διαστήματα προβαίνει σε αντικαταστάσεις των πυρίμαχων υλικών. Τέλος ελέγχει εάν τα σακόφιλτρα ή ηλεκτρόφιλτρα λειτουργούν καλά και τα αντικαθιστά εάν χρειαστεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γαζιδέλλη Β., Οφέλη από τη χρήση εναλλακτικών υλικών και καυσίμων στην παραγωγή του τσιμέντου, Πρακτικά ημερίδας «Εναλλακτικές πρώτες ύλες και καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου», ΤΕΕ, Αθήνα, 2007.
2. Κολοβός Κ., Βελτίωση εψησιμότητας μείγματος πρώτων υλών παραγωγής κλίνκερ, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2003.
3. Κολοβός Κ. Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., Η χρήση δευτερογενών υλικών και καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου, Τεχνικά Χρονικά, Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, V, 26,1-2,7,2006.
4. Κολοβός Κ., Η χρήση δευτερογενών υλικών και καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου, Πρακτικά ημερίδας «Εναλλακτικές πρώτες ύλες και καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου», ΤΕΕ, Αθήνα, 2007.
5. Λαμπρόπουλος Δ., Διατάξεις αποκονίωσης με έμφαση στη βιομηχανία τσιμέντου, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 1996.
6. Μαγκανάρη Κ., Σύνθετα τσιμέντα με δύο τύπους ελληνικών Ιπταμένων Τεφρών, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 2002.
7. Μαραγκός Γ., Σύγχρονες τάσεις στις διατάξεις έψησης της βιομηχανίας τσιμέντου, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 1995.
8. Παπαγεωργίου Δ., Θεολόγος Φ., Τέας Χ., Χανιωτάκης Ε., Εναλλακτικά καύσιμα στην παραγωγή τσιμέντου, Πρακτικά ημερίδας «Εναλλακτικές πρώτες ύλες και καύσιμα στη βιομηχανία τσιμέντου», ΤΕΕ, Αθήνα, 2007.
9. Παπαϊωάννου Ν., Σύνθετα τσιμέντα Portland, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 1998.
10. Τριανταφύλλου Α., Δομικά Υλικά, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2005.
11. Τσίμας Μ., Παραγωγή και ιδιότητες βελιτικών τσιμέντων, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.
12. Boynton, R.S., Chemistry and Technology of Lime and Limestone, John Wiley and Sons, New York, 1980.

13. <http://www.hcia.gr>, Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος.
14. Makashev, S.D., Effect of Raw Materials Physicochemical Properties on Reactivity of Raw Mix and Clinker Mineralogical Processes, 6th ICCG, Moscow, Section 1-4,1976.
15. Peray K. E., Waddell J. J., The rotary cement kiln, Chemical publishing Co., New York, 1972.