



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Πειραματική διερεύνηση της αντοχής θλίψης και
στοχαστική προσομοίωση της θραύσης κλίνκερ τσιμέντου
σε κυλινδρόπρες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΒΟΥΤΣΙΝΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Δρ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΣΠΙΤΑΣ

ΧΑΝΙΑ, Μάιος 2009

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό ωφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας και Δάσκαλο μου **Δρ. Βασίλειο Σπιτά**, για την αμέριστη βοήθεια του σε κάθε φάση της δημιουργίας της, αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοδήγησή του σε θέματα, κατά τη γνώμη μου ουσιαστικότερα και μεγαλύτερα αυτού της εκπόνησης μιας διπλωματικής, τα οποία με βοήθησαν να αντιληφθώ καλύτερα το ρόλο και τη θέση του Μηχανικού στην αγορά και στην κοινωνία.

Παράλληλα θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην εταιρεία **Ινστιτούτο Μηχανικής Υλικών και Γεωδομών Α.Ε.** στην Πεντέλη Αττικής που παραχώρησε το εργαστήριο δοκιμών της για την εκτέλεση των πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης καθώς και τον κ. **Γεώργιο Αθανάσουλα**, μέτοχο της κατασκευαστικής εταιρείας **Ε.ΜΕ.Κ. Α.Ε.**, για την πάντα πρόθυμη και άμεση βοήθεια του σε ό,τι και αν χρειάστηκα, στο δύσκολο κομμάτι της επικοινωνίας με τις τσιμεντοβιομηχανίες και τη λήψη των δειγμάτων κλίνκερ.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΚΕΦΑΛΑΙΑ

Κεφάλαιο 1ο: Η ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Κεφάλαιο 2ο: Η ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Κεφάλαιο 3ο: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Κεφάλαιο 4ο: ΚΥΛΙΝΔΡΟΠΡΕΣΑ

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Κεφάλαιο 5ο: ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Κεφάλαιο 6ο: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ & ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Κεφάλαιο 7ο: ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΜΟΝΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Κεφάλαιο 8ο: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΟΚΚΩΝ

Κεφάλαιο 9ο: ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΕΡΕΩΝ

Κεφάλαιο 10ο: ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ ΓΚΟΦΡΕΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Κεφάλαιο 11ο: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κεφάλαιο 12ο: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Φωτογραφικό υλικό ταξινομημένων κόκκων κλίνκερ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο :

1.1	Εισαγωγή	01
1.2	Χρήσεις τσιμέντου	01
1.3	Παρασκευή τσιμέντου	02
1.3.1	Πρώτες ύλες	02
1.3.2	Μέθοδοι παρασκευής	03
1.4	Πρότυπα και τύποι τσιμέντου	04
1.4.1	Ευρωπαϊκά Πρότυπα	04
1.4.2	Προβλεπόμενοι τύποι τσιμέντου	05
1.5	Ξηρή καμίνευση με προθέρμανση και προπύρωση εναιωρήματος	07
1.5.1	Λατόμευση και μεταφορά πρώτων υλών	07
1.5.2	Πρωτοβάθμια θραύση πρώτων υλών	08
1.5.3	Προ-ομοιογένεια πρώτων υλών - Μύλοι συνάλεσης	08
1.5.4	Ομοιογενοποίηση φαρίνας - Αποθήκευση	08
1.5.5	Προθέρμανση φαρίνας	09
1.5.6	Έψηση φαρίνας	09
1.5.7	Διατάξεις ψύξης του κλίνκερ	11
1.5.8	Αποθήκευση κλίνκερ	12
1.5.9	Ημιτελής άλεση του κλίνκερ	12
1.5.10	Μύλοι τσιμέντου	13
1.5.11	Συσκευασία και μεταφορά προϊόντος	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο :

2.1	Εισαγωγή	15
2.2	Ιστορική αναδρομή	15
2.3	Ζήτηση τσιμέντου	16
2.3.1	Παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση	16
2.3.2	Καταναλωτές τσιμέντου	17
2.4	Προσφορά τσιμέντου	18
2.4.1	Διάρθρωση εσωτερικής αγοράς	18
2.4.2	Διάρθρωση παγκόσμιας αγοράς	19
2.5	Μεγάλες ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες	20
2.6	Η αγορά του τσιμέντου	22
2.6.1	Γενικά	22
2.6.2	Υφιστάμενες αγορές	23
2.7	Εξέλιξη εγχώριας αγοράς	23
2.8	Εξέλιξη εισαγωγών-εξαγωγών	24
2.9	Παγκόσμια αγορά τσιμέντου και αναπτυξιακές τάσεις	25
2.10	Συμβολή στην ανάπτυξη	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο :

3.1	Εισαγωγή	29
3.2	Κυλινδρόπρεσες σε κυκλώματα αερο-διαχωριστών	29
3.2.1	Γενικά στοιχεία	29
3.2.2	Κυκλώματα ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ	30

3.2.3 Κυκλώματα προ-άλεσης πρώτων υλών	32
3.3 Μονάδες μηχανικής διαλογής μεγέθους	33
3.4 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα	34
3.4.1 Ποιοτικά αποτελέσματα	35
3.4.2 Ποσοτικά αποτελέσματα	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο :

4.1 Εισαγωγή - Ιστορική αναδρομή	38
4.2 Εφαρμογές στη βιομηχανία	39
4.3 Βασικές αρχές λειτουργίας	40
4.4 Λειτουργικά υποσυστήματα	40
4.4.1 Σύστημα τροφοδοσίας	40
4.4.2 Σύστημα περιστρεφόμενων κυλίνδρων	43
4.4.2.1 Προστατευτικές επενδύσεις	44
4.4.3 Μεταλλικά πλαίσια στήριξης των κυλίνδρων	47
4.4.4 Αρθρωτό σώμα μηχανής	48
4.4.5 Έδρανα με στοιχεία κυλίσεως	50
4.4.5.1 Σύστημα λίπανσης εδράνων	50
4.4.5.2 Ψύξη εδράνων	51
4.4.6 Σύστημα ψύξης των κυλίνδρων	52
4.4.7 Υδραυλικό σύστημα ρύθμισης της απόστασης των κυλίνδρων	53
4.4.8 Διατάξεις μεταφοράς ισχύος και μετάδοσης κίνησης στους κυλίνδρους	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο :

5.1 Εισαγωγή	58
5.2 Σταθμοί δειγματοληψίας	58
5.2.1 Τόποι δειγματοληψίας	58
5.2.2 Προσδιορισμός των σταθμών δειγματοληψίας	58
5.2.3 Σταθμοί δειγματοληψίας	59
5.3 Διαδικασία συλλογής και αποθήκευσης δειγμάτων	59
5.4 Μέγεθος δείγματος	60
5.5 Διαλογή δοκιμίων	60
5.6 Μέγεθος κλάσματος δοκιμίων	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο :

6.1 Εισαγωγή	62
6.2 Θεωρητικό υπόβαθρο σχηματικής ταξινόμησης	62
6.2.1 Γενικά	62
6.2.2 Κανόνες των τριών αξόνων κατά Griffiths	63
6.2.3 Διάγραμμα ταξινόμησης Zingg	64
6.3 Εργαστηριακές μετρήσεις	64
6.3.1 Απώλειες σε δοκίμια εξαιτίας φυσικών παραγόντων	64
6.3.2 Μετρήσεις	65
6.3.3 Αλγόριθμος σχηματικής ταξινόμησης	66
6.3.4 Κωδικοποίηση	66
6.3.5 Αποθήκευση ταξινομημένων δοκιμίων	67
6.4 Αποτέλεσμα σχηματικής ταξινόμησης	68
6.5 Κοκκομετρική διαβάθμιση δείγματος δοκιμίων	69

6.5.1 Τάξεις κοκκομετρίας.....	69
6.5.2 Αποτέλεσμα κοκκομετρικής ταξινόμησης.....	70
6.6 Γενικές παρατηρήσεις.....	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο :

7.1 Εισαγωγή	73
7.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός	73
7.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής δοκιμών	73
7.2.2 Πλάκες θλίψης	74
7.3 Τεχνικές δοκιμές στο εργαστήριο	76
7.3.1 Εισαγωγή	76
7.3.2 Πειραματική διαδικασία	76
7.4 Αποτελέσματα - Παρατηρήσεις.....	78
7.4.1 Γενικά.....	78
7.4.2 Θλιπτική αντοχή ρηγμάτωσης δοκιμίων.....	79
7.4.3 Θλιπτικά φορτία γκοφρετοποίησης	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο :

8.1 Εισαγωγή	84
8.2 Η φόρτιση του στρώματος υλικού στους κυλίνδρους του σπαστήρα.....	84
8.3 Κρίσιμη γωνία εμπλοκής	86
8.3.1 Υπολογισμός της σχέσης για την κρίσιμη γωνία εμπλοκής	86
8.4 Συμπύεση κόκκων.....	88
8.4.1 Υπολογισμός της σχέσης συμπίεσης του κόκκου.....	89
8.5 Υπολογισμός της μαθηματικής σχέσης μείωσης της ακτίνας του κόκκου.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο :

9.1 Εισαγωγή	92
9.2 Στατιστικές παράμετροι δείγματος	92
9.2.1 Γενικά.....	92
9.2.2 Δειγματική μέση τιμή.....	92
9.2.3 Δειγματικό εύρος της κοκκομετρίας του μελετούμενου δείγματος.....	93
9.2.4 Μεταβλητότητα και τυπική απόκλιση δείγματος.....	93
9.3 Γραφική αποτύπωση δεδομένων.....	94
9.4 Γραφικός έλεγχος για τον προσδιορισμό θεωρητικής κατανομής.....	95
9.5 Προσαρμογή κατανομής - Μέθοδος μεγίστης πιθανοφάνειας	96
9.5.1 Γενικά.....	96
9.6 Κατασκευή γεννήτριας τυχαίων αριθμών.....	100
9.6.1 Γενικά.....	100
9.6.1 Εφαρμογή της μεθόδου του αντίστροφου μετασχηματισμού.....	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο :

10.1 Εισαγωγή	102
10.2 Ενέργεια και στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης	102
10.2.1 Ορισμός της ενέργειας γκοφρετοποίησης.....	102
10.2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο	102
10.2.3 Ορισμός της στρεπτικής ροπής γκοφρετοποίησης	104
10.3 Πειραματικός προσδιορισμός της ενέργειας γκοφρετοποίησης	104

10.3.1 Γενικά.....	104
10.3.2 Πειραματική διάμετρος δοκιμίων και πειραματική γωνία εμπλοκής.....	104
10.3.3 Αναγωγή των πειραματικών δεδομένων στο μοντέλο των κυλίνδρων.....	106
10.3.4 Υπολογισμός της πειραματικής ενέργειας γκοφρετοποίησης	109
10.4 Μέση ενέργεια γκοφρετοποίησης ανά κοκκομετρική τάξη.....	110
10.5 Μέση ενέργεια γκοφρετοποίησης του <40mm κοκκομετρικού κλάσματος.....	112
10.6 Υπολογισμός των στρεπτικών ροπών γκοφρετοποίησης	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^ο :

11.1 Εισαγωγή	116
11.2 Γραμμές συμπίεσης.....	116
11.3 Μέση κοκκομετρία γραμμής και μέσος χρόνος συμπίεσης.....	117
11.4 Μοντέλο προσομοίωσης.....	117
11.4.1 Δεδομένα προσομοίωσης.....	117
11.4.2 Δημιουργία μήτρας γραμμών συμπίεσης.....	118
11.4.3 Κατασκευή μήτρας γωνιών εμπλοκής	119
11.4.4 Κατασκευή μήτρας μέσων ενεργειών γκοφρετοποίησης	120
11.4.5 Πίνακας μέσων στρεπτικών ροπών γκοφρετοποίησης	121
11.5 Αποτελέσματα.....	122
11.5.1 Υπολογισμός της μέσης στρεπτικής ροπής	122
11.5.2 Υπολογισμός της μέσης αναγκαίας ισχύος.....	123
11.5.3 Γραφήματα.....	124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12^ο :

12.1 Γενικά συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας.....	127
12.2 Παρατηρήσεις	127

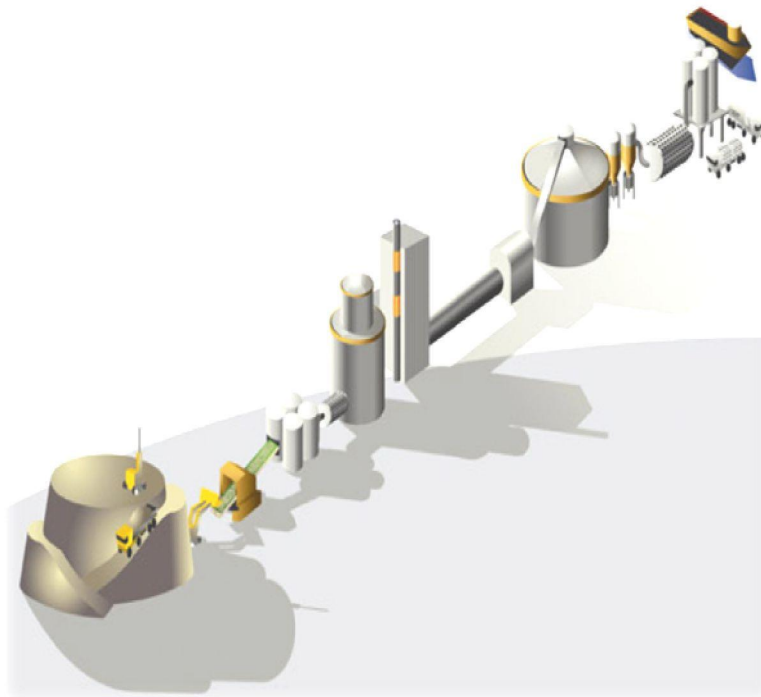
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Φωτογραφικό υλικό ταξινομημένων κόκκων κλίνκερ.....

Βιβλιογραφία	136
---------------------------	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1ο

Η παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου



Εικόνα: Γραμμή παραγωγής του τσιμέντου από τον ιστότοπο της εταιρείας *Χάλυψ*

1.1 Εισαγωγή

- **Τσιμέντο** καλείται η τεχνητή λεπτόκοκκη κονία, πρασινότεφρου χρώματος (λόγω των οξειδίων Fe_2O_3 και MnO), η οποία παρασκευάζεται με λειοτρίβηση του κλίνκερ.
- **Κλίνκερ τσιμέντου (cement clinker)** ονομάζεται διεθνώς το προϊόν που προκύπτει από την όπτηση μείγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων.



Εικόνα 1.1: Σκόνη τσιμέντου και κόκκοι κλίνκερ

Το τσιμέντο που σήμερα αποτελεί το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο υλικό στη δομική βιομηχανία, ανήκει στην κατηγορία των **υδραυλικών υλικών**. Τα υδραυλικά υλικά σε λεπτόκοκκο διαμερισμό είναι ικανά να πήζουν και να σκληραίνουν μετά από ανάμειξη με νερό δίνοντας ένα στερεό προϊόν. Η ανάμειξη της τσιμεντόσκονης με νερό δίνει αρχικά ένα πολτό (τσιμεντόπαστα), πλαστικό και κατεργάσιμο, ο οποίος κατά τη διάρκεια της πήξης χάνει σταδιακά την πλαστικότητά του, γίνεται πιο συνεκτικός και αναπτύσσει αντοχές.

1.2 Χρήσεις τσιμέντου

Οι έντονες υδραυλικές ιδιότητες και οι υψηλές αντοχές που παρουσιάζει το τσιμέντο, το έχουν κατατάξει σε μια από τις σημαντικότερες **συνδετικές ύλες (κονίες)** του κατασκευαστικού κλάδου. Από το τσιμέντο παρασκευάζονται **κονιάματα** (μείγμα τσιμέντου, άμμου και νερού) και **σκυροδέματα** (μείγμα τσιμέντου, άμμου, αδρανών και νερού), τα οποία χρησιμοποιούνται σε κατασκευές τόσο στο περιβάλλον (γέφυρες, φράγματα, κτίρια, οδοστρώματα κ.α.) όσο και μέσα στο νερό. Επιπλέον από το τσιμέντο κατασκευάζονται **τσιμεντόπλακες**, **τσιμεντοσωλήνες**, **τσιμεντοκολώνες**, **τσιμεντόλιθοι** και άλλα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε διάφορα έργα, καθώς και **κυβόλιθοι (blocks)** για κατασκευές μέσα στη θάλασσα.



Εικόνα 1.2: Προϊόντα τσιμέντου

Παράλληλα το τσιμέντο χρησιμοποιείται και ως προστατευτική επένδυση σε μεταλλικές επιφάνειες. Ειδικότερα λόγω της ικανότητας του να προσκολλάται στέρεα στο σίδηρο, μεταλλικοί λέβητες, σωλήνες και άλλες μεταλλικές δομές, καλύπτονται με στρώμα τσιμέντου, το οποίο τα προστατεύει από την οξείδωση.

Τέλος, μια σπουδαία εξέλιξη για τον κατασκευαστικό κλάδο αποτέλεσε το **οπλισμένο σκυρόδεμα**, εφαρμογή κατά την οποία συνδυάζεται η μεγάλη σχετικά αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη με την αντοχή σε εφελκυσμό του χάλυβα, που ενσωματώνεται μέσα στη μάζα του σκυροδέματος σε κατάλληλες θέσεις υπό μορφή κυκλικών ράβδων ή πλέγματος. Τα δύο δομικά στοιχεία, έχοντας τον ίδιο συντελεστή θερμικής διαστολής, λειτουργούν ως ένα ενιαίο υλικό με το οποίο μπορούν να δημιουργηθούν περίπλοκες και μεγάλου ύψους και όγκου κατασκευές.

1.3 Παρασκευή τσιμέντου

1.3.1 Πρώτες ύλες

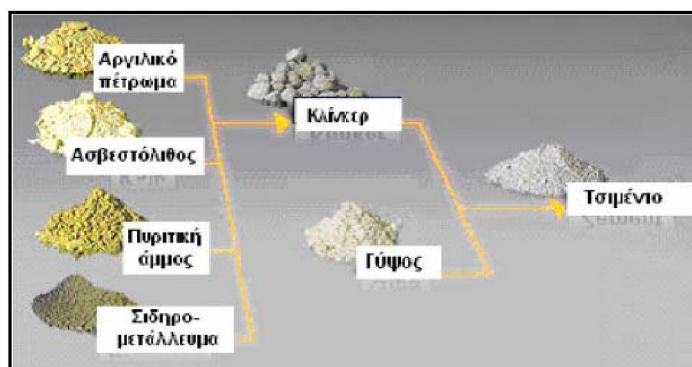
Το τσιμέντο είναι ένα μείγμα οξειδίων του ασβεστίου, του πυριτίου, του αργίλου και του σιδήρου σε ποσοστό 90% του συνολικού του βάρους, ενώ το υπόλοιπο μέρος αποτελείται από γύψο (έως 5%) και μικρές ποσότητες αλάτων του μαγνησίου, του καλίου, του νατρίου και άλλων στοιχείων.

Πρώτες ύλες οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου είναι:

1. Ορυκτά πλούσια σε ανθρακικό ασβέστιο όπως ο ασβεστόλιθος, οι μάργες και η κιμωλία
2. Ορυκτά πλούσια σε οξείδια του πυριτίου όπως η άργιλος
3. Η αλουμίνα και ο σίδηρος
4. Η σκουριά υψικαμίνων και η ιπτάμενη τέφρα
5. Ο βωξίτης
6. Η φυσική ή η τεχνητή ποξολάνη
7. Η πυριτική παιπάλη
8. Ο μπεντονίτης
9. Ο γύψος

Η βασική χημική διεργασία για την παρασκευή του τσιμέντου είναι καταρχήν η θερμική διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) σε οξείδια του ασβεστίου (CaO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) στους 900 °C. Αυτή ακολουθείται από τη διαδικασία **κλινκεροποίησης** κατά την οποία, το οξείδιο του ασβεστίου αντιδρά με τα οξείδια του πυριτίου, την αλουμίνα και τα οξείδια του σιδήρου, για να σχηματίσει ασβεστοπυριτικές και ασβεσταργλικές ενώσεις στους 1400-1500°C.

Το **κλίνκερ** που παράγεται, συναλέθεται με γύψο και άλλα πρόσθετα υλικά όπως οι ποξολάνες, για να δώσει την πολύ λεπτή σκόνη τσιμέντου. Ωστόσο για να έχει το τελικό προϊόν τις επιθυμητές ιδιότητες, ανεξάρτητα από τις πρώτες ύλες που θα χρησιμοποιηθούν, θα πρέπει να καθοριστούν σαφώς οι αναλογίες ανάμειξής τους.



Εικόνα 1.3: Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου

1.3.2 Μέθοδοι παρασκευής

Η παραγωγή του **κλίνκερ** πραγματοποιείται σε περιστροφικές καμίνους, οι οποίες μπορεί να αποτελούν τμήμα ενός μεγάλου μήκους συστήματος καμίνευσης υγρής, ξηρής, ημιυγρής ή ημιξηρής διεργασίας:

- Στην ξηρή μέθοδο, οι πρώτες ύλες αλέθονται και ξηραίνονται, σχηματίζοντας ένα λεπτόκοκκο μείγμα ορυκτών το οποίο καλείται **φαρίνα**. Η φαρίνα στη συνέχεια οδηγείται σε προθερμαντές και έπειτα σε περιστροφικούς κλιβάνους όπτησης, στους οποίους συντελείται η διαδικασία της **κλινκεροποίησης**.
- Στην ημιξηρή μέθοδο, η φαρίνα διαβρέχεται με νερό και σε μορφή σβώλων (συσφαιρωμάτων) οδηγείται σε συνήθως έσχαρες διατάξεις προθερμαντών και κατόπιν εισάγεται στον κλίβανο.
- Στην υγρή μέθοδο, οι αλεσμένες πρώτες ύλες διαλύονται σε νερό για να σχηματίσουν ένα πολτό, ο οποίος στη συνέχεια οδηγείται στον κλίβανο.
- Τέλος στην ημιυγρή μέθοδο, ο πολτός πρώτα αφυδατώνεται σε φιλτρόπρεσες και έπειτα το στερεό υπόλειμμα οδηγείται σε προθερμαντήρα και σε ξηραντήρα για την παραγωγή της φαρίνας, η οποία στη συνέχεια τροφοδοτείται στον κλίβανο όπτησης.

Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από την κατάσταση των διαθέσιμων πρώτων υλών (ξηρές ή υγρές). Οι μονάδες που χρησιμοποιούν την υγρή μέθοδο έχουν συνήθως πρόσβαση μόνο σε υγρές πρώτες ύλες όπως για παράδειγμα οι τσιμεντοβιομηχανίες στη Δανία ή το Ηνωμένο Βασίλειο. Ωστόσο ως βέλτιστη διαθέσιμη τεχνική σήμερα, για την παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου, θεωρείται η **ξηρή καμίνευση με προθέρμανση και προπύρωση εναιωρήματος σε πολλά στάδια** (Παράγραφος 1.5).

Προς το παρόν ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής τσιμέντου βασίζεται στην υγρή μέθοδο, αν και πρόκειται για μια ιδιαίτερα ενεργοβόρα διαδικασία. Ωστόσο στην Ευρώπη περίπου το 78% της παραγωγής τσιμέντου προέρχεται από καμίνους ξηρής διεργασίας, το 16% της παραγωγής καλύπτεται από καμίνους ημιυγρής και ημιξηρής διεργασίας, ενώ το υπόλοιπο 6% προέρχεται από καμίνους υγρής διεργασίας. Οι ενεργειακές δαπάνες, ανά κιλό παραγόμενου κλίνκερ, στις δύο συχνότερα εφαρμοζόμενες μεθόδους παρασκευής του τσιμέντου (ξηρή και υγρή), παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.1** που ακολουθεί:

Μέθοδος παρασκευής	Κατανάλωση θερμότητας (kcal/kg clinker)
Υγρή μέθοδος	1400-1500
Ξηρή μέθοδος	1100

Πίνακας 1.1: Ενεργειακές δαπάνες στην υγρή & ξηρή μέθοδο παρασκευής του clinker

1.4 Πρότυπα και τύποι τσιμέντου

1.4.1 Ευρωπαϊκά Πρότυπα

Κάθε χώρα παρασκευάζει τσιμέντο χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Συνεπώς ανάλογα με τις υπάρχουσες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντου όπως: το καθαρό ή αμιγές, το τσιμέντο με ποζολάνη, με ιπτάμενη τέφρα (πυριτική ή ασβεστολιθική), με σκωρία υψικαμίνου, με πυριτική παιπάλη, με ασβεστόλιθο ή σχιστόλιθο κ.τ.λ.

Ωστόσο το τσιμέντο ως υλικό που διέπεται από την **CPD 89/106** (*Construction Products Directive 89/106*) οδηγία, όπως και άλλα δομικά υλικά, θα πρέπει να πληρεί ορισμένες ελάχιστες προδιαγραφές, όσον αφορά τις ιδιότητές του και τη σταθερότητα παραγωγής του. Στην κατεύθυνση αυτή, σύμφωνα με απόφαση της ΕΕ¹, από 01/04/01 τα τσιμέντα που κυκλοφορούν σε όλες τις χώρες κράτη μέλη θα πρέπει να είναι πιστοποιημένα να φέρουν σήμα CE και να είναι σύμφωνα με τα αναθεωρημένα **Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN197-1** και **EN197-2**. Στη σύνταξη των προτύπων συμπεριλήφθηκαν και κωδικοποιήθηκαν όλα τα κοινής αποδοχής και ευρείας χρήσης τσιμέντα που παράγονται στις χώρες-μέλη της Ε.Ε., με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοινής ορολογίας για όλους τους μελετητές, χρήστες και κατασκευαστές δομικών έργων της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

- **EN197-1: Τσιμέντο Μέρος-1:** «Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα»
- **EN197-2: Τσιμέντο Μέρος-2:** «Αξιολόγηση συμμόρφωσης μονάδων παραγωγής»

Ο Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) και ειδικότερα η επιτροπή **TE-51 «Τσιμέντο και Δομικοί Ασβεστοί»**, υιοθετώντας τις παραπάνω εξελίξεις προχώρησαν στην έκδοση των αντίστοιχων ελληνικών προτύπων **ΕΛΟΤ EN197-1** και **ΕΛΟΤ EN197-2**, τα οποία είναι διαθέσιμα από τα τέλη Οκτωβρίου του 2000 και τέθηκαν σε εφαρμογή από 01/04/01.

¹ Η απόφαση είναι αποτέλεσμα της εντολής **M114** της Ευρωπαϊκής Κοινότητας προς την **CEN** και της Ευρωπαϊκής Οδηγίας Δομικών Κατασκευών **CPD 89/106**.

1.4.2 Προβλεπόμενοι τύποι τσιμέντου

Για την παραγωγή τσιμέντου συγκεκριμένου τύπου, τέτοιου ώστε να παρουσιάζει την προδιαγραφόμενη συμπεριφορά κατά την ενυδάτωση του και να προσδίδει κατάλληλες ιδιότητες στο σκυρόδεμα για το οποίο χρησιμοποιείται, είναι απαραίτητη η παραγωγή κλίνκερ με ορισμένα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξαρτώνται από τις πρώτες ύλες που επιλέγονται, από την αναλογία τους στο μείγμα (φαρίνα) και από την πυρομεταλλουργική κατεργασία στην οποία υποβάλλονται. Το είδος και το ποσοστό των πρώτων υλών που προστίθενται κατά την παρασκευή του τσιμέντου, σύμφωνα με το πρότυπο **EN 197-1**, καθορίζουν τους 5 *Κύριους Τύπους* τσιμέντου και τα 27 *Προβλεπόμενα Προϊόντα* τους, όπως αυτά παρουσιάζονται, αναλυτικά στον **Πίνακα 1.4**. Οι 5 *Κύριοι Τύποι* τσιμέντου, σύμφωνα με το πρότυπο **EN 197-1**, είναι οι παρακάτω:

CEM I	Τσιμέντο <i>ΠΟΡΤΛΑΝΤ</i>
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο <i>ΠΟΡΤΛΑΝΤ</i>
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο

Πίνακας 1.2: Κύριοι τύποι τσιμέντου κατά EN 197-1

Επιπλέον το πρότυπο **EN 197-1** προβλέπει και 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή τους σε θλίψη, σε κονίαμα πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής ². Το κατώτερο όριο αντοχής των 28 ημερών χαρακτηρίζει την κάθε κατηγορία (**Πίνακα 1.3**).

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

Πίνακας 1.3: Ελάχιστα όρια αντοχής σε θλίψη κατά ΕΛΟΤ.

² Σύμφωνα με το πρότυπο: **ΕΛΟΤ EN 196-1 «Μέθοδοι Δοκιμών Τσιμέντου – Μέρος 1: Προσδιορισμός αντοχών»**.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ
ΚΑΤΑ CEM

Πίνακας 2: Αναλυτικός πίνακας των τύπων τσιμέντου* που θα κυκλοφορούν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στις χώρες που ακολουθούν τα πρότυπα CEN.													
Κύριοι τύποι	Ονομασία των 27 προϊόντων (τύποι κοινών τσιμέντων)	Κύρια στοιχεία										Δευτερεύοντα	
		Κλάση	Σκωρία υψικάμ- μνου	Πυρρική πατεμά- λη	Ποζολάνη		Φυσική ψημένη	Ποζολάνες τέφρες		Ψημένος σχιστόλιθος	Αβρεστό- λιθος		
					Φυσική	P		Q	V				W
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με Σκωρία Υψικάμμου	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με πυρρική πατεμάλη	CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με πυρρική πατεμάλη	CEM III/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ποζολάνη	CEM II/A-P	80-94	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ποζολάνη	CEM II/B-P	65-79	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ποζολάνη	CEM III/A-Q	80-94	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ποζολάνη	CEM II/B-Q	65-79	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ποζολάνη	CEM III/A-V	80-94	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με υπόμεινη τέφρα	CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με υπόμεινη τέφρα	CEM III/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με υπόμεινη τέφρα	CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με υπόμεινη τέφρα	CEM III/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με υπόμεινη τέφρα	CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM III/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
CEM III	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM III/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM III/A-M	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM II/B-M	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM II/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM V	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM IV/A	65-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM IV/B	45-64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM VI	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM V/A	40-64	18-30	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με αβρεστόλιθο	CEM V/B	20-30	31-50	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5

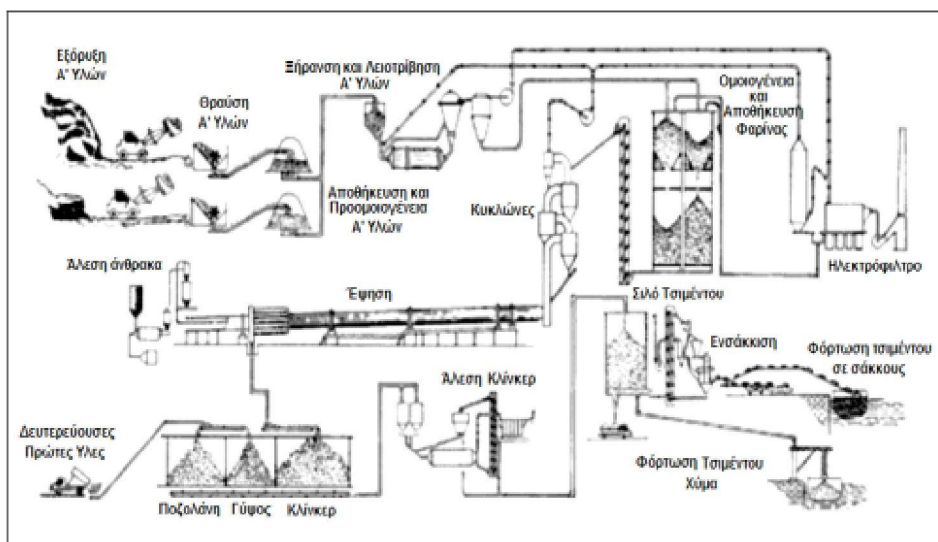
α) Οι τιμές του μίκρου αναφέρονται στο σύνολο του υλικού και δευτερεύοντων συστατικών

β) Το ποσοστό της πυρρικής πατεμάλης περιορίζεται στο 10%

γ) Στα τσιμέντα Πόρτλαντ-σύνθετα, CEM III/A-M και CEM II/B-M στα ποζολανικά τσιμέντα CEM IV/A και CEM IV/B και στα σύνθετα τσιμέντα CEM V/A και CEM V/B τα κύρια συστατικά δέχονται πρόσθετα με άλλα υλικά που αναφέρονται στον πίνακα (για παράδειγμα, υλικά γενόσημα, κ.λπ.)

Πίνακας 1.4
(Πηγή: Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος)

1.5 Ξηρή καμίνευση με προθέρμανση και προπύρωση εναιωρήματος



Εικόνα 1.4: Διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου

1.5.1 Λατόμευση και μεταφορά πρώτων υλών

Οι πρώτες ύλες όπως ο ασβεστόλιθος, η μάργα, η κιμωλία, η άμμος, η μίκα και οι άστριοι, εξορύσσονται από επιφανειακά λατομεία τα οποία συνήθως βρίσκονται κοντά στις εγκαταστάσεις των τσιμεντοβιομηχανιών. Δευτερεύουσες πρώτες ύλες όπως ο βωξίτης, τα σιδηρούχα ορυκτά, οι σκωρίες υψικαμίνων, οι τέφρες, οι ποζολάνες και άλλα, μεταφέρονται από αλλού, συνήθως ως παραπροϊόντα άλλων βιομηχανιών. Ο ασβεστόλιθος, η μάργα και η κιμωλία αποτελούν την πηγή του, αναγκαίου για την παρασκευή του τσιμέντου, ανθρακικού ασβεστίου, ενώ η μίκα, οι άστριοι, η άμμος, η άργιλος, ο σχιστόλιθος και κάποια σιδηρομεταλλεύματα, την πηγή των οξειδίων του πυριτίου, του σιδήρου και της αλουμίνης.

Η μεταφορά όλων των υλικών προς τις μονάδες παραγωγής πραγματοποιείται, είτε με μεγάλες μεταφορικές ταινίες (*ταινιόδρομους*) που συνδέουν απευθείας τους χώρους εξόρυξης με τις εγκαταστάσεις των τσιμεντοβιομηχανιών είτε με φορτηγά αυτοκίνητα, τρένα ή πλοία. Γενικά, εξαιτίας του γεγονότος ότι η τιμή (*αξία*) ανά χιλιόγραμμα βάρους των πρώτων υλών του τσιμέντου είναι πολύ χαμηλή, πράγμα που τις καθιστά πολύ ακριβές για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις, οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου χωροθετούνται πολύ κοντά στις πηγές των πρώτων υλών.

1.5.2 Πρωτοβάθμια θραύση πρώτων υλών

Σιαγωνοθραυστήρες, σφυροθραυστήρες ή θραυστήρες με κώνο χρησιμοποιούνται για την πρωτοβάθμια θραύση των πρώτων υλών σε τεμάχια συνήθως μικρότερα των 30mm. Η διαδικασία αυτή συντελείται, είτε απευθείας στο χώρο εξόρυξης των πετρωμάτων είτε μετέπειτα σε ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις της τσιμεντοβιομηχανίας. Τα θραυσμένα υλικά μεταφέρονται και αποθηκεύονται χωριστά κατά κατηγορία, είτε σε κλειστές αποθήκες (*κυρίως σιλό*)

είτε στον περιβάλλοντα χώρο των εγκαταστάσεων (ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες) και από εκεί οδεύουν προς τους μύλους συνάλεσης (μύλοι φαρίνας) για περαιτέρω επεξεργασία. Η πρωτοβάθμια θραύση επιταχύνει τη διαδικασία λειοτρίβησης των πρώτων υλών στους μύλους συνάλεσης, γεγονός που επιφέρει σημαντικά οφέλη, τόσο στην κατεύθυνση του περιορισμού των ενεργειακών δαπανών στο στάδιο αυτό όσο και στην αύξηση της παραγωγικότητας του.

1.5.3 Προ-ομοιογένεια πρώτων υλών – Μύλοι συνάλεσης

Οι πρώτες ύλες μετά την πρωτοβάθμια θραύση, οδηγούνται κατά είδος (σε αυστηρά προκαθορισμένη και ελεγχόμενη αναλογία) με ζυγιστικούς (συνήθως) ταινιόδρομους σε οριζόντιους ή κατακόρυφους μύλους συνάλεσης (μύλοι φαρίνας), στους οποίους αλέθονται μέχρι την παραγωγή ενός λεπτόκοκκου και ομοιογενούς μείγματος ορυκτών (φαρίνα). Οι οριζόντιοι μύλοι συνάλεσης είναι ογκώδεις, κυλινδρικού σχήματος κατασκευές, με ισχυρή εσωτερική μεταλλική θωράκιση, εντός των οποίων τροφοδοτείται το μείγμα ορυκτών (ασβεστόλιθος, αργιλικά και χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης) μαζί με μεγάλες ποσότητες σφαιρικών χαλύβδινων αλεστικών σωμάτων. Κατά την περιστροφική κίνηση των μύλων, οι σφαίρες κονιοποιούν τις προθραυσμένες πρώτες ύλες σε κόκκους μέσης διαμέτρου. Οι κατακόρυφοι μύλοι κονιορτοποιούν το υλικό συμπιέζοντας το με κωνικά στοιχεία, σε χαλύβδινη περιστρεφόμενη τράπεζα. Κατά τη συνάλεση, πραγματοποιείται και η ξήρανση των υλικών με θερμά αέρια τα οποία εκλύονται από τους κλιβάνους όπτησης.

Η λειοτρίβηση και η ομογενοποίηση των πρώτων υλών είναι ουσιαστικής σημασίας διεργασίες οι οποίες εξασφαλίζουν, αφενός τη λεπτότητα του προς έψηση μείγματος ορυκτών, γεγονός το οποίο ευνοεί όλες τις χημικές αντιδράσεις που συντελούνται κατά τη φάση της κλινκεροποίησης, αφετέρου τη μείωση των ενεργειακών δαπανών στους περιστροφικούς κλιβάνους και την αύξηση της παραγωγικότητάς τους.

1.5.4 Ομοιογενοποίηση φαρίνας - Αποθήκευση

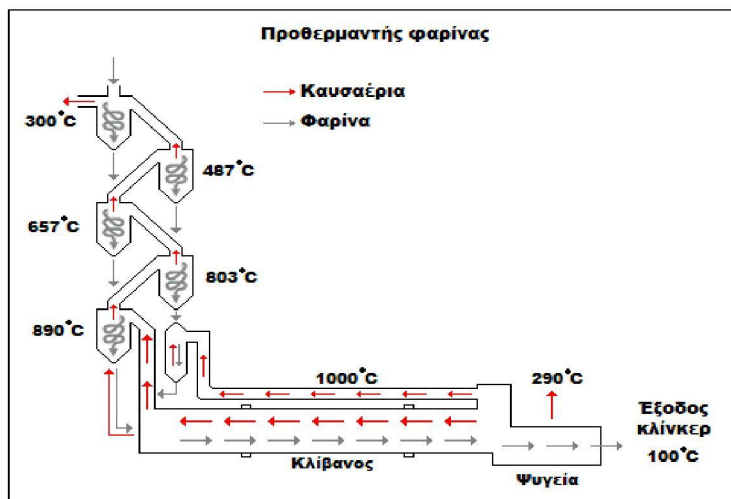
Η φαρίνα οδηγείται και αποθηκεύεται σε σιλό, στα οποία συντελείται επιπλέον ομοιογενοποίηση πριν την έψηση. Η ανάμειξη επιτυγχάνεται συνήθως με φυσητήρες αέρα, οι οποίοι βρίσκονται εγκατεστημένοι στους πυθμένες και στα πλαϊνά τοιχώματα του εσωτερικού των σιλό.

Η ομοιογένεια της φαρίνας αλλά και η προ-ομοιογένεια των πρώτων υλών είναι ουσιαστικής σημασίας διεργασίες, αν ληφθεί υπόψη ότι πολλές φορές το μείγμα των ορυκτών αποτελείται από τρία ή και παραπάνω και διαφορετικής ποιότητας συστατικά. Ταυτόχρονα αναδεικνύεται και ως ένα ουσιαστικό και περίπλοκο πρόβλημα, αφού οι προς χειρισμό ποσότητες είναι μεγάλες (της τάξης των μερικών χιλιάδων τόνων). Παρ' όλα αυτά, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ένα μείγμα ορυκτών λεπτόκοκκο και ομοιογενές, θα μπορέσει να ψηθεί αποτελεσματικά με τις χαμηλότερες δυνατές ενεργειακές δαπάνες, αποδίδοντας ένα προϊόν (κλίνκερ) υψηλής ποιότητας.

1.5.5 Προθέρμανση φαρίνας

Μετά την ομοιογενοποίηση η φαρίνα τροφοδοτείται σε κατακόρυφη συστοιχία κυκλώνων (προθερμαντής πολλών σταδίων), εντός των οποίων υφίσταται προοδευτική θερμική κατεργασία μέχρι τους 900°C . Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εξάτμιση του μη συνδεδεμένου και του κρυσταλλικού νερού από τα πετρώματα και η θερμική διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) σε οξείδια του ασβεστίου (CaO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Για την προθέρμανση του υλικού μέσα στο δίκτυο των κυκλώνων, χρησιμοποιούνται τα θερμά αέρια εξαγωγής των κλιβάνων όπτησης και των διατάξεων ψύξης του κλίνκερ, τα οποία μεταφέρονται στο σύστημα με αεραγωγούς.

Η εφαρμογή της προθέρμανσης έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των ενεργειακών δαπανών (έως και 50%) για την τσιμεντοβιομηχανία, καθώς και την αύξηση της παραγωγικής ικανότητας και της διαθεσιμότητας των κλιβάνων όπτησης. Στη συνέχεια (Εικόνα 1.5) παρουσιάζεται ενδεικτικός πύργος προθέρμανσης με συστοιχία κυκλώνων πριν την καμίνευση.



Εικόνα 1.5: Ενδεικτικός πύργος συστοιχίας κυκλώνων

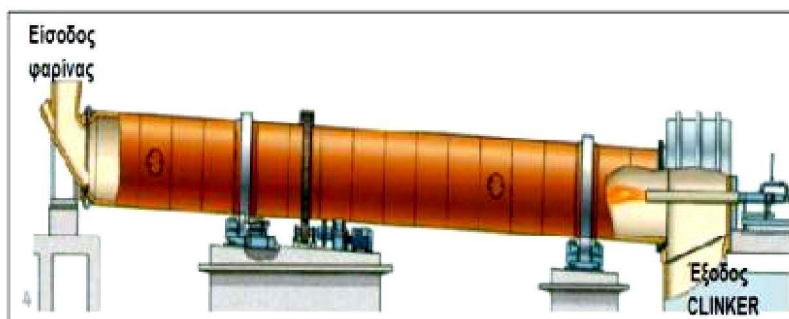
1.5.6 Έψηση φαρίνας

Η φαρίνα εξερχόμενη από τους προθερμαντές, τροφοδοτείται απευθείας στους περιστροφικούς κλιβάνους όπτησης, εντός των οποίων συντελείται η έψηση του υλικού μέχρι του σχηματισμού του **κοκκώδους κλίνκερ τσιμέντου**. Η κοκκώδης μορφή του κλίνκερ οφείλεται στη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου και των αργιλοπυριτικών ενώσεων και πιο συγκεκριμένα στις αντιδράσεις μεταξύ του ασβεστίου και των οξειδίων του πυριτίου, του αργίλου και του σιδήρου. Το χρώμα του κλίνκερ, ανάλογα με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται κατά την παρασκευή του, μπορεί να είναι είτε γκριζοπράσινο είτε λευκό. Από το λευκό κλίνκερ, για την παρασκευή του οποίου χρησιμοποιείται ένας ειδικής ποιότητας ασβεστόλιθος, παράγεται το **λευκό πόρτλαντ τσιμέντο**, το οποίο ωστόσο αντιπροσωπεύει μόλις το 1 έως 2% της παγκόσμιας αγοράς του τσιμέντου.



Εικόνα 1.6: Κόκκοι κλίνκερ γκρι τσιμέντου

Οι περιστροφικοί κλίβανοι είναι ογκώδεις χαλύβδινες κυλινδρικές κατασκευές, μήκους 50 έως 180m και διαμέτρου 3 έως 5m, με εσωτερική επένδυση από ειδικά πυρίμαχα τούβλα. Η ταχύτητα περιστροφής τους κυμαίνεται από 1 έως 4rpm, ενώ η ελαφρώς κεκλιμένη (προς την έξοδο) θέση τους, διευκολύνει τη ροή του υλικού και την αποκένωση του από το κατώτερο άκρο τους.



Εικόνα 1.7: Απεικόνιση περιστροφικού κλιβάνου όπτησης

Στους κλιβάνους η φαρίνα προοδευτικά θερμαίνεται έως τους 1400 με 1500°C. Η θερμική αυτή κατεργασία έχει σαν αποτέλεσμα την αντίδραση του οξειδίου του ασβεστίου με τα οξείδια του πυριτίου, την αλουμίνα και τα οξείδια του σιδήρου και το σχηματισμό ασβεστοπυριτικών και ασβεσταργίλικών ενώσεων, οι οποίες συνθέτουν το κλίνκερ. Ο χρόνος παραμονής του υλικού μέσα στην κάμινο μπορεί να φτάσει μέχρι τις δύο ώρες.

Ιστορικά, ο πρώτος περιστροφικός κλίβανος πρωτοχρησιμοποιήθηκε στις βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου το 1895, αντικαθιστώντας τους παλαιούς κάθετους ατρακτοειδείς κλιβάνους που σήμερα βρίσκουν εφαρμογή στην παραγωγή υδραυλικής ασβέστου, αλλά μόνο σε λίγες χώρες.



Εικόνα 1.8: Περιστροφικός κλίβανος και πύργος κυκλώνων σε μονάδα της TITAN Α.Ε. στη Βοιωτία

1.5.7 Διατάξεις ψύξης του κλίνκερ

Το σχηματισμένο κλίνκερ, μετά την έξοδο του από την κάμινο και έχοντας θερμοκρασία περίπου $1200-1250^{\circ}\text{C}$, εισέρχεται στα ψυγεία (ένσχαρα ή πλανητικά) εντός των οποίων ψύχεται με εμφύσηση ψυχρού αέρα, έως τη θερμοκρασία των $100-150^{\circ}\text{C}$. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα, αφενός τη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας από την εκμετάλλευση των θερμών αερίων στους προθερμαντές και στην ξήρανση των πρώτων υλών, αφετέρου τη δημιουργία κατάλληλων κρυσταλλογραφικών μορφών στο παραγόμενο κλίνκερ, γεγονός που βελτιώνει τις ιδιότητες του τσιμέντου. Ταυτόχρονα η ψύξη του κλίνκερ επιβάλλεται αφού καθιστά ευκολότερη τη διαχείριση του στα μετέπειτα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου (ημιτελής και τελική λειοτρίβηση, αποθήκευση, συσκευασία, μεταφορά).



Εικόνα 1.9: Πλανητικές διατάξεις ψύξης



Πυρακτώμενος κόκκος κλίνκερ



Εικόνα 1.10: Ένσχαρη διάταξη ψύξης

1.5.8 Αποθήκευση κλίνκερ

Το παραγόμενο κλίνκερ εξερχόμενο από τις διατάξεις ψύξης, οδηγείται με μεταφορικές ταινίες σε κλειστές αποθήκες (σιλό), εντός των οποίων φυλάσσεται μέχρι να τροφοδοτηθεί σε επόμενο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας που είναι η ημιτελής άλεση του. Παράλληλα, σε άλλες αποθηκευτικές εγκαταστάσεις ή και στον περιβάλλοντα χώρο της τσιμεντοβιομηχανίας (ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες), φυλάσσονται και τα υλικά που θα αποτελέσουν τις προσμίξεις για την παραγωγή του τελικού προϊόντος (γύψος, ποζολάνες, μπεντονίτης, σκωρίες κ.α.). Η αποθηκευτική ικανότητα των σιλό, ανάλογα με τη δυναμικότητα της εκάστοτε τσιμεντοβιομηχανίας, κυμαίνεται από 35.000 έως 90.000 τόνους.



Εικόνα 1.11: Σιλό κλίνκερ αποθηκευτικής ικανότητας 40.000 ton

1.5.9 Ημιτελής άλεση του κλίνκερ

Στο στάδιο της ημιτελούς αλέσεως, το κλίνκερ, προτού τροφοδοτηθεί στους σφαιρόμυλους για την ολοκλήρωση της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου, διέρχεται από θραυστήρες (κυλινδρόπρεσες, κυλινδρόμυλους ή άλλα) στους οποίους υπόκειται σε πρωτοβάθμια θράυση, ούτως ώστε η κοκκομετρία του να εξασφαλίζει την επιτάχυνση της αλευροποίησης του στους μύλους. Η διεργασία αυτή βρίσκει σημαντική εφαρμογή στις νεοσύστατες τσιμεντοβιομηχανίες, ωστόσο τα τελευταία χρόνια, λόγω των σημαντικών οφελών, μεγάλο ποσοστό των παλαιών τσιμεντοβιομηχανιών υιοθετούν στη γραμμή παραγωγής τους το στάδιο αυτό. Περαιτέρω στοιχεία θα δοθούν σε επόμενα κεφάλαια.



Εικόνα 1.12: Κυλινδρόπρεσα Τσιμεντοβιομηχανίας



Εικόνα 1.13: Κυλινδρόμυλος

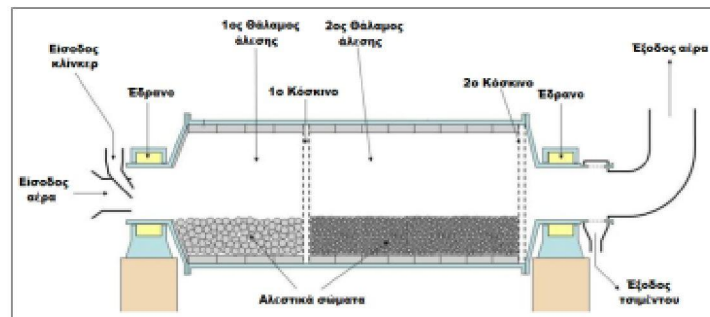
1.5.10 Μύλοι τσιμέντου

Οι μύλοι τσιμέντου (*σφαιρόμυλοι*) μοιάζουν με τους οριζόντιους μύλους φαρίνας. Πρόκειται για μεγάλα, οριζόντια, κυλινδρικού σχήματος, χαλύβδινα περιστρεφόμενα τύμπανα με οπές, εντός των οποίων οδηγείται το κλίνκερ, μαζί με τον αναγκαίο γύψο, τα φυσικά ή τεχνητά πρόσθετα (*σε αυστηρά προκαθορισμένες και συνεχώς ελεγχόμενες δοσολογίες*), καθώς και μια μεγάλη ποσότητα μεταλλικών αλεστικών σφαιρών. Η αναλογία του υλικού προς τα αλεστικά σώματα, μέσα στους μύλους, είναι περίπου 7 προς 3.



Εικόνα 1.14: Σφαιρόμυλος στη μονάδα της TITAN στο καμάρι Βοιωτίας

Εκεί, τα υλικά αυτά, συναλέθονται μέχρι να προκύψει η πολύ λεπτή σκόνη τσιμέντου. Το λεπτόκοκκο προϊόν εξέρχεται από τους μύλους, συλλέγεται και οδηγείται σε ειδικά σιλό για αποθήκευση μέσης χρονικής διάρκειας.



Εικόνα 1.15: Σκίτσο σφαιρόμυλου



Εικόνα 1.16: Μεταλλικές αλεστικές σφαίρες διαφόρων διαμέτρων

1.5.11 Συσκευασία και μεταφορά προϊόντος

Η σκόνη που συλλέγεται από τους σφαιρόμυλους αποθηκεύεται στα σιλό τσιμέντου, τα οποία αποτελούν χώρους φύλαξης μέσης χρονικής διάρκειας. Από εκεί οδηγείται, είτε σε συσκευαστικές μηχανές στις οποίες συσκευάζεται σε χάρτινους σάκους των 20 ή 50 κιλών είτε φορτώνεται και μεταφέρεται χύδην σε ειδικού τύπου σιλοφόρα φορτηγά, τρένα και πλοία.

Ο τρόπος και ο χρόνος αποθήκευσης του τσιμέντου επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή του. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, λόγω της υγρασίας του αέρα, προκαλείται η σταδιακή ενυδάτωσή του, με αποτέλεσμα να «σβολιάζει» και να μειώνεται σημαντικά η αντοχή του. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η αντοχή σε θλίψη του τσιμέντου μετά από αποθήκευση 3 μηνών μειώνεται κατά 10 έως 20%, ενώ μετά από αποθήκευση 6 μηνών μειώνεται κατά 20 έως 30%.



Εικόνα 1.17: Σχηματισμός έξι σιλό αποθήκευσης έτοιμης σκόνης τσιμέντου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2_ο

Η βιομηχανία του τσιμέντου



2.1 Εισαγωγή

Αναμφίβολα ένας από τους κλάδους με την μακροβιότερη δραστηριότητα στην οικονομική ζωή του τόπου, είναι ο κλάδος της τσιμεντοβιομηχανίας. Η ίδρυση των πρώτων τσιμεντοβιομηχανιών στην Ελλάδα, στις αρχές του περασμένου αιώνα, σηματοδότησε την εκβιομηχάνιση της χώρας και σήμερα, ο κλάδος του τσιμέντου, συγκαταλέγεται μεταξύ των βασικών τομέων της ελληνικής οικονομίας. Ταυτόχρονα η βιομηχανία του τσιμέντου κατέχει σημαντικότερη θέση στις οικονομίες πολλών κρατών του κόσμου, συνεισφέροντας ουσιαστικά στην ανάπτυξή τους.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παραθέσουμε στοιχεία αναφορικά με την εξέλιξη της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας και τη δραστηριότητα της, διαχρονικά, τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Παράλληλα θα αναφερθούμε στα βασικότερα χαρακτηριστικά του κλάδου (*ζήτηση τσιμέντου, διάρθρωση και εξέλιξη διεθνούς-εγχώριας αγοράς, αναπτυξιακές τάσεις κ.α.*), ενώ θα καταγράψουμε τη συμβολή των υφιστάμενων τσιμεντοβιομηχανιών στα οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά πράγματα της χώρας.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Από το 1902 και σε διάστημα 32 ετών, τέσσερεις μεγάλες τσιμεντοβιομηχανίες ιδρύονται στην Ελλάδα, σαν αποτέλεσμα της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης για τσιμέντο, τόσο στην εγχώρια όσο και στη διεθνή αγορά:

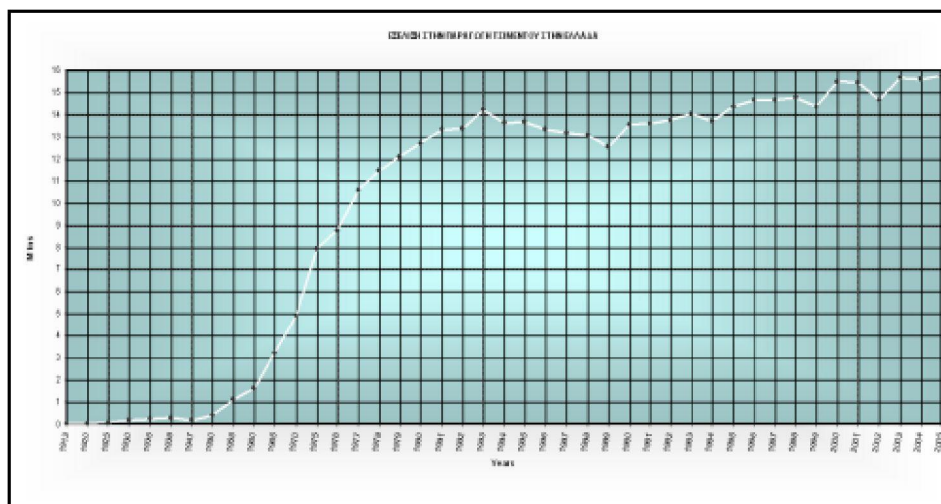
- *Ανώνυμος Εταιρεία Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ (1902)*
- *Ανώνυμος Γενική Εταιρεία Τσιμέντων (ΑΓΕΤ) ΗΡΑΚΛΗΣ (1911)*
- *Ανώνυμος Εταιρεία ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ (1926) και*
- *Ανώνυμος Εταιρεία Τσιμέντων ΧΑΛΥΨ (1934)*

Πριν ακόμα το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες εξαγωγές τσιμέντου από την Ελλάδα. Ωστόσο στην μεταπολεμική περίοδο και μέχρι το 1983, οι ρυθμοί ανάπτυξης της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας ήταν ραγδαίοι ως αποτέλεσμα, τόσο της ανάπτυξης και ανοικοδόμησης της χώρας μετά τον πόλεμο όσο και της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης για τσιμέντο (*κυρίως μετά την αύξηση των τιμών του πετρελαίου το 1973*) από χώρες του *Περσικού Κόλπου*, της *Ερυθράς Θάλασσας* και της *Βορείου και Ανατολικής Αφρικής*.

Παράλληλα η δημιουργία πόρων στις πετρελαιοπαραγωγές χώρες, οδήγησαν σε πρώτη φάση στην κάλυψη των αναγκών τους σε τσιμέντο, λόγω ανάπτυξης, με εισαγωγές τσιμέντου κυρίως από Ελλάδα και μετέπειτα σε δημιουργία ιδίων τσιμεντοβιομηχανιών. Το τελευταίο, σε συνδυασμό με την οικονομική κρίση των ανεπτυγμένων χωρών, λόγω των δύο πετρελαϊκών κρίσεων, οδήγησε τις διεθνείς τιμές πώλησης του τσιμέντου σε κάθετη πτώση (*τιμές 1986 έως και 50% χαμηλότερες από 1979*). Εξαιτίας της συγκυρίας αυτής, η ελληνική τσιμεντοβιομηχανία, εκμεταλλευόμενη την υψηλή τεχνολογία και τεχνογνωσία που διαθέτει, την άριστη ποιότητα του προϊόντος της, τα εξειδικευμένα στελέχη που την επανδρώνουν, καθώς και το χαμηλό κόστος παραγωγής, έστρεψε την εξαγωγική της δραστηριότητα σε νέες ανεπτυγμένες αγορές, γεγονός που καθιστά την Ελλάδα ως έναν από τους

ισχυρότερους εξαγωγείς φαιού τσιμέντου και κλίνκερ στον κόσμο. Κυριότεροι προορισμοί του εξαγομένου προϊόντος για την περίοδο αυτή αποτέλεσαν: *οι Η.Π.Α. καθώς και χώρες της Δυτικής Ευρώπης, της Αφρικής και της Ασίας.*

Η ανάπτυξη της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας σε σχέση με την εσωτερική ζήτηση και τις εξαγωγές της, κατά το χρονικό διάστημα 1913-2005, παρουσιάζεται στο παρατιθέμενο **Γράφημα 2.1**:



Γράφημα 2.1: Εξέλιξη στην παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα
(Πηγή: Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος)

2.3 Ζήτηση τσιμέντου

2.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση

Η ζήτηση για τσιμέντο είναι μια σχετικά ανελαστική παράμετρος αφού οι τσιμεντοβιομηχανίες καθεαυτές μπορούν να έχουν μικρή μόνο επιρροή σε όλους εκείνους τους παράγοντες που την καθορίζουν, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν τη γενική κατάσταση της οικονομίας. Οι βασικότεροι προσδιοριστικοί παράγοντες της ζήτησης είναι κατά κύριο λόγο η *οικοδομική δραστηριότητα και τα λοιπά δημόσια έργα*, το ύψος των οποίων καθορίζεται γενικά από: *τα επιτόκια, την πιστωτική πολιτική, την εξέλιξη της πραγματικής αγοραστικής δύναμης, το επίπεδο των δημοσίων επενδύσεων καθώς και την αποδοτικότητα του εμπορίου και της βιομηχανίας γενικά.* Συνεπώς εύκολα γίνεται κατανοητό ότι η βιομηχανία του τσιμέντου εξελίσσεται προς τα άνω ή προς τα κάτω σε συνάρτηση με την εξέλιξη των οικονομικών κύκλων των κρατών.

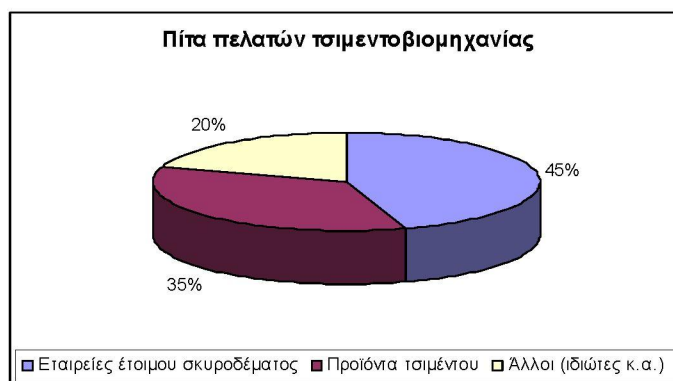
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διετία 2003-2004 κατά την οποία σημειώθηκε ρεκόρ στην εγχώρια ζήτηση τσιμέντου (10,98 εκατ. και 10,43 εκατ. τόνοι αντίστοιχα). Σε αυτό συνηγόρησαν εκτός από το ανεκτέλεστο υπόλοιπο των συμβάσεων αρκετών τεχνικών εταιριών, η μείωση των επιτοκίων χορηγήσεων, η αύξηση των χορηγούμενων στεγαστικών δανείων, η συνέχιση της απόδοσης της οικοδομικής δραστηριότητας, καθώς και η περάτωση των μεγάλων δημοσίων έργων υποδομής (κυρίως τα Ολυμπιακά Έργα).

Παρ' όλα αυτά οι τσιμεντοβιομηχανίες, επιχειρώντας να περιορίσουν τις αρνητικές συνέπειες λόγω της αδυναμίας τους να ελέγξουν τους παράγοντες εκείνους που καθορίζουν τη ζήτηση του προϊόντος τους, εφαρμόζουν **στρατηγικές πλήρους κάθετης ολοκλήρωσης**. Πράγματι εκτός από τον έλεγχο στα **ανάντι** της πηγής των πρώτων υλών (*ιδιόκτητες εταιρείες εξόρυξης και λατομικής δραστηριότητας*), κατέχουν στα **κατάντι** πολλές επιχειρήσεις παρασκευής και εμπορίας έτοιμου σκυροδέματος, κατασκευαστικές εταιρείες και γενικά επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν το τσιμέντο ως πρώτη ύλη. Επιπλέον, πολύ συχνά ελέγχουν άμεσα ή έμμεσα εταιρείες μεταφοράς του τσιμέντου (*ναυτιλιακές εταιρείες κ.α.*). Τα αποτελέσματα της παραπάνω στρατηγικής είναι ενθαρρυντικά για την οικονομική εξέλιξη των τσιμεντοβιομηχανιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τσιμεντοβιομηχανία TITAN, της οποίας οι καθετοποιημένες δραστηριότητες αποφέρουν περίπου το 41% (2007) των ενοποιημένων πωλήσεων της.

Παράλληλα, πέραν των προαναφερθέντων οικονομικών παραγόντων και συγκυριών, οι τάσεις στην κατανάλωση τσιμέντου εξαρτώνται και από τη θέση που κατέχουν, τόσο το τσιμέντο όσο και τα παράγωγα προϊόντα του, μεταξύ των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Στην κατεύθυνση αυτή οι τσιμεντοβιομηχανίες, επενδύοντας στην έρευνα για νέα τσιμέντα, με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, πιέζουν την κατασκευαστική βιομηχανία να χρησιμοποιεί ολοένα και περισσότερο το τσιμέντο σε νέες εφαρμογές, όπως στη κατασκευή αυτοκινητοδρόμων (*αντί του ασφαλτοτάπητα*) και τα προϊόντα από προεντεταμένο σκυρόδεμα σε αντικατάσταση παραδοσιακών δομικών στοιχείων, όπως το μάρμαρο ή οι πέτρες, ο χάλυβας και το ξύλο.

2.3.2 Καταναλωτές τσιμέντου

Λόγω της εξέλιξης των τεχνικών κατασκευής, η απευθείας χρησιμοποίηση τσιμέντου παρουσίασε τα τελευταία χρόνια σημαντική πτώση. Οι κυριότεροι πελάτες των τσιμεντοβιομηχανιών σήμερα είναι οι *βιομηχανίες έτοιμου σκυροδέματος*, οι οποίες αγοράζουν περίπου το 45 με 50% του παραγόμενου τσιμέντου. Εξίσου σημαντικοί πελάτες είναι και οι *κατασκευαστές προϊόντων από προεντεταμένο σκυρόδεμα και άλλων δομικών στοιχείων*, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν το 30 με 35% της αγοράς του τσιμέντου. Το υπόλοιπο 15 με 25% αφορά την ιδιωτική κατανάλωση.



Γράφημα 2.2: Καταναλωτές τσιμέντου

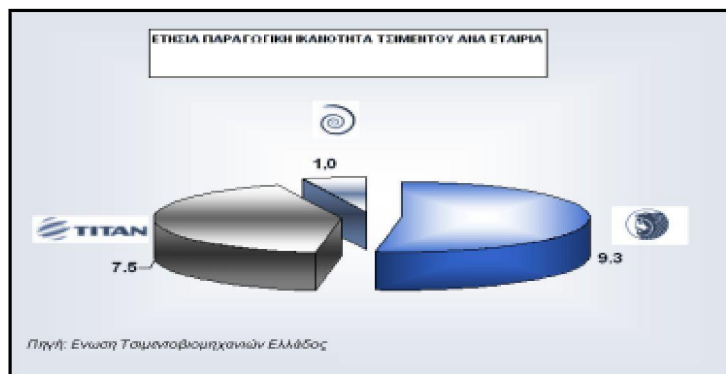
2.4 Προσφορά τσιμέντου

2.4.1 Διάρθρωση εσωτερικής αγοράς

Η παραγωγή τσιμέντου είναι ένας από τους πλέον παραδοσιακούς τομείς της ελληνικής βιομηχανίας. Στις μέρες μας και ύστερα από τη συγχώνευση της *ΑΓΕΤ Ηρακλής* με τα *Τσιμέντα Χαλκίδος*, το 2001, τρεις εταιρείες παρέμειναν και ανέπτυξαν σημαντική επιχειρηματική δράση στον παραγωγικό τομέα του τσιμέντου:

- Η Ανώνυμος Εταιρεία Τσιμέντων **TITAN**
- Η Α.Γ.Ε.Τ. **Ηρακλής** (μέλος του Ομίλου Lafarge) και
- Η Ανώνυμος Εταιρεία Τσιμέντων **Χάλψ** (μέλος του Ομίλου Italcementi)

Οι δύο μεγαλύτερες εταιρείες *ΑΓΕΤ Ηρακλής* και *TITAN Α.Ε.*, με συνολική ετήσια παραγωγική ικανότητα 16,8 εκατ. τόνους, ελέγχουν σήμερα το 90-93% της εγχώριας αγοράς τσιμέντου (περίπου 45% η κάθε μια) ενώ η *Χάλψ*, με ετήσια παραγωγική ικανότητα 1,0 εκατ. τόνους, ελέγχει μόλις το 7-10% της προσφοράς. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι η εσωτερική αγορά του τσιμέντου παρουσιάζει έντονο **ολιγοπωλιακό** χαρακτήρα. Παρ' όλα αυτά το ποσοστό της αγοράς που ελέγχουν οι τρεις παραγωγοί τσιμέντου διαφέρει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή, υπό την έννοια ότι κάθε εταιρεία κατέχει μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς σε περιοχές εγγύτερες προς τις εγκαταστάσεις και τα κέντρα διανομής της.



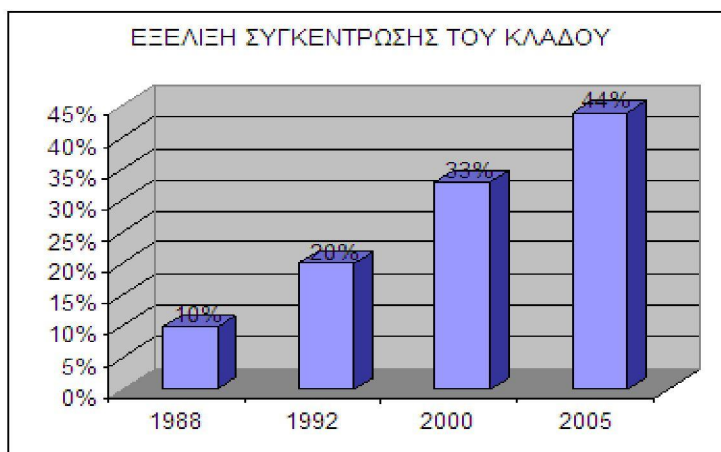
Γράφημα 2.3: Επί τους εκατό ετήσια παραγωγική ικανότητα των τριών ελληνικών τσιμεντοπαραγωγών
(Πηγή: Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος)

Ο *υψηλός βαθμός συγκέντρωσης* στην εγχώρια αγορά του τσιμέντου ενισχύεται ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι ο εξωτερικός ανταγωνισμός είναι σχεδόν μηδενικός. Πιο συγκεκριμένα, οι εισαγωγές τσιμέντου στην ελληνική αγορά είναι αμελητέες, ενώ η εγκατάσταση και η ανάπτυξη δραστηριότητας ξένων τσιμεντοβιομηχανιών στην Ελλάδα θεωρείται ιδιαίτερος δύσκολη. Σε αυτό συνηγορούν αρκετοί παράγοντες όπως:

1. Η αυστηρή ελληνική περιβαλλοντική νομοθεσία,
2. Οι περιορισμένες άδειες για νέες εγκαταστάσεις (όπως και σε όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες),
3. Το υψηλό κόστος μεταφοράς του προϊόντος και
4. Η ισχυρή θέση και τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των ελληνικών εταιρειών.

2.4.2 Διάρθρωση παγκόσμιας αγοράς

Οι συνθήκες ολιγοπωλίου δεν αποτελούν χαρακτηριστικό μόνο της ελληνικής αγοράς τσιμέντου. Αντιθέτως η τσιμεντοβιομηχανία παρουσιάζει σημαντικό βαθμό συγκέντρωσης, τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους ιδρύσεως νέων εργοστασίων. Μάλιστα ο ρυθμός συγκέντρωσης του κλάδου, την τελευταία δεκαετία, είναι σημαντικά υψηλός (*JP Morgan 8/2004*). Σήμερα οι όμιλοι: **Holderbank** (Ελβετική), **Lafarge-Coppie** (Γαλλική), **Cements Francais** (Γαλλική), **Italcementi** (Ιταλική), **Blue Circle** (Βρετανική) και **Heidelberg** (Γερμανική), ελέγχουν περίπου το 44-45% της παγκόσμια αγοράς τσιμέντου. Η εξέλιξη της συγκέντρωσης του κλάδου, κατά την περίοδο 1988-2005, παρουσιάζεται στο **Γράφημα 2.4** που ακολουθεί:



Γράφημα 2.4: Εξέλιξη συγκέντρωσης του κλάδου των τσιμέντων (*JP Morgan 8/2004*)

Στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα οι 6 ανωτέρω όμιλοι ελέγχουν μόνοι τους περισσότερο από το 45% της συνολικής προσφοράς τσιμέντου. Εάν δε εξεταστεί η προσφορά σε επίπεδο κάθε κράτους-μέλους της Ε.Ε., διαπιστώνεται ότι το ολιγοπώλιο γίνεται ακόμα στενότερο. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε ένα από τα κράτη Δανία, Ιρλανδία, Λουξεμβούργο και Κάτω Χώρες απομένει ένας μόνο παραγωγός, στο Βέλγιο η CBR Cement Works, η Heidelberg (*από το 1993*) και η Holderbank ελέγχουν το 80% της προσφοράς, στη Γαλλία η Lafarge, η Cements Francais και η Italcementi (*από το 1992*) ελέγχουν το 77%, στη Γερμανία η Heidelberg, η Dyckerhoff και η Schwenk ελέγχουν το 60%, στην Ιταλία η Italcementi, η Unicem και η Cementir κατέχουν περισσότερο από το 60%, ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο οι τρεις υφιστάμενοι παραγωγοί: Blue Circle, Rugby και Castle, μοιράζονται το σύνολο σχεδόν της προσφοράς. Τέλος στην Πορτογαλία, οι εταιρείες Cimpor και Secil ελέγχουν περισσότερο από το 95% της εγχώριας αγοράς, ενώ στην Ισπανία οι όμιλοι Valenciana, Asland, Lafarge (*από το 1990*), Holderbank και Uniland, ελέγχουν μεταξύ του 50 και 60% της προσφοράς.

2.5 Μεγάλες ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες



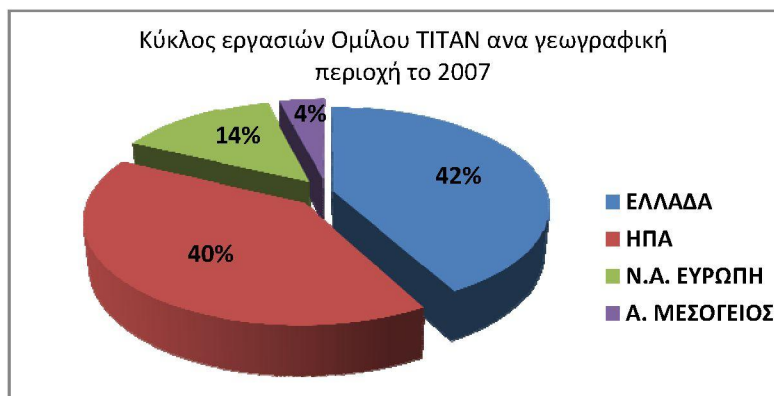
Η **TITAN Α.Ε.** ιδρύθηκε το 1902 και εισήχθη στο Χ.Α.Α. δέκα χρόνια μετά, στις 22 Φεβρουαρίου 1912. Κατά την δεκαετία του '90, κυρίως, ο Όμιλος καθετοποίησε σημαντικά τις δραστηριότητες του επενδύοντας στους κλάδους έτοιμου σκυροδέματος, αδρανών υλικών και άλλων συναφών δομικών στοιχείων (κονιάματα, τσιμεντόλιθοι, κ.α.). Σήμερα η εταιρεία έχει εδραιώσει την παρουσία της διεθνώς, καθώς διαθέτει και εκμεταλλεύεται παραγωγικές μονάδες σε πολλές χώρες του κόσμου. Επιπλέον από τη διοικητική σκοπιά, η TITAN Α.Ε. αποτελεί πλέον τη μοναδική 100% ελληνικών συμφερόντων τσιμεντοβιομηχανία.

Ο Όμιλος **TITAN** διαθέτει και εκμεταλλεύεται:

- ✓ 11 μονάδες παραγωγής τσιμέντου, εκ των οποίων 4 στην Ελλάδα (*Ευκαρπία Θεσσαλονίκης, Πάτρα, Καμάρι Βοιωτίας, Ελευσίνα Αττικής*), 2 στις ΗΠΑ (*Βιρτζίνια και Φλόριντα*), 3 στα Βαλκάνια (*Βουλγαρία, Σερβία και FYROM*) και 2 στη Μέση Ανατολή (*Αίγυπτος*), συνολικής ετήσιας παραγωγικής ικανότητας άνω των 15 εκατ. τόνων.
- ✓ 11 κέντρα διανομής τσιμέντου, εκ των οποίων 4 βρίσκονται επί ελληνικού εδάφους (*Αθήνα, Καβάλα, Ηράκλειο, Ρόδος, Χαλκίδα*), 2 βρίσκονται στις ΗΠΑ, 2 στην Αίγυπτο και από 1 στην Ιταλία, Αγγλία και Γαλλία.
- ✓ 134 μονάδες έτοιμου σκυροδέματος συνολικής ετήσιας δυναμικότητας 6 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων.
- ✓ 14 λατομεία και 4 ορυχεία, συνολικής ετήσιας δυναμικότητας 20 εκατ. τόνων.
- ✓ 1 μονάδα παραγωγής κονιαμάτων (**INTERMIX**)
- ✓ 1 μονάδα παραγωγής επιτραπέζιας πορσελάνης (**ΙΩΝΙΑ Α.Ε.**), 12 μονάδες παραγωγής τσιμεντόλιθων και 9 μονάδες επεξεργασίας ιπτάμενης τέφρας.
- ✓ 2 ιδιόκτητα λιμάνια, 5 ναυτιλιακές εταιρείες.

Η ετήσια παραγωγική ικανότητα της εταιρείας στην Ελλάδα ανέρχεται στους 7,5 εκατομμύρια τόνους, κατέχοντας περίπου το 40-45% της εγχώριας αγοράς. Η TITAN στα εργοστάσια της Θεσσαλονίκης, της Βοιωτίας και της Πάτρας, παράγει όλους τους βασικούς τύπους φαιού τσιμέντου (*πόρτλαντ, σύνθετο πόρτλαντ, σκωριοτσιμέντο, τσιμέντο με ποζολάνη κ.α.*), σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου ΕΛΟΤ ΕΝ, ενώ στη μονάδα της Ελευσίνας παράγει λευκό τσιμέντο.

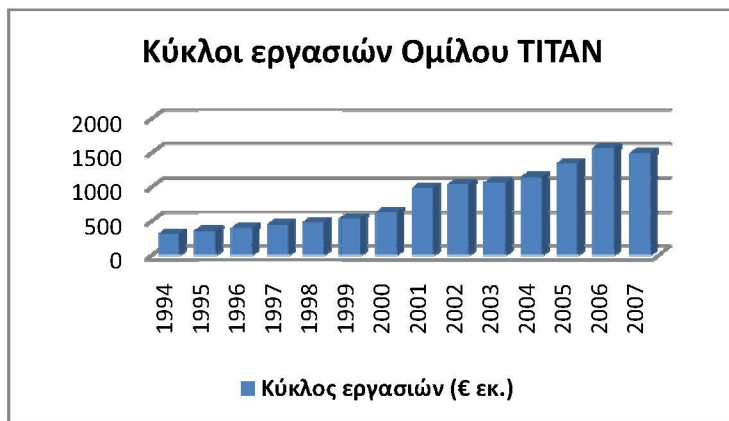
Από την άλλη, η ετήσια παραγωγική ικανότητα του Ομίλου στο εξωτερικό, ανέρχεται στους 9 εκατομμύρια τόνους. Στις Η.Π.Α. και πιο συγκεκριμένα στις πολιτείες όπου δραστηριοποιείται ο Όμιλος, με ετήσια παραγωγή 3,1 εκατ. τόνους, κατέχει το 10 έως 30% της εκεί αγοράς. Παράλληλα στην Νοτιοανατολική Ευρώπη, με συνολική ετήσια παραγωγή 2,6 εκατ. τόνους ελέγχει το 25-30% της Βουλγαρικής αγοράς, το 90% της αγοράς της FYROM και το 20-25% της αγοράς της Σερβίας. Τέλος στην Ανατολική Μεσόγειο, με ετήσια παραγωγή 3,4 εκατ. τόνους, κατέχει μερίδιο αγοράς της τάξης του 10%.



Γράφημα 2.5: Κύκλος εργασιών της TITAN ανά γεωγραφική περιοχή το 2007

Το μερίδιο της εταιρείας στην ελληνική αγορά σκυροδέματος, μέσω των θυγατρικών και συγγενικών της εταιρειών, μεγαλύτερη εκ των οποίων είναι η **Ιντερμπετόν**, υπολογίζεται ότι ανέρχεται περίπου στο 10-15%, που είναι το μεγαλύτερο μεταξύ των ομίλων που δραστηριοποιούνται στον στρατηγικής σημασίας αυτόν χώρο. Επίσης το μερίδιο της TITAN στην αγορά των αδρανών υλικών, υπολογίζεται στο 10-15%, ποσοστό που της δίνει ηγετική θέση στην αγορά των λατομείων.

Ο Όμιλος TITAN απασχολεί σήμερα περισσότερους από 6000 εργαζομένους ενώ οι κύκλοι εργασιών της εταιρείας (σε εκατ. ευρώ) από το 1994 έως το 2007, παρουσιάζεται στο παρατιθέμενο **Γράφημα 2.6**:



Γράφημα 2.6: Κύκλοι εργασιών της TITAN



Ο Όμιλος εταιρειών **ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ** είναι μέλος του κυρίαρχου στον τομέα των Δομικών Υλικών, Γαλλικού Ομίλου Lafarge. Διαθέτει τρία εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου στην Ελλάδα: το εργοστάσιο **Όλυμπος** στην Αγριά Βόλου, που είναι το μεγαλύτερο εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου στην Ευρώπη, το **ΗΡΑΚΛΗΣ II** στο Μηλάκι Ευβοίας και το **ΗΡΑΚΛΗΣ III** στο Μικρό Βαθύ Αυλίδος, από τα οποία

παράγονται όλοι οι προβλεπόμενοι, από το πρότυπο *ΕΛΟΤ ΕΝ*, τύποι τσιμέντου. Ο Όμιλος Lafarge κατέχει παγκόσμια ηγετική θέση στα δομικά υλικά και συγκαταλέγεται μεταξύ των μεγαλύτερων παραγωγών τσιμέντου στον κόσμο. Επιπλέον η Lafarge κατέχει κυρίαρχες θέσεις και σε άλλες δραστηριότητες της όπως: *τα αδρανή υλικά, το έτοιμο σκυρόδεμα, τα υλικά στεγών και ο γύψος.*

Η συνολική ετήσια παραγωγική ικανότητα του ομίλου στην Ελλάδα φθάνει τους 9,5 εκατομμύρια τόνους, γεγονός που τον καθιστά τον μεγαλύτερο παραγωγό τσιμέντου της χώρας. Επιπλέον ο Ηρακλής διαθέτει σειρά θυγατρικών εταιρειών οι οποίες δραστηριοποιούνται στους κλάδους: *της ναυτιλίας, της παραγωγής και εμπορίας σκυροδέματος και ξηρών κονιαμάτων, εξόρυξης αδρανών υλικών, έρευνας και ανάπτυξης, κατασκευής και ανέγερσης μεταλλικών κατασκευών, βιομηχανικών αυτοματισμών και ελέγχου συστημάτων παραγωγής και μεταφορών.*

Η ΑΓΕΤ Ηρακλής, σε αντίθεση με τον Τιτάνα, δεν διαθέτει παραγωγικές μονάδες και κέντρα διανομής στο εξωτερικό, ωστόσο η εξαγωγική της δραστηριότητα είναι σημαντική. Πιο συγκεκριμένα το σύνολο των εξαγωγών του Ομίλου ανέρχεται περίπου στα 4,5 εκατ. τόνους ετησίως, εκ των οποίων το 30% διοχετεύεται σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το 27% στις Η.Π.Α. και το 43% σε χώρες τις Μέσης Ανατολής και της Βόρειας και Δυτικής Αφρικής.



Γράφημα 2.7: Εξαγωγική δραστηριότητα Ομίλου ΑΓΕΤ Ηρακλής ανά γεωγραφική περιοχή

2.6 Η αγορά του τσιμέντου

2.6.1 Γενικά

Το τσιμέντο είναι ένα διεθνώς ομοιογενές προϊόν, του οποίου ο ανταγωνισμός δεν βασίζεται στο εμπορικό σήμα, τη συσκευασία ή τη διαφήμιση. Άλλωστε, αν και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή του τσιμέντου, μπορεί να διαφέρουν από τη μια βιομηχανία στην άλλη, η από το ένα κράτος στο άλλο, παρ' όλα αυτά το τελικό προϊόν θα πρέπει να έχει προδιαγραφές που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα φυσικά, χημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, τα οποία έχουν αναγνωρισθεί μέσω των υφιστάμενων, διεθνώς αναγνωρισμένων, Ευρωπαϊκών ή άλλων (π.χ. Αμερικανικών κ.α.) προτύπων.

Επιπλέον το τσιμέντο, ως προϊόν, χαρακτηρίζεται από τη μοναδικότητα των χαρακτηριστικών του και της σκοπούμενης χρήσης του, με αποτέλεσμα να είναι πολύ

δύσκολη, έως και αδύνατη σε κάποιες εφαρμογές, η υποκατάσταση του, είτε από την πλευρά της ζήτησης είτε από την πλευρά της προσφοράς, με άλλα προϊόντα.

2.6.2 Υφιστάμενες αγορές

Η αγορά του τσιμέντου μπορεί να διακριθεί σε επιμέρους αγορές όπως σε αυτή του κοινού ή γκρι τσιμέντου, του λευκού τσιμέντου και στην αγορά του κλίνκερ. Η διάκριση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι τα παραπάνω είδη ανταποκρίνονται σε διαφορετικές ανάγκες και χρήσεις, ενώ η τιμή πώλησης τους διαφοροποιείται σημαντικά. Το **κλίνκερ**, παρόλο που ως ενδιάμεσο προϊόν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αυτοδύναμο συνδετικό υλικό, επειδή απαιτεί μια περαιτέρω κατεργασία, παρόλα αυτά πολύ συχνά αποτελεί αντικείμενο εμπορικών συναλλαγών μεταξύ των παραγωγών τσιμέντου. Πρέπει ωστόσο να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το κλίνκερ, δεδομένου ότι αποτελεί το ενδιάμεσο προϊόν για την παραγωγή του τελικού προϊόντος, μπορεί να επηρεάσει σε αρκετά σημαντικό βαθμό τις υπόλοιπες αγορές.

Το **λευκό τσιμέντο** λόγω της λευκότητάς του, η οποία ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες ανάγκες ζήτησης (κυρίως αισθητικής των κατασκευών, παρασκευή χρωμάτων, σοβαντίσματα, παραγωγή μωσαϊκών), της σπανιότητας των πρώτων υλών (ασβεστόλιθος ειδικής ποιότητας), του κόστους παραγωγής και της τιμής πώλησής του, διαφοροποιείται από τις υπόλοιπες αγορές του τσιμέντου. Ειδικότερα η τιμή πώλησης του λευκού τσιμέντου είναι περίπου διπλάσια της τιμής του κοινού, ενώ οι πωλήσεις του αντιπροσωπεύουν περίπου το 2% της συνολικής αγοράς.

Το **γκρι τσιμέντο** αν και διακρίνεται σε επιμέρους τύπους, βάση της σύνθεσης (πόρτλαντ, σύνθετο πόρτλαντ, ποζολανικό, αλουμινοτσιμέντο, σκυριοτσιμέντο, ανθεκτικό στα θειικά, χαμηλών αλκαλίων κ.α.) και της ανθεκτικότητας του (25MPa, 45MPa, 55MPa), είναι αυτό που κατά κανόνα χρησιμοποιείται στην κατασκευαστική βιομηχανία. Παράλληλα με την αγορά του γκρι τσιμέντου συνδέεται άμεσα και η αγορά του έτοιμου σκυροδέματος, καθώς και αυτή των διαφόρων προϊόντων τσιμέντου, κλάδοι με ουσιαστική συμμετοχή στον κύκλο εργασιών των τσιμεντοβιομηχανιών. Ωστόσο η αγορά των εξειδικευμένων γκρι τσιμέντων διαφοροποιείται από αυτή του κοινού και σύνθετου πόρτλαντ. Πιο συγκεκριμένα, τα ειδικού τύπου γκρι τσιμέντα, αντιπροσωπεύουν μόλις το 2-3% της συνολικής αγοράς, σε αντίθεση με τα πόρτλαντ (απλά και σύνθετα), τα οποία αντιπροσωπεύουν το 97%.

2.7 Εξέλιξη εγχώριας αγοράς

Αν και οι ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες πραγματοποιούν ετησίως ένα σημαντικό όγκο εξαγωγών, παρ' όλα αυτά το μεγαλύτερο ποσοστό των εσόδων τους και των λειτουργικών κερδών (περίπου το 60% και το 55% αντίστοιχα), προέρχεται από τις δραστηριότητές τους στην εγχώρια αγορά. Επιπλέον, περίπου το 80% της ελληνικής παραγωγής προορίζεται για την ιδιωτική δόμηση ενώ μόλις το 20% στα δημόσια έργα. Βεβαίως η κατανομή αυτή συγκυριακά μεταβάλλεται και όπως έχει αναφερθεί, συνδέεται άμεσα με τη γενική οικονομική κατάσταση της χώρας.



Γράφημα 2.8: Πωλήσεις τσιμέντου-κλίνκερ (εσωτερικό + εξαγωγές) κατά τη δεκαετία 1996-2006

Από το 1995 (οπότε άρχισε η σταδιακή ανάκαμψη στον κλάδο ύστερα από μακρά ύφεση) μέχρι το 2000, ήταν ο εξαγωγικός προσανατολισμός που διατήρησε την αυξητική τάση στην παραγωγή των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών. Ωστόσο από το 2001 και έπειτα, σημειώθηκε σημαντική μείωση των εξαγωγών, ως αποτέλεσμα των αυξημένων εγχώριων αναγκών για τσιμέντο, κυρίως λόγω των Ολυμπιακών Έργων και της αυξημένης ιδιωτικής δόμησης κατά την περίοδο αυτή (λόγω των χαμηλών επιτοκίων στα στεγαστικά δάνεια). Ειδικότερα το 2001 η παραγωγή των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών, που κατευθύνθηκε στην εγχώρια αγορά, ήταν λίγο κάτω από 9,4 εκατ. τόνους ενώ κατά τα έτη που ακολούθησαν (2002-2006), σημειώθηκε αύξηση των εσωτερικών πωλήσεων της τάξης του 10% (κατά μέσο όρο) και περαιτέρω συρρίκνωση της εξαγωγικής δραστηριότητας.



Γράφημα 2.9: Παραγωγή τσιμέντου και κλίνκερ στην Ελλάδα, κατά τη δεκαετία 1996-2006

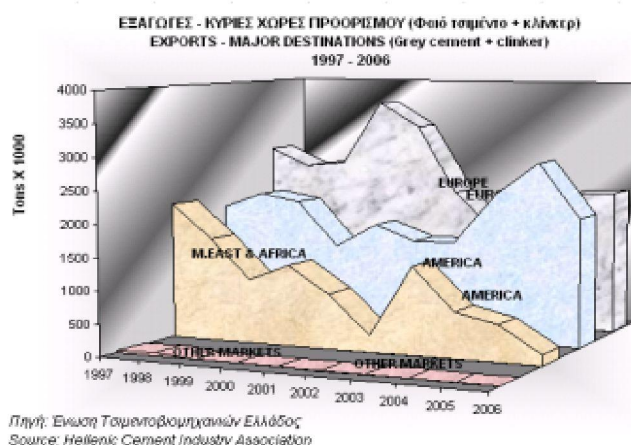
2.8 Εξέλιξη εισαγωγών - εξαγωγών

Οι εισαγωγές τσιμέντου στην Ελλάδα είναι περιορισμένες και ο όγκος τους συνδέεται άμεσα με το ύψος της εσωτερικής ζήτησης. Πράγματι, σε περιόδους κατά τις οποίες η εγχώρια ζήτηση, είτε λόγω της εξέλιξης μεγάλων δημοσίων επενδύσεων σε έργα υποδομής (π.χ. Ολυμπιακά Έργα), είτε της συγκυριακής ανάπτυξης της

ιδιωτικής δόμησης, φθάνει σε σημεία όπου οι ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες εξαντλούν τις παραγωγικές τους δυνατότητες (δεδομένου και των εξαγωγικών τους υποχρεώσεων), πραγματοποιούνται ανάλογες εισαγωγές τσιμέντου ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα στην αγορά.

Από την άλλη πλευρά η Ελλάδα θεωρείται ένας από τους **ισχυρότερους εξαγωγείς τσιμέντου στον κόσμο** και οι ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες βρίσκονται σε μία συνεχή αναζήτηση νέων αγορών, κυρίως προς τις χώρες όπου η κατασκευαστική δραστηριότητα βρίσκεται ακόμη σε εμβρυακή κατάσταση. Κάποιες από τις αγορές αυτές είναι η *Αιγυπτιακή*, όπου τα τελευταία χρόνια η ζήτηση τσιμέντου αυξάνει με σημαντικούς ρυθμούς, η *Σερβική*, η *Αλβανική* και άλλες.

Σε αυτή την αλματώδη ανάπτυξη της εξαγωγικής δραστηριότητας των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών συνηγόρησαν αρκετοί παράγοντες. Το γεγονός ότι τα εργοστάσια τσιμέντου στην Ελλάδα βρίσκονται κοντά σε λιμάνια, πράγμα που ευνοεί την εξαγωγή προϊόντων με χαμηλότερο μεταφορικό κόστος εν συγκρίσει με τους ανταγωνιστές, αλλά και η αφθονία του ελληνικού υπεδάφους σε υψηλής ποιότητας πρώτες ύλες (ασβεστόλιθος με ελάχιστες προσμείξεις), είναι κάποια από τα **συγκριτικά πλεονεκτήματα** των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών. Άλλωστε η χαμηλή τιμή του τσιμέντου σε σχέση με το βάρος του, το καθιστά ανταγωνιστικό μόνο για μικρές αποστάσεις από το χώρο παραγωγής, σε περίπτωση χερσαίας μεταφοράς. Κατά συνέπεια, σχεδόν ολόκληρο το διεθνές εμπόριο τσιμέντου είναι είτε διασυνωριακό και σε μικρή ακτίνα από τον τόπο παραγωγής, είτε διεξάγεται δια θαλάσσης με μεγάλα πλοία και για πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι κυριότερες χώρες προορισμού του εξαγόμενου φαιού τσιμέντου και κλίνκερ, από τις ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες, καθώς και ο όγκος των εξαγωγών ανά προορισμό, κατά τη δεκαετία 1996-2006, παρουσιάζονται στο ακόλουθο γράφημα:



Γράφημα 2.10: Κύριες χώρες προορισμού του εξαγόμενου ελληνικού φαιού τσιμέντου και κλίνκερ

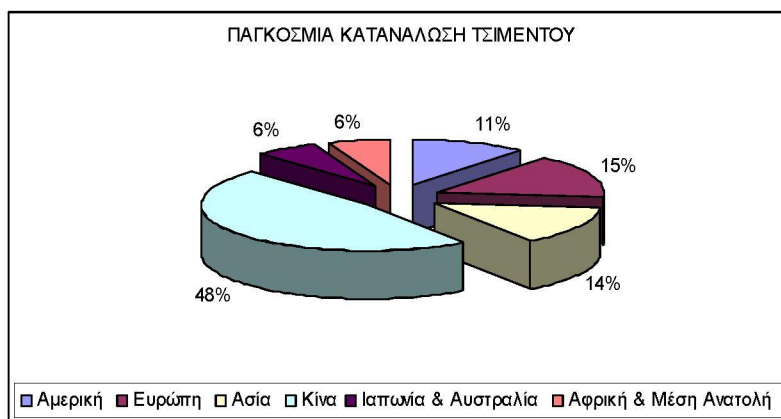
2.9 Παγκόσμια αγορά τσιμέντου και αναπτυξιακές τάσεις

Εν γένει ο κλάδος του τσιμέντου χαρακτηρίζεται από μακρές περιόδους ανάπτυξης, στις οποίες παρεμβάλλονται βραχείες περίοδοι κάμψης. Ωστόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, οι διάφορες γεωγραφικές περιοχές διέρχονται διαφορετικούς

κύκλους, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι είναι σχετικά σπάνιο να συμπίπτουν χρονικά οι περίοδοι κατά τις οποίες βρίσκονται σε κάμψη. Επιπροσθέτως, οι αγορές οι οποίες βρίσκονται σε ανάπτυξη είναι εν γένει περισσότερες από αυτές οι οποίες διανύουν περιόδους κάμψης. Κατά συνέπεια, παρά τη γενική οικονομική ύφεση, η οποία παρατηρείται στην παγκόσμια αγορά από το 2007, οι προοπτικές ανάπτυξης του κλάδου της τσιμεντοβιομηχανίας είναι ενθαρρυντικές, με κύριο παράγοντα ανάπτυξης την πληθυσμιακή αύξηση και την ακολουθούμενη ανάγκη για την κατασκευή νέων κατοικιών και λοιπόν άλλων υποδομών που συνεπάγονται αυτής.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις της *Αμερικανικής Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών*, την διετία που ακολουθεί αναμένεται ετήσια αύξηση στην κατανάλωση τσιμέντου κατά μέσο όρο 6%, ενώ σύμφωνα με εκτιμήσεις της *FLSmith*, κορυφαίου κατασκευαστή εξοπλισμού παραγωγής τσιμέντου στον κόσμο, η αύξηση αυτή θα κυμανθεί κατά μέσο όρο στο 3,6% και 4,8% ετησίως. Σημαντικό ρόλο στην επιβεβαίωση των παραπάνω εκτιμήσεων αναμένεται να διαδραματίσουν αναπτυσσόμενες αγορές όπως αυτές της κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης και Ασίας, περιλαμβανομένων χωρών όπως η *Αλβανία*, η *Βουλγαρία*, η *Σερβία*, η *Τουρκία*, στις οποίες αναπτύσσουν έντονη επιχειρηματική δράση και ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες.

Γενικά ο μεγαλύτερος καταναλωτής τσιμέντου σήμερα θεωρείται η Ασία (μαζί με την Κίνα) απορροφώντας περισσότερο από το 60% της παγκόσμιας παραγωγής, ποσοστό το οποίο αναμένεται να αυξηθεί κατά τα απόμεινα έτη. Δεύτερη σε κατανάλωση τσιμέντου έρχεται η Ευρώπη (15%), ενώ ένα από τα μικρότερα μερίδια της παγκόσμιας παραγωγής απορροφώνται από την Ιαπωνία και Αυστραλία.



Γράφημα 2.11: Μέρηδια κατανάλωσης τσιμέντου

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός τσιμέντου στον κόσμο, ενώ οι 6 μεγαλύτεροι Ευρωπαϊκοί όμιλοι είναι αυτοί που ελέγχουν περίπου το 44% της παγκόσμιας αγοράς. Ωστόσο η κατανάλωση τσιμέντου στην Ε.Ε. σπάνια υπερβαίνει την προσφορά. Κατά συνέπεια παρουσιάζεται έντονο το πρόβλημα από την άποψη της πλεονάζουσας παραγωγικής ικανότητας και μάλιστα από την υπερπαραγωγή προϊόντος, καθιστώντας την Ευρωπαϊκή Ένωση ένα καθαρό εξαγωγέα τσιμέντου στον υπόλοιπο κόσμο. Οι κυριότεροι προορισμοί της εξαγωγικής

δραστηριότητας της Ε.Ε. είναι: η *Βόρεια Αμερική*, οι χώρες της *Μέσης Ανατολής*, η *Αφρική* και οι *τρίτες χώρες*.

Οι τσιμεντοβιομηχανίες όλων των κρατών-μελών συμμετέχουν σε διαφορετικό βαθμό στις εξαγωγές αυτές, προς τις χώρες που προαναφέρθηκαν, συμπεριλαμβανομένων και των παραγωγών των Κάτω Χωρών, οι οποίες ωστόσο αποτελούν έναν καθαρό εισαγωγέα τσιμέντου. Το μερίδιο της κάθε χώρας, στις εξαγωγές της Ε.Ε., καθορίζεται μέσω επιτροπών που συστάθηκαν μεταξύ των μεγάλων εξαγωγέων και μεταξύ όλων των κρατών μελών.

2.10 Συμβολή στην ανάπτυξη

Στη βιομηχανία του τσιμέντου, παρουσιάζεται ο υψηλότερος βαθμός συγκέντρωσης της απασχόλησης και του κεφαλαίου στο σύνολο του κλάδου της μεταποίησης μη μεταλλικών ορυκτών, αλλά και ένας από τους υψηλότερους σε σύγκριση με το σύνολο της μεταποιητικής βιομηχανίας. *Στην Ελλάδα, η βιομηχανία του τσιμέντου αποτελεί σημείο αναφοράς για τη βαριά βιομηχανία του τόπου και ένας από τους κλάδους με την ουσιαστικότερη συμβολή στην ανάπτυξη της οικονομίας, του περιβάλλοντος και των επιστημών.*

Αρχικά, σύμφωνα και με στοιχεία που παρατέθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, η τσιμεντοβιομηχανία, όντας παραδοσιακά ένας από τους ισχυρότερους εξαγωγικούς κλάδους της χώρας, συμβάλει ουσιαστικά στη συγκέντρωση υψηλών συναλλαγματικών κεφαλαίων. Ειδικότερα, αν ληφθεί υπόψη ότι η τιμή του εξαγόμενου τσιμέντου είναι περίπου 100€/τον, τότε τα έσοδα από την πώληση του τσιμέντου ανέρχονται ετήσια σε **570 εκατομμύρια ευρώ** περίπου. Ταυτόχρονα αν ληφθούν υπόψη και οι εσωτερικές πωλήσεις των τσιμεντοβιομηχανιών καθώς και τα έσοδα από τις λοιπές δραστηριότητες τους (*εμπορία σκυροδέματος, προϊόντα τσιμέντου κ.α.*), τότε ο συνολικός κύκλος εργασιών της βιομηχανίας του τσιμέντου ανέρχεται στα **4,0 - 4,5 δις ευρώ** ετησίως. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ο τομέας του τσιμέντου είναι από τους δυναμικότερους της ελληνικής βιομηχανίας με ουσιαστική συμμετοχή στο ΑΕΠ της χώρας.

Παράλληλα, με την εκπόνηση σημαντικών επενδυτικών προγραμμάτων, συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη της οικονομίας, τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο, καθώς επίσης και στην ανάπτυξη της απασχόλησης. Το τριετές επενδυτικό πρόγραμμα του ομίλου **TITAN**, αξίας 352.000.000€, για τα τη χρονική περίοδο 2000-2003, το οποίο στόχευε στον εκσυγχρονισμό και παράλληλα την αύξηση της δυναμικότητας τριών εκ των παραγωγικών της μονάδων στη Θεσσαλονίκη, την Αίγυπτο και την πολιτεία της Φλόριντας (*ΗΠΑ*), αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα. Το κομμάτι του προγράμματος που αφορούσε τον εκσυγχρονισμό της παραγωγικής μονάδας της Θεσσαλονίκης, με την αντικατάσταση των παλαιών κλιβάνων της από έναν μόνο κλίβανο τελευταίας τεχνολογίας, άγγιξε τα 79.000.000 euro. Τα αποτελέσματα του προγράμματος αυτού, το οποίο αποτελεί τη μεγαλύτερη βιομηχανική επένδυση που πραγματοποιείται αποκλειστικά από εταιρικά κεφάλαια στη Βόρεια Ελλάδα, ήταν ουσιαστικής σημασίας για την ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής. Από την οικονομική σκοπιά το εργοστάσιο της TITAN αποδίδει

στην ευρύτερη περιοχή της Μακεδονίας κεφάλαια τα οποία ξεπερνούν τα 41 εκατομμύρια € ετησίως (αγορές, προμήθειες, επισκευές, εισφορές σε Δημόσιους Οργανισμούς, αγορά πρώτων υλών, μισθοδοσία, μεταφορές κ.α.), ενώ από την λειτουργία του εξαρτώνται οικονομικά, άμεσα ή έμμεσα, περισσότερα από 3.000 άτομα.

Ένα ακόμα σημαντικό επενδυτικό πρόγραμμα για το έτος 2005 αποτέλεσε αυτό της εταιρείας Χάλυψ και του Ομίλου Italcementi, το οποίο ανέρχεται στα 6,6 εκατομμύρια €, το οποίο στόχευε στην αύξηση της παραγωγής και της ποιότητας των προσφερόμενων, στην εσωτερική αγορά, προϊόντων (τσιμέντο, αδρανή υλικά κ.α.). Αν και η Χάλυψ θεωρείται η μικρότερη εταιρεία του κλάδου, στην Ελλάδα, με παραγωγική ικανότητα της τάξης του 1 εκατ. τόνους τσιμέντου και 10 εκατ. τόνους αδρανών ετησίως, εντούτοις έχει δημιουργήσει περισσότερες από 1.500 άμεσες και έμμεσες θέσεις εργασίας.

Ταυτόχρονα η συμβολή της τσιμεντοβιομηχανίας στην ανάπτυξη εντοπίζεται και στον τομέα των επιστημών. Είναι γεγονός ότι τα εργοστάσια τσιμέντου αποτελούν σημείο συνάντησης πληθώρας επιστημόνων. Απόρροια των παραπάνω είναι η συγκέντρωση μιας πολύ σημαντικής τεχνογνωσίας πάνω στην επιστήμη της μηχανολογίας, της γεωλογίας, της φυσικής, της χημείας, της διοίκησης καθώς και άλλων επιστημονικών τομέων. Τη γνώση αυτή, οι βιομηχανίες τσιμέντου τη μεταλαμπαδεύουν στις επόμενες γενιές επιστημόνων, συμμετέχοντας ενεργά σε μεταπτυχιακά προγράμματα σπουδών και αναπτύσσοντας συνεργασίες με πανεπιστήμια και πολυτεχνεία σε όλη την Ελλάδα αλλά και στις υπόλοιπες χώρες στις οποίες δραστηριοποιούνται.

Τέλος σημαντική είναι η συμβολή των τσιμεντοβιομηχανιών σε θέματα που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος μέσω της χρηματοδότησης προγραμμάτων αναδάσωσης, τεχνολογιών περιορισμού των ρύπων από την λειτουργία των εργοστασίων, καθώς επίσης και της περιβαλλοντικής αποκατάστασης των λατομικών χώρων μετά τη χρήση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3_ο

Τεχνολογικές εξελίξεις



Εικόνα: Γέφυρα Ρίου - Αντίρριου

3.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή του τσιμέντου προϋποθέτει μια μακριά και πολύπλοκη παραγωγική διαδικασία, με τεράστιες ενεργειακές απαιτήσεις. Άλλωστε οι τσιμεντοβιομηχανίες συγκαταλέγονται μεταξύ των μεγαλύτερων καταναλωτών ηλεκτρικής και χημικής ενέργειας στον βιομηχανικό τομέα, σαν αποτέλεσμα της λειτουργίας περιστροφικών κλιβάνων, διατάξεων ψύξης, ομοιογενοποιητών, θραυστήρων διαφόρων τύπων, σφαιρόμυλων, ταινιόδρομων, συσκευαστηρίων και άλλων ενεργοβόρων διατάξεων. Μια κατά προσέγγιση κατανομή των ενεργειακών δαπανών, στα διάφορα στάδια της γραμμής παραγωγής μιας τυπικής τσιμεντοβιομηχανίας, παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.1** που ακολουθεί:

	<i>Επί τοις εκατό κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας</i>
Μύλοι τσιμέντου	38
Θραυστήρες ακατέργαστης ύλης	24
Κλίβανος και διατάξεις ψύξης	22
Σιλό ομοιογενοποίησης	6
Συσκευαστήρια	5
Προ-Ομοιογενοποίηση	5

Πίνακας 3.1: Κατανομή ενεργειακών δαπανών στη γραμμή παραγωγής του τσιμέντου

Στην κατεύθυνση του περιορισμού των ενεργειακών δαπανών, τα οποία αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα λειτουργικά έξοδα των τσιμεντοβιομηχανιών (περίπου το 30-40% του κόστους παραγωγής), πραγματοποιήθηκαν πολλές μελέτες για την ανεύρεση νέων, οικονομικότερων διαδικασιών παρασκευής του τσιμέντου. Τα αποτελέσματα ήταν σπουδαία διότι πρωτοποριακές τεχνολογίες εντάχθηκαν στις γραμμές παραγωγής των τσιμεντοβιομηχανιών.

Μια από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις αποτέλεσε η λειτουργία της κυλινδρόπρεσας σε κυκλώματα με αερο-διαχωριστές μεγέθους. Η εφαρμογή αυτή, η οποία αφορά το στάδιο της **προ-άλεσης των πρώτων υλών** του τσιμέντου, καθώς και της **ημιτελούς λειοτρίβησης του κλίνκερ**, επέφερε ουσιαστικά αποτελέσματα, τόσο στη μείωση των ενεργειακών δαπανών όσο και στην αύξηση του όγκου παραγωγής των τσιμεντοβιομηχανιών.

3.2 Κυλινδρόπρεσες σε κυκλώματα αερο-διαχωριστών

3.2.1 Γενικά

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η τσιμεντόσκονη προκύπτει από τη λεπτή συνάλεση του κλίνκερ, με τον αναγκαίο γύψο και όλες τις

προβλεπόμενες πρόσθετες ύλες (ποζολάνες, σκωρίες, τέφρες υψικαμίνων κ.α.), στους μύλους τσιμέντου.

Πριν την εφαρμογή της κυλινδρόπρεσας με τους αερο-διαχωριστές μεγέθους, το κλίνκερ, χονδρόκοκκο όπως φυλασσόταν στα σιλό αποθήκευσης, μετά την έξοδο του από τις διατάξεις ψύξης, οδηγούνταν απευθείας στους σφαιρόμυλους. Εκεί, πραγματοποιούνταν η συνάλεση του με τις προβλεπόμενες προσμείξεις και μια μεγάλη ποσότητα μεταλλικών αλεστικών σφαιρών. Ωστόσο η χονδρόκοκκη υφή του κλίνκερ, σε συνδυασμό με την ακολουθούμενη διαδικασία κονιορτοποίησης του, μέσω της ακανόνιστης κίνησης των αλεστικών σφαιρών στα περιστρεφόμενα τύμπανα, παρέτειναν σημαντικά το χρόνο κατεργασίας στο στάδιο αυτό, καθιστώντας το ιδιαίτερα ενεργοβόρο. Άλλωστε, όπως επισημαίνεται και στον **Πίνακα 3.1**, οι μύλοι τσιμέντου αποτελούν τους μεγαλύτερους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, μεταξύ όλων των διατάξεων που λαμβάνουν χώρα στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου.

Η παράταση του χρόνου λειτουργίας των σφαιρόμυλων, για μια δεδομένη ποσότητα υλικού, έχει σαν αποτέλεσμα:

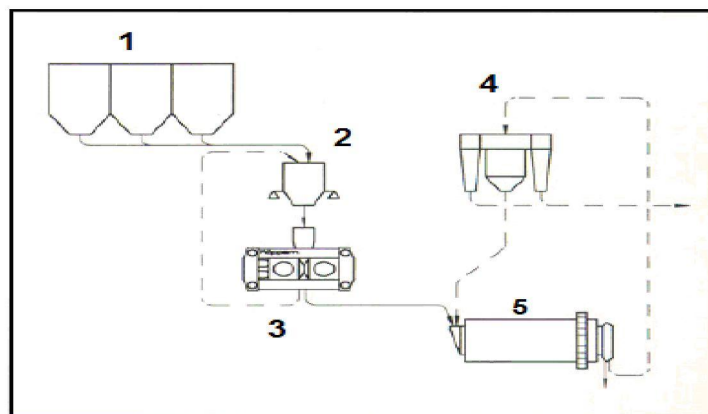
- Την **αύξηση των δαπανών** σε ηλεκτρική ενέργεια έως και 50%.
- Την **αύξηση των βλαβών** και των **εξόδων συντήρησης** των σφαιρόμυλων λόγω της παρατεταμένης λειτουργίας τους.
- Την **μείωση της διαθεσιμότητας** τους.

Μια σημαντική εξέλιξη για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, αποτέλεσε η λειτουργία της κυλινδρόπρεσας σε ανοιχτά ή και κλειστά κυκλώματα με αερο-διαχωριστές. Η εφαρμογή αυτή στοχεύει στην **πρωτοβάθμια** θραύση των κόκκων κλίνκερ, στην κυλινδρόπρεσα, ούτως ώστε η κοκκομετρία τους να εξασφαλίζει την επιτάχυνση της αλευροποίησης τους κατά τη φάση της συνάλεσης στους μύλους τσιμέντου. Η λεπτότητα του θραυσμένου υλικού ελέγχεται συνεχώς από τους αερο-διαχωριστές, οι οποίοι τροφοδοτούν το επαρκώς αλεσμένο κλίνκερ στους μύλους, ενώ την υπόλοιπη, μη επαρκώς κατεργασμένη ποσότητα, την επανατροφοδοτούν στην κυλινδρόπρεσα για περαιτέρω κατεργασία. Η διαδικασία αυτή καλείται και **ημιτελής άλεση του κλίνκερ** και είναι η πιο συνηθισμένη εφαρμογή ειδικά στις νεοσύστατες βιομηχανίες τσιμέντου.

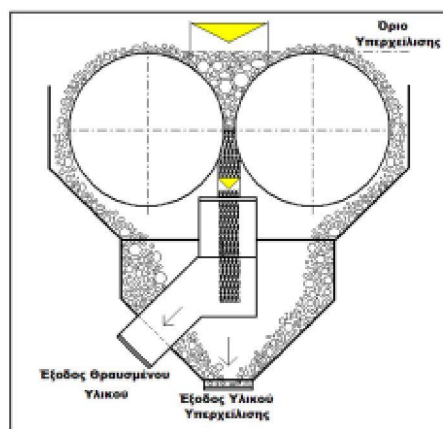
3.2.2 Κυκλώματα ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ

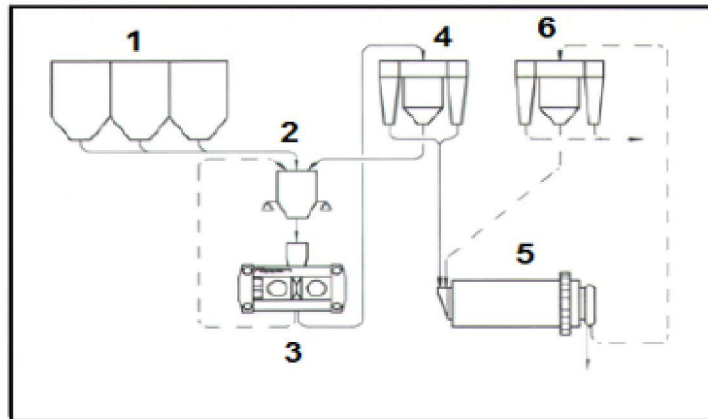
Δύο είναι τα συνήθως εφαρμοζόμενα κυκλώματα ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ:

1. Το κύκλωμα ημιτελούς άλεσης, σε ανοιχτό κύκλωμα με σφαιρόμυλο.
2. Το κύκλωμα ημιτελούς άλεση, σε κλειστό κύκλωμα με αερο-διαχωριστή.

Ημιτελής άλεση σε ανοιχτό κύκλωμα με σφαιρόμυλο**Εικόνα 3.1:** Ανοιχτό κύκλωμα ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ

Το χονδρόκοκκο κλίνκερ, οδηγείται από τα σιλό αποθήκευσης **-1-** στο σύστημα τροφοδοσίας της κυλινδρόπρεσας **-2-**. Από εκεί τροφοδοτείται, με ελεγχόμενη ροή, στο διάκενο των κυλίνδρων του μηχανήματος **-3-** και θραύεται σε μικρότερα τεμάχια. Το κλίνκερ που πιθανώς διήλθε ακατέργαστο από το θραυστήρα, ως αποτέλεσμα της υπερχειλίσσης υλικού από τον κορεσμό της χοάνης που σχηματίζουν οι οριζόντιοι κύλινδροι, συλλέγεται αμέσως μετά την κυλινδρόπρεσα και επιστρέφεται στο σύστημα τροφοδοσίας της (**Εικόνα 3.2**). Αντίθετα το θραυσμένο υλικό οδηγείται με μεταφορικές ταινίες στο σφαιρόμυλο **-5-**. Οι μύλοι συλλειτουργούν με διαχωριστές **-4-**, οι οποίοι κοσκινίζουν το αλεσμένο υλικό και ανάλογα με την κοκκομετρία του, οδηγούν το αλευροποιημένο κλίνκερ στα σιλό τσιμέντου για αποθήκευση, ενώ τα ευμεγέθη μη επαρκώς αλεσμένα στερεά επανατροφοδοτούνται στους μύλους για περαιτέρω άλεση.

**Εικόνα 3.2:** Συλλογή ακατέργαστου υλικού, λόγω υπερχειλίσσης, στο κάτω μέρος της κυλινδρόπρεσας

Ημιτελής άλεση σε κλειστό κύκλωμα αερο-διαχωριστή**Εικόνα 3.3:** Κλειστό κύκλωμα ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ

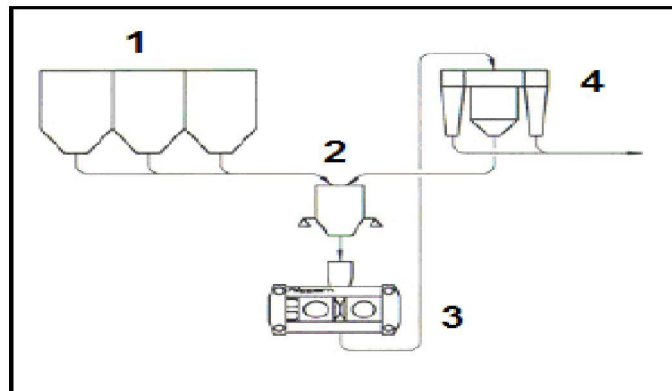
Όμοια με την προηγούμενη διάταξη, το κλίνκερ οδηγείται από τα σιλό αποθήκευσης **-1-** στο σύστημα τροφοδοσίας της κυλινδρόπρεσας **-2-**. Από εκεί τροφοδοτείται, με ελεγχόμενη ροή, στο διάκενο των κυλίνδρων του μηχανήματος **-3-** και υπόκειται σε πρωτοβάθμια θραύση. Το κλίνκερ που πιθανώς διήλθε ακατέργαστο, συλλέγεται αμέσως μετά την κυλινδρόπρεσα και επιστρέφεται στο σύστημα τροφοδοσίας της. Αντίθετα το κατεργασμένο υλικό οδηγείται για πρωτοβάθμια κοσκίνιση σε διαχωριστή **-4-**, ο οποίος διαχωρίζει και τροφοδοτεί το λεπτοαλεσμένο κλίνκερ στους μύλους **-5-** ενώ την υπόλοιπη, μη επαρκώς αλεσμένη ποσότητα, την επανατροφοδοτεί στο σύστημα τροφοδοσίας του σπαστήρα.

Οι μύλοι τσιμέντου συλλειτουργούν με δεύτερο σύστημα διαχωριστή **-6-**, ο οποίος, κατά τη δευτεροβάθμια κοσκίνιση, συλλέγει το αλευροποιημένο προϊόν της συνάλεσης του κλίνκερ με τις προβλεπόμενες προσμείξεις και το οδηγεί στα σιλό τσιμέντου για αποθήκευση. Αντίθετα το μη επαρκώς κονιορτοποιημένο υλικό επιστρέφει στους σφαιρόμυλους για περαιτέρω κατεργασία.

3.2.3 Κυκλώματα προ-άλεσης πρώτων υλών

Πέραν της εφαρμογής των προαναφερθέντων κυκλωμάτων για την *ημιτελή άλεση του κλίνκερ*, σημαντική είναι η εφαρμογή της κυλινδρόπρεσας και των διατάξεων διαχωρισμού και σε άλλα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου. Ειδικότερα:

1. Στην άλεση και θραύση των πρώτων υλών του τσιμέντου «**φάση προ-άλεσης πρώτων υλών**».
2. Στην άλεση των τεφρών υψικαμίνου και των σκωριών «**φάση προ-άλεσης προσμείξεων**».

Κύκλωμα Προ-άλεσης πρώτων υλών σε ανοιχτό κύκλωμα με αερο-διαχωριστή**Εικόνα 3.4:** Ανοιχτό κύκλωμα προ-άλεσης των πρώτων υλών

Η διάταξη αυτή βρίσκει εφαρμογή στη φάση της πρωτοβάθμιας θραύσης των πρώτων υλών, προτού οδηγηθούν στους μύλους συνάλεσης για την παρασκευή της λεπτόκοκκης φαρίνας. Το υλικό οδηγείται από τα σιλό αποθήκευσης **-1-**, στο σύστημα τροφοδοσίας της κυλινδρόπρεσας **-2-**. Από εκεί τροφοδοτείται με ελεγχόμενη ροή, στο διάκενο των κυλίνδρων του μηχανήματος **-3-** και υπόκειται σε θραύση. Το θραυσμένο υλικό τροφοδοτείται σε διαχωριστή μεγέθους **-4-**, ο οποίος κοσκινίζει και οδηγεί στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης το λεπτόκοκκο προϊόν, ενώ επιστρέφει στο σύστημα τροφοδοσίας του θραυστήρα τα μη επαρκώς αλεσμένα στερεά. Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και τα κυκλώματα για την άλεση των προσμείξεων του τσιμέντου (*σκαρίες, τέφρες κ.α.*).

Στατιστικά, το συχνότερα εφαρμοζόμενο κύκλωμα στη βιομηχανία του τσιμέντου, είναι αυτό της **ημιτελούς κατεργασίας του κλίνκερ**. Αναλυτικότερα στοιχεία, βασισμένα στις συνολικές πωλήσεις των εταιρειών κατασκευής σπαστήρων τύπου κυλινδρόπρεσας, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.2** που ακολουθεί:

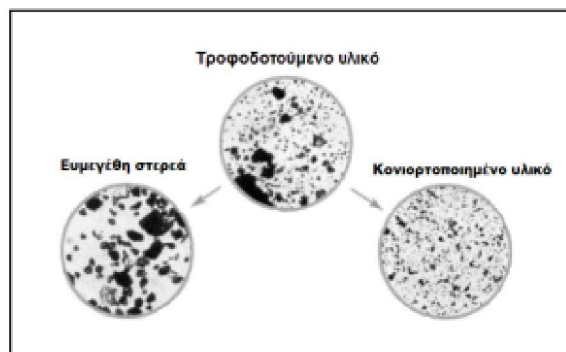
Εφαρμογή	Επί τοις εκατό των πωλήσεων
Ημιτελής Άλεση κλίνκερ	60
Προ-άλεση πρώτων υλών	21
Άλεση τεφρών υψικαμίνου - σκαριών	6.5

Πίνακας 3.2**3.3 Μονάδες μηχανικής διαλογής μεγέθους**

Στο σημείο αυτό, θεωρείται σκόπιμη η αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας των διαχωριστών μεγέθους, για τους οποίους έγινε εκτενής λόγος στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου:

Μονάδες μηχανικής διαλογής μεγέθους (διαχωριστές), καλούνται οι διατάξεις εντός των οποίων πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του τροφοδοτούμενου υλικού με

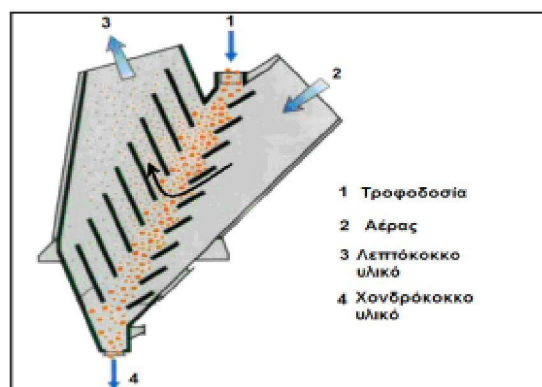
στόχο την απομάκρυνση ευμεγεθών στερεών για την παραγωγή ενός ομοιόμορφου, λεπτόκοκκου κλάσματος.



Εικόνα 3.5: Αποτέλεσμα εφαρμογής διατάξεων μηχανικής διαλογής μεγέθους

Αν και πολλοί τύποι διαχωριστών βρίσκουν εφαρμογή στον βιομηχανικό κλάδο όπως για παράδειγμα οι *φυγοκεντρικοί*, οι *μαγνητικοί* ή οι *παλμικοί* και άλλοι, στις τσιμεντοβιομηχανίες χρησιμοποιούνται κατά βάση *αερο-διαχωριστές*. Η ξηρή και κοκκώδης φύση των υλικών που συμμετέχουν στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου, καθώς και η λεπτόκοκκη υφή του διαχωριζόμενου κλάσματος, επιτρέπουν την εφαρμογή αυτή.

Παράδειγμα αερο-διαχωριστή αποτελεί η διάταξη τύπου **V**, η οποία βρίσκει συχνά εφαρμογή στη βιομηχανία του τσιμέντου (*Εικόνα 3.6*). Στο διαχωριστή τύπου **V**, το ρεύμα αέρα που εισέρχεται στη διάταξη από την είσοδο **-2-**, παρασύρει το λεπτόκοκκο και ελαφρύ κλάσμα του τροφοδοτούμενου υλικού, προς την έξοδο **-3-**, επιτυγχάνοντας το διαχωρισμό του από τα βαρύτερα και ευμεγέθη στερεά τα οποία εξέρχονται από το κάτω μέρος της διάταξης **-4-**.



Εικόνα 3.6: Αερο-διαχωριστής αλεσμένου υλικού τύπου **V** της *KHD Humboldt Wedag AG*

3.4 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της κυλινδρόπρεσας στις γραμμές παραγωγής του τσιμέντου. Παράλληλα παρατίθεται σειρά παραδειγμάτων από βιομηχανίες οι οποίες

υιοθέτησαν στις γραμμές παραγωγής τους κυλινδρόπρεσες σε κυκλώματα ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ ή προ-άλεσης των πρώτων υλών, καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα (ενεργειακά κέρδη, παραγωγικότητα) των εφαρμογών αυτών.

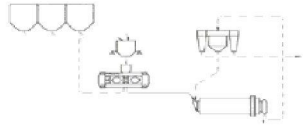
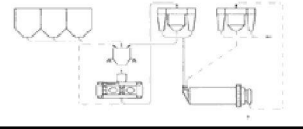
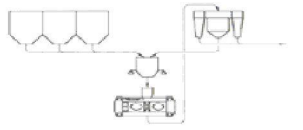
3.4.1 Ποιοτικά αποτελέσματα

Τα ποιοτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της κυλινδρόπρεσας σε κυκλώματα με αερο-διαχωριστές μεγέθους, στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου και πιο συγκεκριμένα στη φάση της ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ, συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία.

1. **Επιτάχυνση** της παραγωγικής διαδικασίας στους μύλους τσιμέντου
2. Σημαντική **αύξηση** της διαθεσιμότητας των μύλων
3. **Εξοικονόμηση** ηλεκτρικής ενέργειας
4. **Περιορισμός** των βλαβών και των εξόδων συντήρησης των μύλων
5. **Αύξηση** του όγκου παραγωγής
6. **Βελτίωση** της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος (απόδοση ομοιόμορφης σκόνης τσιμέντου)

3.4.2 Ποσοτικά αποτελέσματα

Τα αντίστοιχα ποσοτικά αποτελέσματα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το εφαρμοζόμενο κύκλωμα και το αντικείμενο εργασίας του. Στον **Πίνακα 3.3** που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα προσδοκώμενα ενεργειακά κέρδη καθώς και η αναμενόμενη αύξηση του όγκου παραγωγής από τη λειτουργία των κυκλωμάτων ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ, καθώς και προ-άλεσης των πρώτων ή πρόσθετων υλών του τσιμέντου:

	Αύξηση παραγωγής	Εξοικονόμηση ενέργειας	
Ανοικτό κύκλωμα ημιτελούς άλεσης	30 - 40%	10 - 15%	
Κλειστό κύκλωμα ημιτελούς άλεσης	60 - 80%	10 - 20%	
Προ-άλεση πρώτων υλών	60 - 80%	35 - 50%	

Πίνακας 3.3

Πραγματικά δεδομένα, προερχόμενα από ήδη λειτουργούσες διατάξεις ημιτελούς κατεργασίας του κλίνκερ ή των πρώτων υλών του τσιμέντου, σε τσιμεντοβιομηχανίες, παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν:

Τσιμεντοβιομηχανία	Εφαρμοζόμενη διάταξη		
Γαλλία	Κλειστό κύκλωμα ημιτελούς άλεσης κλίνκερ γκρι τσιμέντου		
	Πριν την εφαρμογή	Μετά την εφαρμογή	Αποτέλεσμα
Παραγωγικότητα	75 t/h	135 t/h	↑ 44,4%
Ενεργειακές δαπάνες	42 kwh/t	35,4 kwh/t	↓ 18,6%

Πίνακας 3.4

Τσιμεντοβιομηχανία	Εφαρμοζόμενη διάταξη		
Δανία	Κλειστό κύκλωμα ημιτελούς άλεσης κλίνκερ λευκού τσιμέντου		
	Πριν την εφαρμογή	Μετά την εφαρμογή	Αποτέλεσμα
Παραγωγικότητα	37 t/h	85 t/h	↑ 56,5%
Ενεργειακές δαπάνες	49 kwh/t	31 kwh/t	↓ 58,1%

Πίνακας 3.5

Τσιμεντοβιομηχανία	Εφαρμοζόμενη διάταξη		
Ισπανία	Ανοιχτό κύκλωμα προ-άλεσης ασβεστόλιθου		
	Πριν την εφαρμογή	Μετά την εφαρμογή	Αποτέλεσμα
Παραγωγικότητα	130 t/h	174 t/h	↑ 25,3%
Ενεργειακές δαπάνες	20,1 kwh/t	16,8 kwh/t	↓ 19,6%

Πίνακας 3.6

Τσιμεντοβιομηχανία	Εφαρμοζόμενη διάταξη		
Τουρκία	Ανοιχτό κύκλωμα ημιτελούς άλεσης κλίνκερ γκρι τσιμέντου		
	Πριν την εφαρμογή	Μετά την εφαρμογή	Αποτέλεσμα
Παραγωγικότητα	45 t/h	120 t/h	↑ 62,5%
Ενεργειακές δαπάνες	36 kwh/t	24,5 kwh/t	↓ 46,9%

Πίνακας 3.7

Συνοπτικά, τα άμεσα αποτελέσματα από την εφαρμογή των διατάξεων ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ και προ-άλεσης των πρώτων υλών του τσιμέντου, σημειώνονται παρακάτω:

1. Αύξηση της παραγωγικής ικανότητας από **20 έως 60 %**
2. Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας από **10 έως 25%**
3. Αύξηση της διαθεσιμότητας των σφαιρόμυλων από **180 έως 280%**

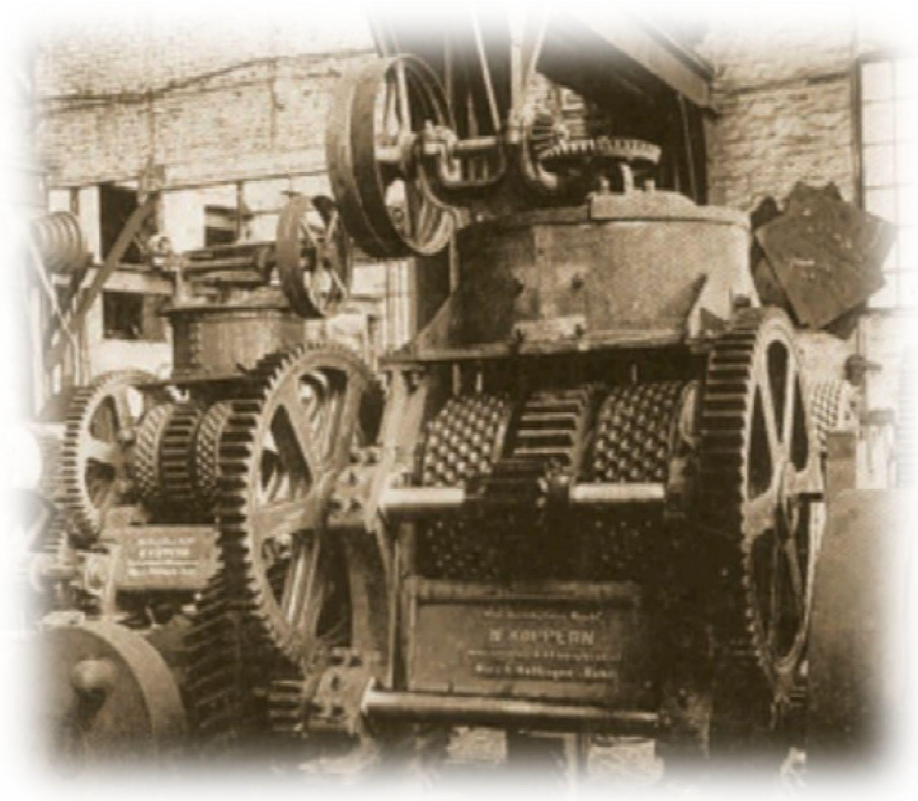
Σήμερα η κυλινδρόπρεσα αναφέρεται ως ένα από τα **οικονομικότερα** και **αποδοτικότερα** συστήματα θραύσης σκληρών υλικών και πετρωμάτων και οι λόγοι που την κατατάσσουν στη θέση αυτή είναι:

- Σε σύγκριση με άλλα παρόμοια συστήματα θραύσης της ίδιας παραγωγικότητας, η κυλινδρόπρεσα παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα απόδοσης συγκεντρωμένων πιέσεων (άνω των 50 MPa) στο υλικό που συνθλίβει.
- Ο χρόνος κατεργασίας του τροφοδοτούμενου υλικού είναι ιδιαίτερα μικρός. Κάθε κόκκος υλικού υπόκειται σε πίεση μεταξύ των κυλίνδρων του σπαστήρα για χρονικό διάστημα της τάξης των δεκάτων του δευτερολέπτου. Το γεγονός αυτό επιφέρει ουσιαστικά αποτελέσματα στον περιορισμό των ενεργειακών δαπανών και της ταυτόχρονης αύξησης της παραγωγικότητας.
- Η σχεδίαση του συστήματος τροφοδοσίας της πρέσας συντελεί στην ομοιόμορφη κατανομή του τροφοδοτούμενου υλικού μεταξύ των κυλίνδρων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ομοιόμορφη φόρτιση του σχηματιζόμενου στρώματος υλικού με άμεσα αποτελέσματα στον περιορισμό των ενεργειακών δαπανών, στην αύξηση της παραγωγικότητας και στη βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος.
- Στο σύστημα τροφοδοσίας της κυλινδρόπρεσας, η μεταφορά του τροφοδοτούμενου υλικού προς το σημείο κατεργασίας του βασίζεται αποκλειστικά στη δύναμη της βαρύτητας (βαρυτικό σύστημα τροφοδοσίας), με αποτέλεσμα τη σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4_ο

Κυλινδρόπρεσα



Εικόνα: Μοντέλο κυλινδρόπρεσας μπριγκετοποίησης ορυκτού κάρβουνου του 19^{ου} αιώνα

4.1 Εισαγωγή – Ιστορική αναδρομή

Κυλινδρόπρεσα (*High pressure grinding roller press*) καλείται ο τύπος θραυστήρα, ο οποίος χρησιμοποιεί δυο οριζόντιους και αντίθετα περιστρεφόμενους συμπαγείς μεταλλικούς κυλίνδρους, με υδραυλικά ρυθμιζόμενο διάκενο, για τη θραύση και νιφάδοποίηση ευμεγεθών ορυκτών πετρωμάτων, μεταλλευμάτων και άλλων εύθρυπτων υλικών χαμηλής, μεσαίας και υψηλής σκληρότητας. Πρωτοπόρες εταιρείες στον τομέα της κατασκευής και εμπορίας κυλινδροπρεσών θεωρούνται οι Γερμανικές: **Krupp-Polysius AG** και **KHD Humboldt Wedag AG**, καθώς και η Αυστριακή **Maschinenfabrik Koeppern GmbH & Co.KC** με έτος ιδρύσεως το 1898.

Η ιστορία της κυλινδρόπρεσας ξεκινά από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και φθάνει ως τις μέρες μας με ποικίλες βιομηχανικές εφαρμογές. Το έναυσμα για τη κατασκευή και λειτουργία της πρώτης κυλινδρόπρεσας δόθηκε από τη διαδικασία παραγωγής ενέργειας μέσω της καύσης γαιανθράκων. Έτσι κατασκευάστηκε η πρώτη κυλινδρόπρεσα παρασκευής *μπριγκέτων* ορυκτού κάρβουνου. **Μπριγκετοποίηση** καλείται η διαδικασία κατά την οποία οι νιφάδες ενός λεπτόκοκκου υλικού συμπιέζονται, για να σχηματίσουν συμπαγή τεμάχια μεγαλύτερου όγκου (*μπριγκέτες*).



Εικόνα 4.1: Μπριγκετοποίηση και μπριγκέτες

Από το 1933, μηχανικοί όπως ο *W.F.Carey* και ο *H.Rumpf*, αναγνωρίζοντας τα πλεονεκτήματα από τη λειτουργία της κυλινδρόπρεσας στον τομέα της μπριγκετοποίησης, πειραματίστηκαν για την εφαρμογή της στη θραύση και νιφάδοποίηση ευμεγεθών ορυκτών πετρωμάτων. Οι έρευνες καρποφόρησαν με αποτέλεσμα στα μέσα της δεκαετίας του '70 να λειτουργήσει πειραματικά, σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες, η πρώτη *κυλινδρόπρεσα-θραυστήρας* από τον *F.Feige*. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε σταθμό στην ιστορία αυτής της τεχνολογίας και το προοίμιο της μετέπειτα αλματώδους ανάπτυξης, τόσο της τεχνολογίας των κυλινδροπρεσών όσο και των πωλήσεων τους σε παγκόσμιο επίπεδο. Το πρώτο κατά παραγγελία σύστημα θραύσης κατασκευάστηκε από τις συνεργαζόμενες *Krupp-Polysius AG* και *KHD Humboldt Wedag AG* στα τέλη του 1985. Σήμερα οι κυλινδρόπρεσες συγκρινόμενες με άλλα ομότυπα συστήματα, αναφέρονται ως μια από τις αποτελεσματικότερες μεθοδολογίες θραύσης κοκκωδών και εύθρυπτων υλικών.

4.2 Εφαρμογές στη βιομηχανία

Οι κυλινδρόπρεσες χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στις τσιμεντοβιομηχανίες, για την αύξηση της παραγωγικής τους ικανότητας στις κρατούσες συνθήκες επεξεργασίας των πρώτων υλών του τσιμέντου (ασβεστόλιθος, τέφρες, σκωρίες κ.α.). Αργότερα η εφαρμογή τους επεκτάθηκε και στη φάση της κατεργασίας του ενδιάμεσου κλίνκερ. Αυτό εξακολουθεί μέχρι και σήμερα, αφού περίπου το 90% των πωλήσεων κυλινδροπρεσών παγκοσμίως αφορούν τη βιομηχανία του τσιμέντου.

Ωστόσο τα ουσιαστικά οφέλη από τη λειτουργία της κυλινδρόπρεσας στη βιομηχανία του τσιμέντου, είχαν σαν αποτέλεσμα την επέκταση της εφαρμογής της και σε άλλους τομείς της μεταποιητικής βιομηχανίας και της βιομηχανίας επεξεργασίας μη μεταλλικών ορυκτών όπως:

- οι βιομηχανικές μονάδες παραγωγής χημικών και λιπασμάτων
- οι βιομηχανίες επεξεργασίας ορυκτών μεταλλευμάτων
- οι αδαμαντοβιομηχανίες,
- οι ασβεστοποιίες κ.α.

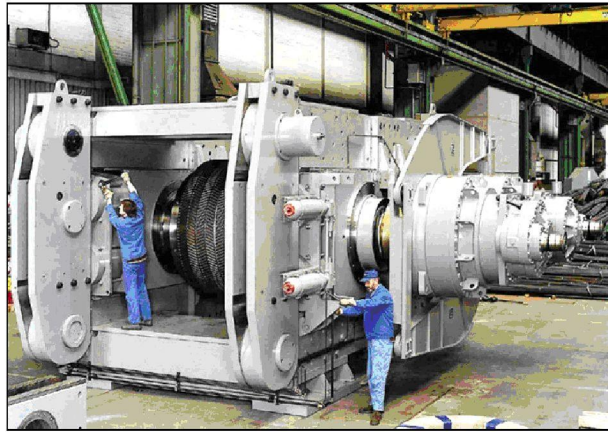
Στον **Πίνακα 4.1** που ακολουθεί παρουσιάζονται στοιχεία αναφορικά με τη συχνότητα εφαρμογής της κυλινδρόπρεσας, στους διάφορους βιομηχανικούς τομείς:

Βιομηχανικοί Τομείς	Επί τοις (%) των πωλήσεων
Βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου	87.5
Βιομηχανίες επεξεργασίας ορυκτών μεταλλευμάτων	7.0
Λουπές (ασβεστοποιίες, αδαμαντοβιομηχανίες κ.α.)	5.5

Πίνακας 4.1

Η μεγαλύτερη κυλινδρόπρεσα που έχει κατασκευαστεί μέχρι σήμερα, αποτελεί προϊόν της **Krupp-Polysius AG** και είναι εξοπλισμένη με ένα ζεύγος κυλίνδρων διαμέτρου 2000mm και πλάτους 1000mm (**Εικόνα 4.2**). Το βάρος του κάθε κυλίνδρου αγγίζει τους 40 τόνους, ενώ το συνολικό βάρος της μηχανής (χωρίς τους ηλεκτροκινητήρες της) φθάνει τους 260 τόνους. Η κίνηση στους κυλίνδρους δίνεται από δύο κινητήρες των 1250 kW ενώ η συνολική δύναμη πίεσης που μπορεί να αποδώσει η πρέσα στο υλικό που διέρχεται μεταξύ των κυλίνδρων της, φθάνει τα 20 kN/mm.

Η παραγωγική ικανότητα συστημάτων αυτής της κλίμακας φθάνει τους 1000 τόνους ανά ώρα λειτουργίας και βρίσκουν συχνά εφαρμογή σε μεγάλες τσιμεντοβιομηχανίες όπως: της Νορβηγίας, της Κορέας, της Ισπανίας, του Βελγίου και αλλού, για την κατεργασία κυρίως των πρώτων υλών του τσιμέντου και του ενδιάμεσου κλίνκερ.



Εικόνα 4.2: Θραυστήρας της Krupp-Polysius AG βάρους 260ton

4.3 Βασικές αρχές λειτουργίας

Κάθε κυλινδρόπρεσα που λειτουργεί σήμερα στη βιομηχανία, αποτελεί ένα σύνολο κατοχυρωμένων ευρεσιτεχνιών, οι οποίες προβλέπουν και καθορίζουν τη μεθοδολογία κατασκευής κάθε λειτουργικού υποσυστήματος του θραυστήρα. Κατά συνέπεια, κάθε βιομηχανία που δραστηριοποιείται στον τομέα της κατασκευής κυλινδροπρεσών, παράγει τους θραυστήρες της κατέχοντας τις άδειες πατενταρισμένων κατασκευαστικών μεθοδολογιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εταιρείες Krupp-Polysius AG και KHD Humboldt Wedag AG, οι οποίες κατέχουν από κοινού την άδεια της πατέντας του Dr. Schoenert που προβλέπει αυστηρά τη μεθοδολογία κατασκευής του συστήματος τροφοδοσίας, των κυλίνδρων και του υδραυλικού συστήματος του θραυστήρα, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη φόρτιση του στρώματος υλικού και η αποτελεσματική κατεργασία του.

Παρ' όλα αυτά η εκτεταμένη έρευνα πάνω στον τρόπο βελτίωσης των παραγόμενων κυλινδροπρεσών από το σύνολο των εταιρειών που επιχειρούν στον κλάδο αυτό, οδήγησε σε σημείο όπου, από μηχανολογική σκοπιά, λίγες και χαμηλής σημασίας είναι οι διαφορές που μπορεί να εντοπίσει κανείς στα συστήματα θραύσης που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά. Έτσι οι όποιες παραλλαγές, παρατηρούνται κατά βάση: στο σύστημα των εδράνων κύλισης, στις διατάξεις κίνησης των κυλίνδρων και στα μεταλλικά πλαίσια των μηχανών. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα περιγραφούν τα σημαντικότερα υποσυστήματα της κυλινδρόπρεσας, τα οποία συντελούν στη λειτουργία του μηχανήματος και θα εντοπιστούν οι όποιες διαφορές υπάρχουν σε αυτές, ανάλογα με την κατασκευάστρια εταιρεία.

4.4 Λειτουργικά υποσυστήματα

4.4.1 Σύστημα τροφοδοσίας

Το σύστημα τροφοδοσίας το οποίο εγκαθίσταται στο άνω μέρος του πλαισίου της μηχανής παρέχει στο θραυστήρα συνεχή και ελεγχόμενη ροή υλικού, η οποία καταλήγει απευθείας στο διάκενο μεταξύ των κυλίνδρων.

Δύο είναι οι συνήθως εφαρμοζόμενοι τύποι συστημάτων τροφοδοσίας:

- Τα **απλά ή βαρυτικά συστήματα**: τα οποία βασίζονται αποκλειστικά στη δύναμη της βαρύτητας για τη μεταφορά του υλικού προς το διάκενο των κυλίνδρων και
- Τα **σύνθετα συστήματα**: στα οποία η ροή του υλικού υποβοηθάται από έναν ή δύο ή και περισσότερους μεταφορικούς κοχλίες.

Ο τύπος του συστήματος τροφοδοσίας το οποίο θα επιλεγεί και θα εφαρμοστεί στην εκάστοτε βιομηχανική εφαρμογή της κυλινδρόπρεσας εξαρτάται από:

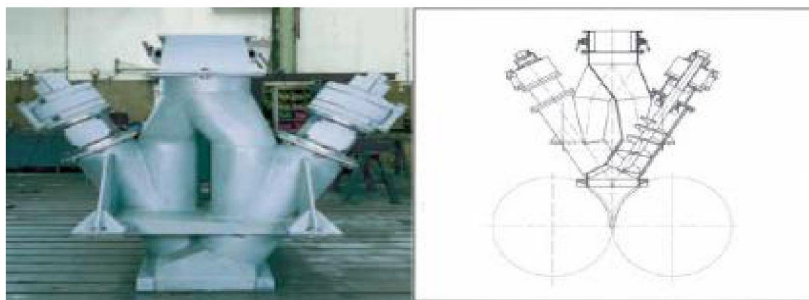
- Τον απαιτούμενο όγκο παραγωγής και
- Από τα χαρακτηριστικά του προς κατεργασία υλικού (*κυρίως την κοκκομετρία και τη μάζα των κόκκων του υλικού*).

Στα **απλά ή βαρυτικά συστήματα τροφοδοσίας**, η μεταφορά του υλικού πραγματοποιείται πάνω σε κατακόρυφους ή λοξούς αγωγούς τροφοδοσίας που καταλήγουν ακριβώς πάνω από το διάκενο των κυλίνδρων. Για το λόγο αυτό, αυτού του τύπου τα συστήματα τοποθετούνται σε κυλινδρόπρεσες που κατεργάζονται χονδρόκοκκα και μεσαίας ή μεγάλης πυκνότητας υλικά όπως, τα μεταλλεύματα, το κλίνκερ τσιμέντου κ.α. Οι διαστάσεις, η κατασκευή και ο τρόπος τοποθέτησης των αγωγών πάνω στη μηχανή είναι τέτοια, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή παροχή τροφοδοσίας καθώς και η ομοιόμορφη κατανομή του υλικού στη χοάνη, σχηματίζοντας ένα ισοπαχές στρώμα ύλης (**κουβέρτα**) σε όλο το πλάτος των κυλίνδρων.

Τα **σύνθετα συστήματα τροφοδοσίας**, χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου η μηχανή κατεργάζεται λεπτόκοκκα και ελαφριά υλικά, όπου η χρήση του απλού βαρυτικού συστήματος δεν αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα στο επίπεδο της παραγωγικότητας του θραυστήρα. Έτσι κατά την εφαρμογή των σύνθετων συστημάτων τροφοδοσίας, εγκαθίστανται ένας ή δύο ή και παραπάνω μεταφορικοί κοχλίες (*ανάλογα το μέγεθος της πρέσας και τον απαιτούμενο όγκο παραγωγής*), οι οποίοι υποβοηθούν τη μεταφορά του υλικού. Οι κοχλίες, βρισκόμενοι υπό μικρή κλίση και κινούμενοι από ανεξαρτήτους ηλεκτροκινητήρες, συλλέγουν τα στερεά από τον κατακόρυφο κύριο αγωγό τροφοδοσίας του θραυστήρα και τα οδηγούν ακριβώς μέσα στη χοάνη των κυλίνδρων.

Η εφαρμογή των σύνθετων συστημάτων έχει ως αποτέλεσμα:

- Την επιτάχυνση της ροής υλικού προς το σημείο κατεργασίας και
- Τη συμπύκνωση των λεπτόκοκκων στερεών.



Εικόνα 4.3: Σύστημα τροφοδοσίας με δύο μεταφορικούς κοχλίες



Εικόνα 4.4: Κυλινδρόπρεσα με σύνθετο σύστημα τροφοδοσίας τεσσάρων μεταφορικών κοχλιών

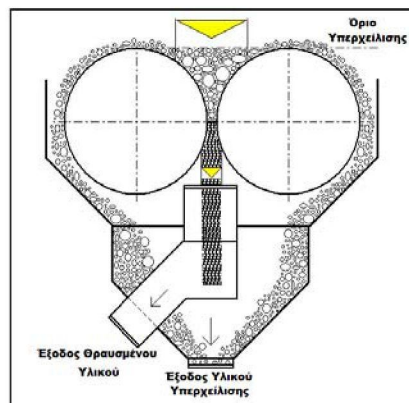
Η σκοπιμότητα της εφαρμογής των συστημάτων τροφοδοσίας (βαρυτικού ή σύνθετου) στη λειτουργία της κυλινδρόπρεσας, εντοπίζεται στα ακόλουθα σημεία:

- 1 Στη δημιουργία ομοιόμορφου στρώματος υλικού μεταξύ των κυλίνδρων
- 2 Στον έλεγχο του ρυθμού τροφοδοσίας

Ο **ρυθμός τροφοδοσίας** όταν υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή, η οποία καλείται **παροχή λειτουργίας**, δεν επιφέρει καμία αύξηση στην παραγωγικότητα. Αντίθετα προκαλεί τη μείωσή της και την ταυτόχρονα σοβαρή υποβάθμιση της ποιότητας του κατεργασμένου υλικού (ανομοιόμορφη θραύση). Αυτό συμβαίνει διότι το πλεονάζον υλικό διαφεύγει από την πίσω πλευρά των κυλίνδρων, λόγω του κορεσμού της χοάνης και επανατροφοδοτείται στο θραυστήρα επιβαρύνοντας τη λειτουργία του.

Παράλληλα, η δημιουργία ομοιόμορφου στρώματος υλικού, σε όλο το πλάτος της ζώνης κατεργασίας των κυλίνδρων, επιτρέπει την ομοιόμορφη φόρτιση του με αποτέλεσμα:

- Την αύξηση του όγκου παραγωγής,
- Την ταυτόχρονη εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και
- Την βελτίωση της ποιότητας του εξερχόμενου προϊόντος (ομοιόμορφη θραύση).



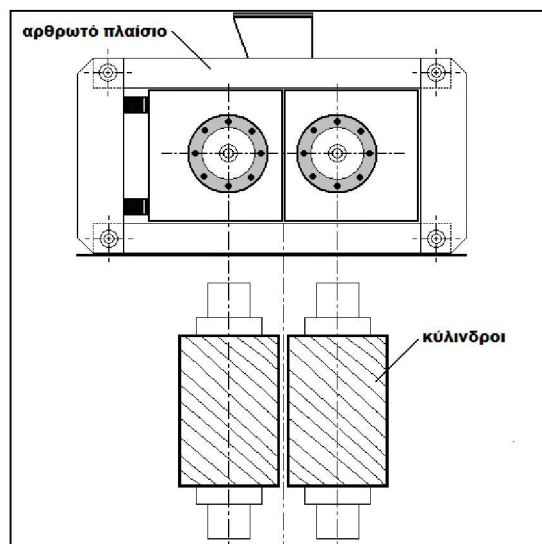
Εικόνα 4.5: Υπερχείλιση και συλλογή ακατέργαστου υλικού στο κάτω μέρος του θραυστήρα

Εμπειρικά η **βέλτιστη παροχή λειτουργίας**, για τις περισσότερες των περιπτώσεων, είναι εκείνη με την οποία μόλις γεμίζει το διάκενο των κυλίνδρων, ενώ εξαρτάται από:

- το εφαρμοζόμενο διάκενο των κυλίνδρων,
- τα χαρακτηριστικά του τροφοδοτούμενου υλικού (*σκληρότητα, κοκκομετρία*) και
- τις εφαρμοζόμενες συνθήκες κατεργασίας (*δύναμη πίεσης, περιφερειακή ταχύτητα κυλίνδρων*),

4.4.2 Σύστημα περιστρεφόμενων κυλίνδρων

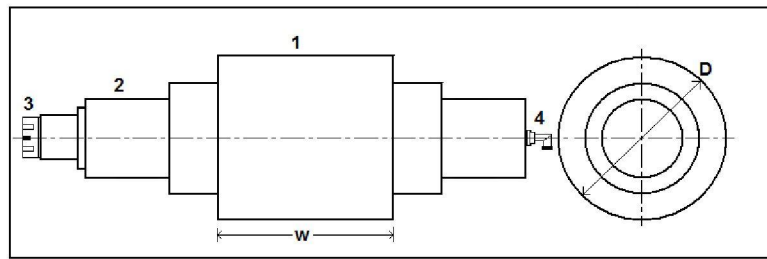
Οι κυλινδρόπρεσες είναι εξοπλισμένες με ένα ζεύγος όμοιων, συμπαγών, μεταλλικών κυλίνδρων, από σφυρήλατο χάλυβα. Οι κύλινδροι, εγκαθίστανται σε οριζόντια και ισαπέχουσα, από το επίπεδο έδρασης της μηχανής θέση, μέσα στο αρθρωτό πλαίσιο, ενώ οι άξονες περιστροφής τους βρίσκονται σε παράλληλη θέση. Επιπρόσθετα οι επιφάνειες κατεργασίας των κυλίνδρων, διατηρούν μια προκαθορισμένη από τον κατασκευαστή οριζόντια απόσταση, **διάκενο λειτουργίας**, παράγοντας ο οποίος καθορίζει και το βαθμό άλεσης του κατεργαζόμενου υλικού. Το διάκενο αυτό, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, κυμαίνεται από 5mm μέχρι μερικά εκατοστά του μέτρου.



Εικόνα 4.6

Σε κάθε κύλινδρο διακρίνονται τέσσερεις σημαντικές ζώνες οι οποίες παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.7**:

- 1 Η ζώνη κατεργασίας
- 2 Οι στροφείς
- 3 Το σημείο ζεύξης με τους ηλεκτροκινητήρες και
- 4 Το σημείο σύνδεσης με το κύκλωμα ψύξης



Εικόνα 4.7

Η **ζώνη κατεργασίας** είναι το τμήμα στο οποίο συντελείται η θραύση του υλικού. Φέρει επιφανειακές προστατευτικές επενδύσεις που αποτρέπουν την φθορά του κύριου μεταλλικού κορμού των κυλίνδρων, ενώ οι διαστάσεις της ζώνης αυτής, *διάμετρος (D)* και *πλάτος (W)*, καθορίζουν άμεσα την παραγωγικότητα του μηχανήματος (*kg υλικού / h λειτουργίας*). *Εν γένει, η αύξηση της διαμέτρου και του πλάτους της ζώνης κατεργασίας, επιφέρει αύξηση του όγκου παραγωγής.*

Οι κατασκευάστριες εταιρείες εφαρμόζουν ανάλογα με το μέγεθος και τη δυναμικότητα των παραγόμενων κυλινδρόπρεσών, ένα εύρος διαμέτρων που κυμαίνεται από τα *900mm* έως τα *2800mm*, ενώ το πλάτος της ζώνης καθορίζεται βάση ενός *συντελεστή αναλογίας* μεταξύ των δύο μεγεθών. Ο συντελεστής αυτός δεν είναι τυποποιημένος για όλες τις κυλινδρόπρεσες, αλλά καθορίζεται από την εκάστοτε εταιρεία και την πατέντα που εφαρμόζει για την παραγωγή των μηχανημάτων της. Οι κύλινδροι της *Krupp-Polysius AG* κατασκευάζονται με συντελεστή αναλογίας (κατά βάση) $W/D < 0,5$, ενώ η *Maschinenfabrik Kopperrn GmbH & Co.KC* εφαρμόζει συντελεστή αναλογίας από *0,5* έως *1,0*.



Εικόνα 4.8

Εφεδρικός κύλινδρος κατεργασίας κλίνκερ στη μονάδα της TITAN στο Καμάρι Βοιωτίας
Κατασκευή: *Maschinenfabrik Kopperrn GmbH & Co.KC* - **Διαστάσεις:** $D = 1000 \text{ mm}$, $W = 920 \text{ mm}$

4.4.2.1 Προστατευτικές επενδύσεις

Η αυξημένη καταπόνηση της επιφάνειας των κυλίνδρων, στη ζώνη κατεργασίας, εξαιτίας της σύνθλιψης και θραύσης σκληρών και κάποιες φορές διαβρωτικών υλικών, επιβάλλει την προσθήκη προστατευτικών επιφανειακών επενδύσεων (*αφαιρούμενες ή μη*), από βελτιωμένους χάλυβες και σκληρά κράματα μετάλλων. Οι προστατευτικές επενδύσεις, καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια κατεργασίας, με αποτέλεσμα να δέχονται όλη τη φθορά της παραγωγικής

διαδικασίας, αφήνοντας το κυρίως σώμα των κυλίνδρων ανέπαφο. Επιπλέον, κατά τη φάση της προγραμματισμένης συντήρησης, αντικαθίστανται ή επιδιορθώνονται μόνο οι προστατευτικές διατάξεις, γεγονός που επιφέρει σημαντικά οφέλη τόσο στο οικονομικό, όσο και στο χρονικό κόστος συντήρησης του μηχανήματος. Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής των προστατευτικών επενδύσεων στη λειτουργία των κυλινδροπρεσών, εντοπίζονται στα παρακάτω σημεία:

1. Μειώνεται σημαντικά το κόστος συντήρησης της μηχανής
2. Γίνεται δυνατή η κατασκευή κυλίνδρων από φθηνότερους χάλυβες
3. Για την κατασκευή των επενδύσεων γίνεται δυνατή η χρήση υλικών σκληρών και δύσσηκτων υλικών, η χρήση των οποίων θα ήταν απαγορευτική για τη δημιουργία ολόκληρου του κυλίνδρου
4. Επιτρέπεται η χρήση ακριβών μετάλλων και κραμάτων χωρίς αυτό να επηρεάζει σημαντικά το κόστος κατασκευής και συντήρησης του μηχανήματος, αφού αυτά χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες
5. Σχεδόν τριπλασιάζεται ο χρόνος διαθεσιμότητας του μηχανήματος (*αύξηση διάρκειας ζωής κυλίνδρων*).



Εικόνα 4.9

- **Αριστερά:** κατεστραμμένη επιφάνεια ζώνης κατεργασίας κυλίνδρου, χωρίς προστατευτική διάταξη μετά από **2500h** λειτουργίας
- **Δεξιά:** κύλινδρος με προστατευτικό επίθεμα από σκληρό κράμα **Hexadur** μετά από **6500h** λειτουργίας

Φθορές

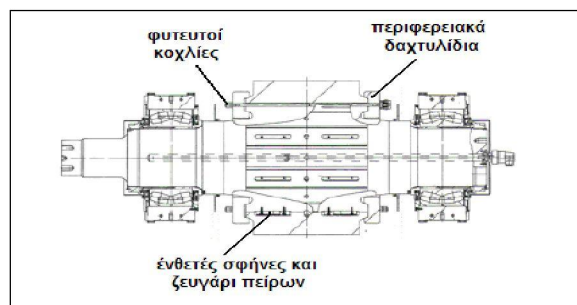
Το είδος και η έκταση της φθοράς που μπορεί να υποστεί η επιφάνεια της ζώνης κατεργασίας, συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου υλικού (*σκληρότητα, υγρασία, χημικά χαρακτηριστικά*) και τη δυναμικότητα του μηχανήματος (*εφαρμοζόμενη πίεση στο στρώμα του υλικού*). Γενικά, μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες, συνήθως εμφανιζόμενες, φθορές της επιφανείας των κυλίνδρων:

- **Διάβρωση:** εμφανίζεται κατά κύριο λόγο στις πρέσες που λειτουργούν σε βιομηχανίες παρασκευής λιπασμάτων ή χημικών προϊόντων.
- **Τοπική και εκτενής θραύση της μεταλλικής επιφανείας:** εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στις γραμμές παραγωγής όπου η πρέσα καλείται να κατεργαστεί σκληρά υλικά όπως ορυκτά μεταλλεύματα και συναφή πετρώματα (*πυριτικά κ.α.*).
- **Φθορές από λεπτόκοκκα ή πλαστικά & μαλακά υλικά:** τέτοιου είδους υλικά μπορούν να αποτελέσουν την αιτία προβλημάτων στην τροφοδοσία του μηχανήματος, θραύσεις και διάβρωση της επιφανείας των κυλίνδρων (*λεπτόκοκκα υλικά υψηλής σκληρότητας και διαβρωτικότητας*) και προβλήματα στα έδρανα κύλισης.

Εφαρμοζόμενες προστατευτικές διατάξεις:

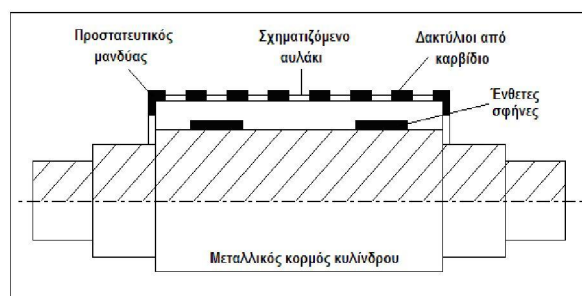
Οι επιπτώσεις των παραπάνω, στη λειτουργία της κυλινδρόπρεσας, μπορούν να περιοριστούν αποτελεσματικά, με την εφαρμογή της κατάλληλης, κατά περίπτωση, προστατευτικής επένδυσης στους κυλίνδρους του θραυστήρα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συχνότερα εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες προστασίας των κυλίνδρων στη βιομηχανία:

1. **Προστατευτικοί δακτύλιοι από βελτιωμένους χάλυβες και σκληρά κράματα μετάλλων** όπως ο λευκός χυτοσίδηρος και το κράμα Hexadur (πατέντα της *Maschinenfabrik Kopperrn GmbH & Co.KC*). Η παρούσα μεθοδολογία εντάσσεται στην κατηγορία των αφαιρούμενων προστατευτικών διατάξεων και χρησιμοποιείται ευρύτατα στις περιπτώσεις όπου τα προς κατεργασία υλικά, είναι σκληρά και διαβρωτικά όπως: τα μεταλλεύματα, τα χημικά άλατα, η ποτάσα κ.α.



Εικόνα 4.10: Πρόσθετος προστατευτικός δακτύλιος από λευκό χυτοσίδηρο

2. **Διαμόρφωση stud lining (αφαιρούμενη διάταξη):** Χρησιμοποιείται στην περίπτωση επεξεργασίας λεπτόκοκκων ή πλαστικών και μαλακών υλικών. Στην συγκεκριμένη διάταξη οι κύλινδροι ντύνονται με ένα προστατευτικό χυτό χιτώνιο, πάνω στο οποίο προσαρμόζονται αντιολισθητικά πέλματα από καρβίδιο. Τα πέλματα καρβιδίου παρέχουν την απαιτούμενη σκληρότητα στη διάταξη ώστε να ανθίσταται στη φθορά, ενώ τα αυλάκια που σχηματίζονται ανάμεσα στα πέλματα, λειτουργούν ως οδηγοί για το λεπτόκοκκο υλικό.

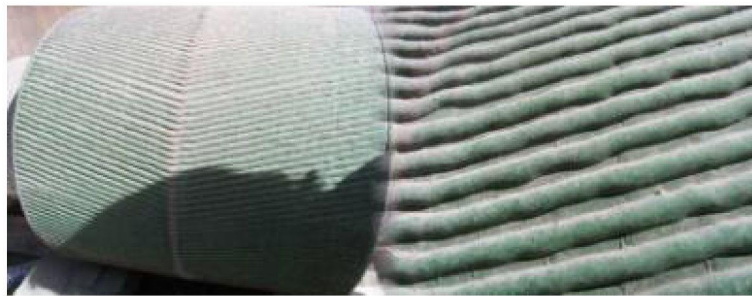


Εικόνα 4.11: Διαμόρφωση stud lining

3. **Επιφανειακή επένδυση με κορδόνια από σκληρό ηλεκτρόδιο (μη αφαιρούμενη διάταξη):** Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη προστατευτική επένδυση στη βιομηχανία του τσιμέντου, η οποία αποδίδει ικανοποιητικά

αποτελέσματα για υλικά μεσαίας σκληρότητας και χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία, όπως το κλίνκερ. Στην εφαρμογή αυτή, η επιφάνεια κατεργασίας των κυλίνδρων καλύπτεται από πυκνό δίκτυο παράλληλων ή διασταυρούμενων κορδονιών, από σκληρό ηλεκτρόδιο, το οποίο δημιουργείται με τη χρήση αυτόματων συγκολλητικών μηχανών σε αδρανή ατμόσφαιρα.

Κατά τη φάση της συντήρησης, εφεδρικοί κύλινδροι αντικαθιστούν τους παλαιούς, οι οποίοι οδηγούνται για αναγόμευση της φθαρμένης επιφάνειάς τους. Η συντήρηση των κυλίνδρων σε θραυστήρες οι οποίοι κατεργάζονται κλίνκερ και φέρουν αυτού του είδους την προστατευτική επένδυση, πραγματοποιείται περίπου κάθε **17000h** λειτουργίας.



Εικόνα 4.12: Δίκτυο παράλληλων κορδονιών στην επιφάνεια κατεργασίας εφεδρικού κυλίνδρου, στη μονάδα παραγωγής τσιμέντου της TITAN στο Καμάρι Βοιωτίας

4.4.3 Μεταλλικά πλαίσια στήριξης των κυλίνδρων

Κάθε κύλινδρος εδράζεται σε ένα ζεύγος αντικριστών μεταλλικών πλαισίων, εντός των οποίων τοποθετούνται οι διαιρετές φωλιές με τα έδρανα κύλισης. Στο εσωτερικό των πλαισίων εγκαθίσταται επιπλέον κύκλωμα ροής ψυκτικού μέσου, για τη ψύξη της φωλιάς και του εξωτερικού δακτυλίου των εδράνων.



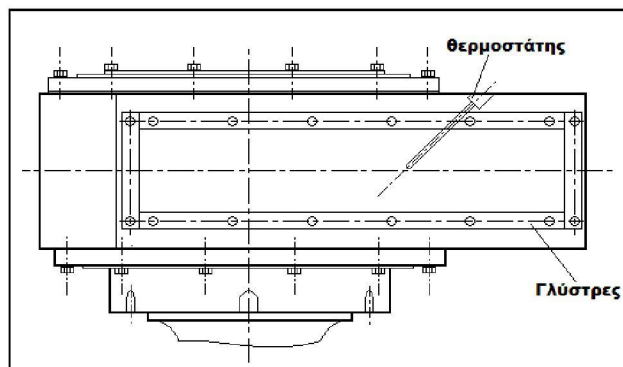
Εικόνα 4.13: Κύλινδρος με τα πλαίσια στήριξης

Τα πλαίσια του ενός εκ των δύο κυλίνδρων, εγκαθίστανται σταθερά (πακτώνονται) μέσα στο αρθρωτό σώμα της μηχανής, επιτρέποντας μόνο την περιστροφή του κυλίνδρου. Αντίθετα τα πλαίσια του άλλου, υποστηριζόμενα από δύο ζεύγη υδραυλικών εμβόλων εδράζονται μαζί με τον κύλινδρο πάνω σε γλίστρες, επιτρέποντας του (εκτός της περιστροφής) και μια επιπλέον **οριζόντια ελαστική κίνηση**.



Εικόνα 4.14: 1-Κινητός κύλινδρος, 2-Σταθερός κύλινδρος, 3-Διάκενο κυλίνδρων, 4-Αρθρωτό σώμα μηχανής

Οι γλίστρες τοποθετούνται στο άνω και κάτω μέρος του πλαισίου στήριξης του κυλίνδρου, καθώς και στο άνω και κάτω πλαίσιο του σώματος της μηχανής και κατασκευάζονται συνήθως από ορείχαλκο ή κάποιο άλλο μαλακό μέταλλο. Παράλληλα φέρουν μόνιμη λίπανση από γράσο μεγάλου ιξώδους.



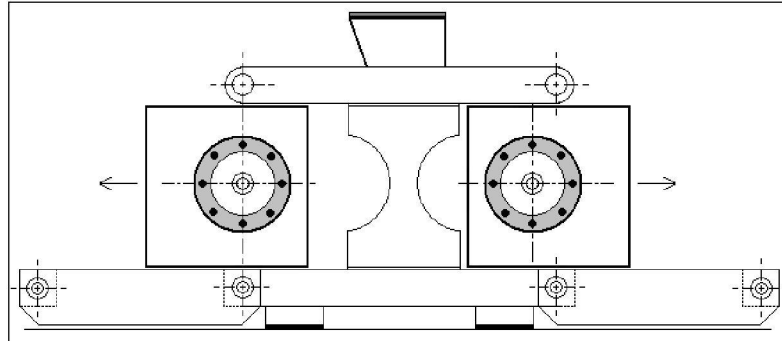
Εικόνα 4.15: Γλίστρες στο κάτω μέρος του πλαισίου στήριξης

4.4.4 Αρθρωτό σώμα μηχανής

Ο σκελετός της κυλινδρόπρεσας κατασκευάζεται από χαλύβδινα στοιχεία τα οποία συνδέονται με αφαιρούμενους πείρους, για να σχηματίσουν μια ορθογώνια παραλληλόγραμμη δομή η οποία καλείται **αρθρωτό σώμα** της μηχανής. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί πατέντα της *Maschinenfabrik Koppert* και επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη αντικατάσταση των κυλίνδρων κατά τη φάση της συντήρησης. Ωστόσο αρθρωτά πλαίσια μηχανών έχουν κατασκευαστεί και από άλλες εταιρείες, χωρίς όμως αυτά να παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές.

Δύο οριζόντια μεταλλικά πλαίσια (άνω και κάτω) συνδέονται μέσω αρθρώσεων με κατακόρυφους φορείς, σχηματίζοντας το κουβούκλιο της πρέσας. Μέσα στο αρθρωτό σώμα εγκαθίστανται τα μεταλλικά πλαίσια στήριξης των κυλίνδρων, ενώ στο άνω πλαίσιο τοποθετείται και το σύστημα τροφοδοσίας του θραυστήρα. Κατά τη διαδικασία της συντήρησης, τα τέσσερα ακραία κατακόρυφα

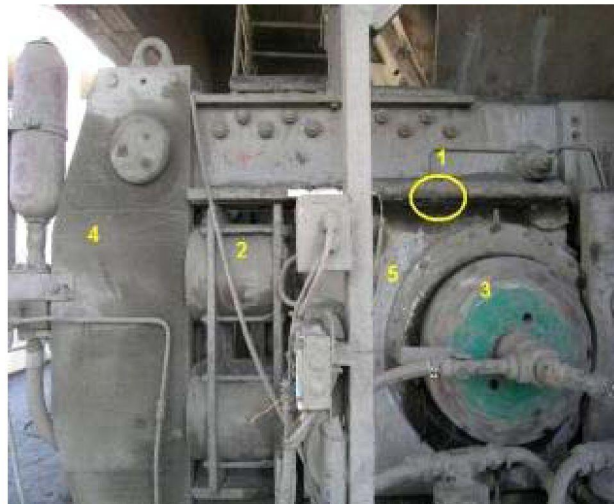
χαλύβδινα στοιχεία αποσυνδέονται από τις αρθρώσεις τους και αποτίθενται διευκολύνοντας την ολίσθηση επί αυτών και αφαίρεση των πλαισίων στήριξης μαζί με τους κυλίνδρους (βλ. **εικόνα 4.16**).



Εικόνα 4.16



Εικόνα 4.17: Αρθρωτό σώμα κυλινδρόπρεσας της Maschinenfabrik Koppert

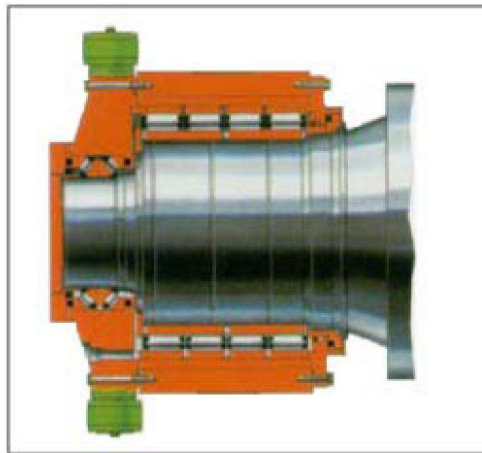


Εικόνα 4.18: Κυλινδρόπρεσα της Maschinenfabrik Koppert στη μονάδα της TITAN στο Καμάρι Βοιωτίας

- 1-Γλίστρες και λίπανση, στο άνω μέρος του πλαισίου στήριξης του κινούμενου κυλίνδρου
- 2-Ζευγάρι υδραυλικών εμβόλων μέσα στο πλαίσιο στήριξής τους
- 3-Πώματα κυλίνδρου
- 4-Κατακόρυφος φορέας αρθρωτού σώματος μηχανής
- 5-Κινούμενο μεταλλικό πλαίσιο στήριξης

4.4.5 Έδρανα με στοιχεία κυλίσεως

Στις κυλινδρόπρεσες μεσαίας και μεγάλης δυναμικότητας χρησιμοποιούνται κατά βάση *αυτορρύθμιστα κυλινδρικά έδρανα διπλής ή πολλαπλής σειράς*, ενώ στα μικρότερα συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως *αυτορρύθμιστα σφαιρικά έδρανα μονής ή διπλής σειράς*. Ενίοτε, γίνεται παράλληλη χρήση *αξονικών εδράνων*, κυρίως σε θραυστήρες της *KHD Humboldt Wedag AG*, τα οποία παραλαμβάνουν τα αξονικά φορτία που προκύπτουν από τη λειτουργία των κυλίνδρων και τα μεταφέρουν στο σώμα της μηχανής. Τα αυτορρύθμιστα έδρανα κύλισης βρίσκουν συχνή εφαρμογή στις κυλινδρόπρεσες, διότι μπορούν να παρακολουθούν και να προσαρμόζονται αυτόματα στις παραμορφώσεις της ατράκτου, οι οποίες μπορούν να προκληθούν από πιθανή ανομοιομορφία του πάχους του τροφοδοτούμενου στρώματος υλικού.



Εικόνα 4.19: Άξονας κυλίνδρου της *KHD Humboldt Wedag AG* τοποθετημένος σε τετραπλής σειράς κυλινδρικό έδρανο με παράλληλη εφαρμογή αξονικού εδράνου

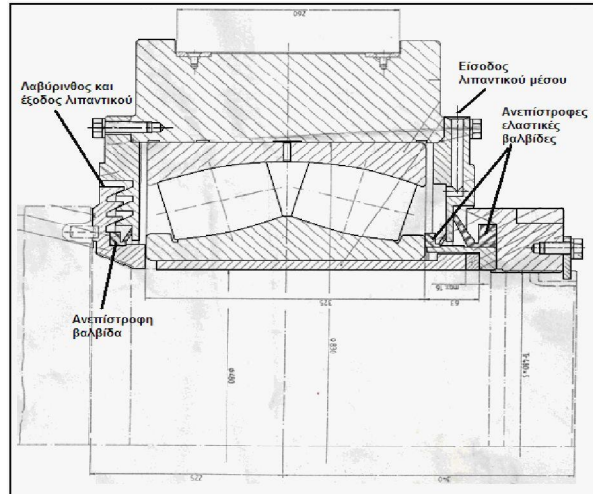
Πέραν αυτών, σε θραυστήρες υψηλής δυναμικότητας, οι οποίοι κατεργάζονται κοκκώδη υλικά μεγάλης διαμέτρου, τοποθετούνται γλίστρες από μαλακά μέταλλα περιφερειακά των φωλέων. Η εφαρμογή αυτή παρέχει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας στο έδρανο, ώστε να ακολουθεί οποιαδήποτε έντονη απόκλιση της ατράκτου, σαν αποτέλεσμα της διέλευσης ευμεγεθών στερεών στις ακραίες θέσεις της ζώνης κατεργασίας. Με τον τρόπο αυτό, οι γεωμετρικοί άξονες των κυλίνδρων και των εδράνων, διατηρούνται σε ευθυγράμμιση καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας των θραυστήρων.

4.4.5.1 Σύστημα λίπανσης εδράνων

Για τη λίπανση των εδράνων κύλισης χρησιμοποιούνται γράσα με υψηλό ιξώδες (*της τάξης των 1000 cSt*) και χημικές προσμίξεις όπως *λίθιο* και *ασβέστιο*.

Το γράσο τροφοδοτείται στον κλωβό του ρουλεμάν μέσω της βαλβίδας εισόδου, η οποία βρίσκεται συνήθως στο άνω μέρος του εξωτερικού στεγανωτικού δακτυλίου της φωλιάς του εδράνου και συνδέεται με εξωτερικό μαστό εισαγωγής (γρασαδόρο). Η στεγάνωση του εδράνου επιτυγχάνεται με τη χρήση αντεπίστροφων

φραγών και λαβυρίνθων. Στην **Εικόνα 4.20** παρουσιάζεται βαρελοειδές έδρανο διπλής σειράς, τοποθετημένο σε άξονα κυλίνδρου της *Maschinenfabrik Koppert* καθώς επίσης και το σύστημα λίπανσής του.



Εικόνα 4.20: Σύστημα λίπανσης σε βαρελοειδές αυτορύθμιστο έδρανο διπλής σειράς, της Maschinenfabrik Koppert

Τα οφέλη που απορρέουν από την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας, για τη λίπανση των εδράνων κύλισης των κυλινδροπρεσών, συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

1. Επιτυγχάνεται η στεγανοποίηση τους από σκόνες και άλλα στερεά, που μπορεί να εισχωρήσουν στον κλωβό κατά τη διάρκεια της λειτουργία του θραυστήρα και τέλος
2. Απομακρύνονται σωματίδια που τελικά εισχώρησαν (σκόνες) ή δημιουργήθηκαν στο χώρο των εδράνων (ρινίσματα μετάλλου), τα οποία σε συνδυασμό με τα υψηλά φορτία θα μπορούσαν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες σε αυτά.

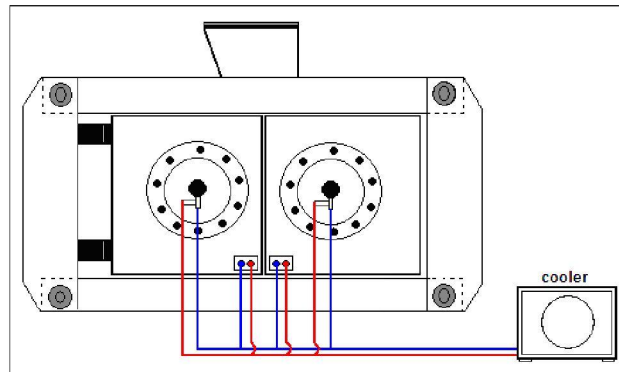
4.4.5.2 Ψύξη εδράνων

Η ψύξη των εδράνων κύλισης επιτυγχάνεται με τη λειτουργία των εξής δύο συστημάτων:

- Του συστήματος ψύξης των κυλίνδρων και
- Του συστήματος ψύξης των κουζινέτων

Το σύστημα ψύξης των κουζινέτων, βρίσκεται εγκατεστημένο μέσα στα πλαίσια στήριξης των κυλίνδρων του θραυστήρα. Συγκεκριμένα, νερό εισέρχεται από βαλβίδα στο κάτω μέρος των πλαισίων και διατρέχει περιμετρικά την εξωτερική επιφάνεια των κουζινέτων, απάγοντας την παραγόμενη από τις τριβές θερμότητα. Έπειτα το ψυκτικό μέσο εξέρχεται από τα πλαίσια και οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας, μέσω του οποίου αποδίδεται η αποθηκευμένη στα έδρανα θερμότητα, στο περιβάλλον. Επιπλέον θερμότητα απάγεται διαμέσου του εσωτερικού δακτυλίου των εδράνων, εξαιτίας της λειτουργίας του συστήματος ψύξης των κυλίνδρων το οποίο περιγράφεται παρακάτω. Σε όλα σχεδόν τα μηχανήματα η θερμοκρασία

λειτουργίας των εδράνων κύλισης ελέγχεται, μέσω αισθητήρων, σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 4.21: Κύκλωμα ψύξης κυλίνδρων και κουζινέτων στα πλαίσια στήριξης

Συνοπτικά τα έδρανα του σπαστήρα ψύχονται σε τρία επίπεδα και πιο συγκεκριμένα:

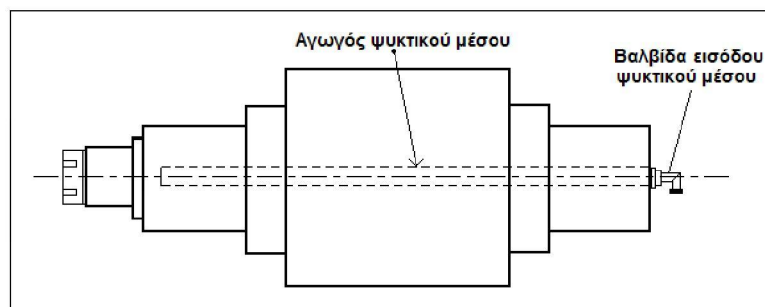
- Με ψύξη του *εξωτερικού δακτυλίου* και της *φωλιάς των εδράνων*, μέσω της λειτουργίας κυκλώματος συνεχούς ροής ύδατος, μέσα στα πλαίσια στήριξης των κυλίνδρων.
- Με ψύξη του *εσωτερικού δακτυλίου* του εδράνου, μέσω της λειτουργίας του συστήματος ψύξης των κυλίνδρων.

Η λειτουργία των εδράνων σε σταθερά χαμηλή θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα:

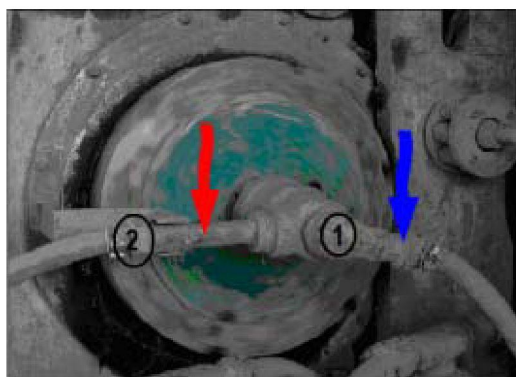
- Τη διατήρηση των ιδιοτήτων του λιπαντικού μέσου (ιξώδες, θερμική αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα λιπαντικού), η αλλοίωση των οποίων θα επηρέαζε το πάχος της λιπαντικής σφήνας στις επαφές των στοιχείων κύλισης και κατά συνέπεια την αποτελεσματική λίπανση του εδράνου
- Τη σταθερή έδραση του εδράνου μέσα στο κουζινέτο και
- Την αύξηση της προσδόκιμης διάρκειας ζωής του

4.4.6 Σύστημα ψύξης των κυλίνδρων

Κάθε κύλινδρος φέρει στο εσωτερικό του κατάλληλα διαμορφωμένους αγωγούς, εντός των οποίων ρέει ψυκτικό μέσο *απάγοντας* την παραγόμενη, από την τριβή του στρώματος υλικού πάνω στη ζώνη κατεργασίας, θερμότητα. Πέραν της τριβής σημαντική πηγή θερμότητας αποτελεί και το ίδιο το υλικό, το οποίο σε αρκετές περιπτώσεις τροφοδοτείται στον σπαστήρα βρισκόμενο σε υψηλή θερμοκρασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κλίνκερ τσιμέντου, το οποίο οδηγείται στο σύστημα τροφοδοσίας έχοντας θερμοκρασία έως και 90°C. Ο πρωτεύων ρόλος της λειτουργίας του συστήματος αυτού, είναι η δέσμευση της εκλυόμενης θερμότητας προτού αυτή μεταδοθεί μέσω αγωγής στα έδρανα κύλισης του μηχανήματος, υπονομεύοντας τη λειτουργία τους. Επιπλέον συντελεί στην απευθείας απαγωγή θερμότητας από τα έδρανα, διαμέσου της επιφάνειας του εσωτερικού δακτυλίου τους.

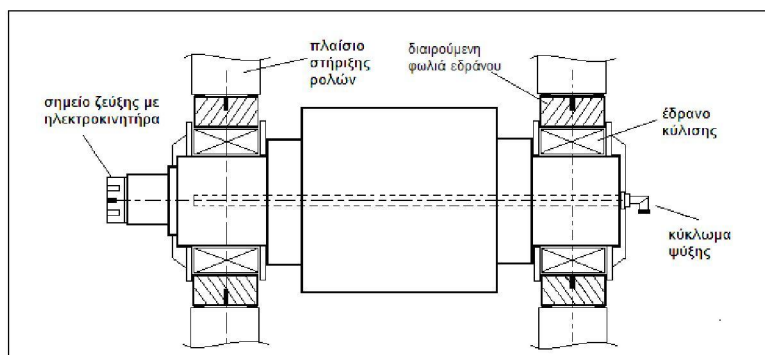


Εικόνα 4.22: Αγωγός ψυκτικού μέσου, στο εσωτερικό κυλίνδρου



Εικόνα 4.23: Ψύξη κυλίνδρου σε θραυστήρα της Maschinenfabrik Koppert

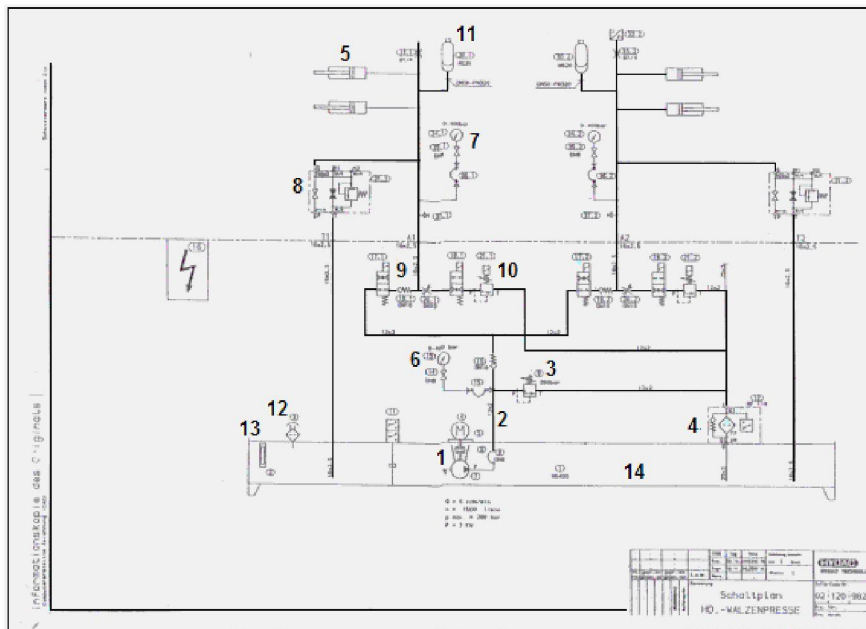
1- Είσοδος ψυχρού ύδατος, 2-Εξοδος θερμού ύδατος



Εικόνα 4.24

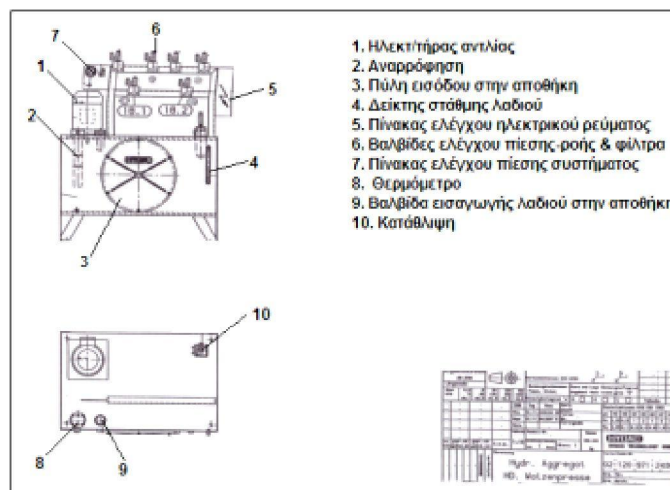
4.4.7 Υδραυλικό σύστημα ρύθμισης της απόστασης των κυλίνδρων

Το υδραυλικό σύστημα ρύθμισης του διακένου υπόκειται στις αναπτυσσόμενες από τους κυλίνδρους αναγκαίες δυνάμεις για τη φόρτιση και θραύση του διερχόμενου στρώματος υλικού. Το υδραυλικό σύστημα των κυλινδροπρεσών αποτελείται από την δεξαμενή του εργαζόμενου μέσου, την αντλία θετικής μετατόπισης, τις βαλβίδες ελέγχου ροής και πίεσης, τα φίλτρα καθαρισμού του υδραυλικού ρευστού, τους συσσωρευτές υδραυλικής ενέργειας και τους υδραυλικούς κυλίνδρους. Η πίεση λειτουργίας των υδραυλικών συστημάτων στις κυλινδρόπρεσες κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των **180** έως **250bar**. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται υδραυλικό σύστημα της εταιρείας Hydac για κυλινδρόπρεσα μέσης δυναμικότητας.



Εικόνα 4.25: Υδραυλικό σύστημα της **HYDAC** σε κυλινδρόπρεσα της Maschinenfabrik Koppert

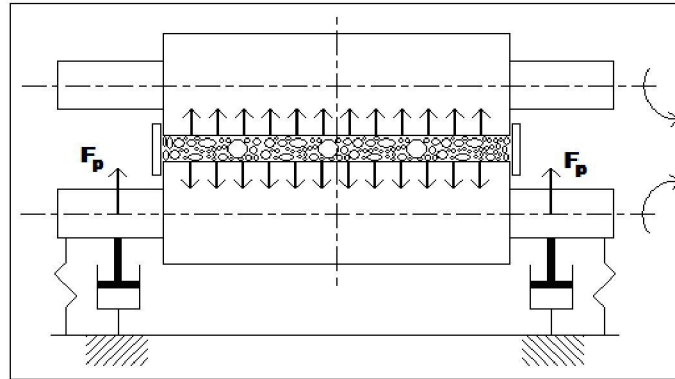
1- Αντλία θετικής μετατοπίσεως -2- Αγωγός κατάθλιψης -3- Ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα ανακουφίσεως -4- Φίλτρο καθαρισμού εργαζόμενου μέσου -5- Υδραυλικοί κύλινδροι -6- Μανόμετρο ελέγχου πίεσεως συστήματος -7- Μανόμετρο ελέγχου λειτουργίας υδραυλικών κυλίνδρων -8- Ηλεκτροβαλβίδα ανακουφίσεως -9- Διακόπτης ελέγχου ροής & ανεπίστροφη βαλβίδα -10- Διακόπτης ελέγχου ροής & βαλβίδα ανακουφίσεως -11- Αποταμιευτές ενέργειας -12- Φίλτρο εργαζόμενου μέσου -13- Δείκτης στάθμης ελαίου -14- Αποθήκη εργαζόμενου μέσου



Εικόνα 4.26: Υδραυλικό σύστημα της **HYDAC**

Οι υδραυλικοί κύλινδροι μεταφέρουν τις αναγκαίες οριζόντιες δυνάμεις, για τη φόρτιση και θραύση των στερεών του διερχόμενου μεταξύ των κυλίνδρων στρώματος υλικού, μετατρέποντας την υδραυλική ισχύ σε μηχανική, μέσω της ευθύγραμμης κίνησης του βάκτρου τους πάνω στα πλαίσια στήριξης του κινούμενου κυλίνδρου (θέση εργασίας). Κατά βάση στις κυλινδρόπρεσες χρησιμοποιούνται υδραυλικοί κύλινδροι απλής ενεργείας.

Δύο ζευγάρια υδραυλικών κυλίνδρων τοποθετούνται (*συμμετρικά*) μεταξύ του αρθρωτού σώματος της μηχανής και των πλασίων στήριξης του κινούμενου κυλίνδρου. Η κίνηση των βάκτρων, πιέζει τον κινούμενο κύλινδρο προς τον σταθερά τοποθετημένο αντικριστό του, προκαλώντας τη θλίψη του στρώματος υλικού μεταξύ των επιφανειών κατεργασίας τους.



Εικόνα 4.27: Φόρτιση στρώματος υλικού

Τα οφέλη από την εφαρμογή αυτή, στη διαδικασία φόρτισης και θραύσης του στρώματος υλικού στις κυλινδρόπρεσες, συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

1. Παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας πολύ μεγάλων δυνάμεων στο σημείο κατεργασίας του στρώματος υλικού, με τη χρήση μικρού όγκου και βάρους εξοπλισμού καθώς και αντλίας ενεργοποίησης του εργαζόμενου μέσου χαμηλής ισχύος.
2. Οι υδραυλικοί κινητήρες λειτουργώντας και σαν αμορτισέρ, προσθέτουν σημαντική ελαστικότητα στο σύστημα των περιστρεφόμενων κυλίνδρων. Πιο συγκεκριμένα η πιθανή ανομοιομορφία του πάχους του στρώματος υλικού αλλά και η διέλευση κάποιων ευμεγεθών τεμαχίων μπορούν να προκαλέσουν σημαντικούς κραδασμούς στο σύστημα των κυλίνδρων, ειδικά στις περιπτώσεις κατεργασίας σκληρών υλικών όπως τα μεταλλεύματα. Οι κραδασμοί αυτοί αποσβένονται αποτελεσματικά με την οπισθοχώρηση των βάκτρων των υδραυλικών κινητήρων.

Ένα επιπλέον πολύ σημαντικό στοιχείο του υδραυλικού συστήματος των κυλινδροπρεσών, αποτελούν οι συσσωρευτές ενέργειας οι οποίοι ανάλογα με τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά διακρίνονται στους εμβολοφόρους, στους συσσωρευτές με ελατήριο, με ανυψούμενο βάρος ή με κύστη αερίου (*αζώτου ή άλλου αδρανούς αερίου*). Εν γένει στα υδραυλικά συστήματα των κυλινδροπρεσών χρησιμοποιούνται **συσσωρευτές ενέργειας με κύστη αδρανούς αερίου**.

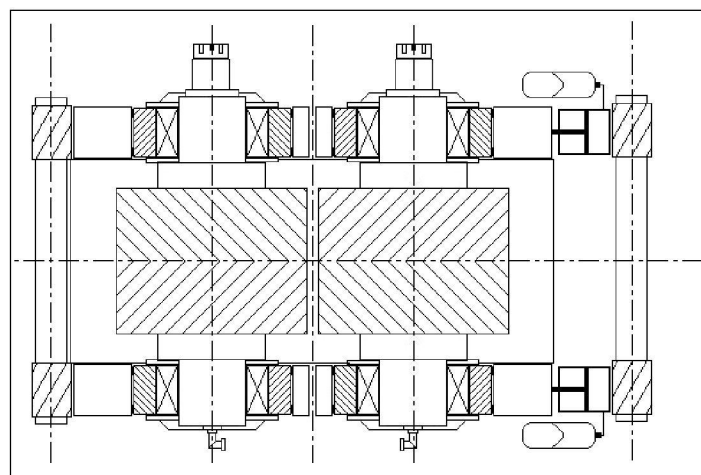
Τα οφέλη που προκύπτουν από τη λειτουργία των συσσωρευτών ενέργειας στα συστήματα υδραυλικής ισχύος, γενικά, συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

1. Μειώνονται οι επιπτώσεις στο δίκτυο, εξαιτίας του υδραυλικού πλήγματος,
2. Εξαλείφονται οι παλμοί παροχής της γραναζωτής αντλίας,

3. Επιτρέπουν στο σύστημα να λειτουργεί, για μικρό χρονικό διάστημα και μετά την παύση της αντλίας,
4. Επιτρέπουν τη χρήση αντλίας μικρότερης ισχύος, μιας και οι συσσωρευτές διατηρούν εφεδρεία ισχύος, για συστήματα με διακοπτόμενη ή ακανόνιστη λειτουργία.



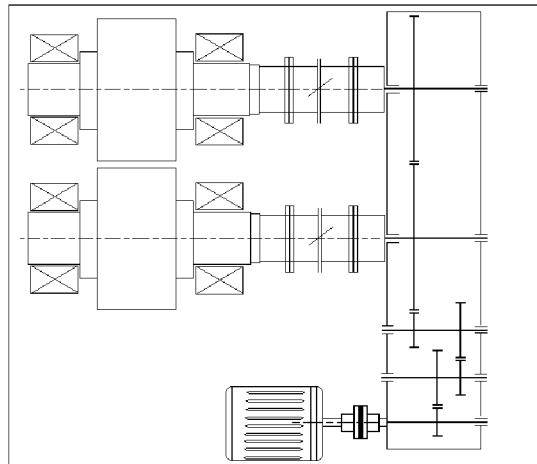
Εικόνα 4.28: Συσσωρευτής ενέργειας με κύστη αζώτου, σε κυλινδρόπρεσα της Maschinenfabrik Koppert στη μονάδα της TITAN στο Καμάρι Βοιωτίας



Εικόνα 4.29: Οριζόντια υδραυλικά έμβολα μεταξύ των του αρθρωτού σώματος και των πλασίων στήριξης του κινούμενου κυλίνδρου

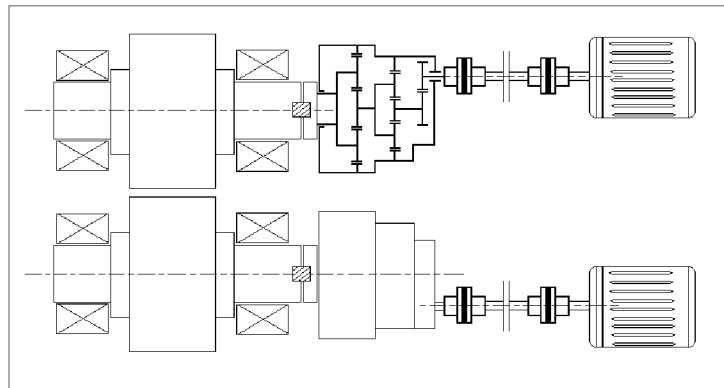
4.4.8 Διατάξεις μεταφοράς ισχύος και μετάδοσης κίνησης στους κυλίνδρους

Στις κυλινδρόπρεσες εφαρμόζονται δύο τύποι διατάξεων μετάδοσης κίνησης. Η πρώτη διάταξη βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα θραύσης μικρής δυναμικότητας και πολύ συχνά, σε κυλινδρόπρεσες που λειτουργούν για την μπριγκετοποίηση λεπτόκοκκων υλικών. Στη διάταξη αυτή ένας μειωτήρας στροφών και ένα ζεύγος ατράκτων μεταφέρουν τις στρεπτικές ροπές στους κυλίνδρους της πρέσας από ένα ηλεκτροκινητήρα (Εικ. 4.30).



Εικόνα 4.30

Στη δεύτερη διάταξη η οποία βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλα συστήματα θραύσης (*Εικόνα 4.31*), για κάθε κύλινδρο χρησιμοποιείται ένας ανεξάρτητος ηλεκτροκινητήρας με τον οποίο συνδέεται και λαμβάνει κίνηση. Ειδικότερα, οι στρεπτικές ροπές μεταφέρονται από τον ηλεκτροκινητήρα στον μειωτήρα στροφών και έπειτα στον κύλινδρο, διαμέσου ατράκτων. Ο μειωτήρας συνδέεται στο σημείο ζεύξης των αξόνων των κυλίνδρων είτε με αρμούς διαστολής είτε με αρθρώσεις, που παρέχουν μια επιπλέον ελαστικότητα στη σύνδεση ώστε να μπορεί να δεχτεί την παλινδρομική κίνηση των κυλίνδρων. Έπειτα ο μειωτήρας συνδέεται με τον ηλεκτροκινητήρα μέσω ατράκτου, ενώ οι συνδέσεις επιτυγχάνονται με κόπλερ ασφαλείας για την προστασία της διάταξης από υψηλά φορτία.



Εικόνα 4.31

Γενικά οι κύλινδροι λειτουργούν με χαμηλές περιφερειακές ταχύτητες που κυμαίνονται μεταξύ **1,2** και **1,8 m/s** διότι:

1. Με την αύξηση της περιφερειακής ταχύτητας και για δεδομένο ρυθμό τροφοδοσίας, προκαλούνται προβλήματα στην ποιότητα του κατεργασμένου προϊόντος καθώς και φθίνουσα παραγωγική συμπεριφορά.
2. Επιπλέον, μεγάλες περιφερειακές ταχύτητες προκαλούν έντονους κραδασμούς και ταλαντώσεις στους κυλίνδρους, με σοβαρές επιπτώσεις στην λειτουργία της πρέσας, ειδικά αν οι κόκκοι του τροφοδοτούμενου υλικού παρουσιάζουν μεγάλη διάμετρο και σκληρότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5_ο

Συλλογή δοκιμίων



Εικόνα: Κόκκοι κλίνκερ γκρι τσιμέντου

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία συλλογής δειγμάτων κόκκων κλίνκερ γκρι τσιμέντου, από τις γραμμές παραγωγής τσιμεντοβιομηχανιών, για τη διερεύνηση, σε πρώτη φάση, των κοκκομετρικών και γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών και έπειτα της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Ειδικότερα παρατίθενται στοιχεία αναφορικά με:

- Τη διαδικασία προσδιορισμού των σταθμών δειγματοληψίας στις γραμμές παραγωγής των τσιμεντοβιομηχανιών,
- Τη διαδικασία συλλογής των δειγμάτων από τους προκαθορισμένους σταθμούς δειγματοληψίας,
- Τη διαδικασία αποθήκευσης του συλλεχθέντος υλικού,
- Τη διαδικασία διαλογής των δοκιμών και
- Τα αποτελέσματα που απορρέουν από τα παραπάνω.

5.2 Σταθμοί δειγματοληψίας

5.2.1 Τόποι δειγματοληψίας

Για τη μελέτη των κοκκομετρικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του παραγόμενου στις περιστροφικές καμίνους όπτησης κλίνκερ γκρι τσιμέντου, πραγματοποιήθηκε η συλλογή υλικού από τη γραμμή παραγωγής γκρι τσιμέντου στη μονάδα της **TITAN A.E.**, στο **Καμάρι Βοιωτίας**.

5.2.2 Προσδιορισμός των σταθμών δειγματοληψίας

Οι σταθμοί δειγματοληψίας, μέσα στη μακριά και πολύπλοκη γραμμή παραγωγής της τσιμεντοβιομηχανίας, προσδιορίστηκαν κατά τρόπο τέτοιο ούτως ώστε οι ποσότητες υλικού οι οποίες συλλέχθηκαν και μελετήθηκαν να είναι αντιπροσωπευτικές αυτών που τροφοδοτούνται και θραύονται, σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες, σε κυλινδρόπρεσες οι οποίες λειτουργούν **στη φάση της ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ**. Στην κατεύθυνση αυτή και ύστερα από λεπτομερή μελέτη της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου, ορίστηκαν οι ακόλουθοι **εμπειρικοί κανόνες** βάση των οποίων καθορίστηκαν οι σταθμοί λήψης των δειγμάτων και οι οποίοι παρουσιάζονται στην συνέχεια της παραγράφου:

Κανόνας 1^{ος}:

Στη περίπτωση κατά την οποία στη γραμμή παραγωγής της τσιμεντοβιομηχανίας λειτουργεί, είτε κυλινδρόπρεσα είτε άλλος τύπος σπαστήρα (κυλινδρόμυλος ή άλλο), στη φάση της **ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ**, ως κύριοι σταθμοί δειγματοληψίας θα πρέπει να θεωρούνται (ιεραρχικά):

1. Απευθείας το σύστημα τροφοδοσίας του σπαστήρα ή κάποιο προσβάσιμο σημείο στις ταινίες μεταφοράς υλικού προς αυτό.
2. Τα σιλό αποθήκευσης του κλίνκερ ή οι ταινίες μεταφοράς υλικού προς αυτά.

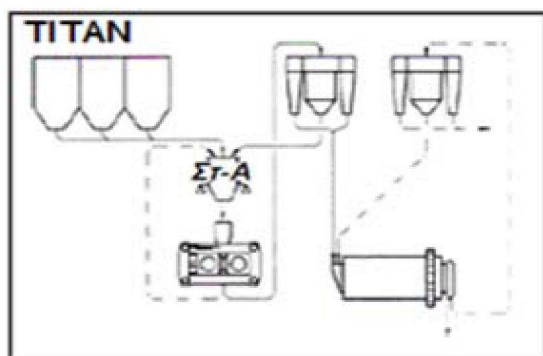
Κανόνες 2^{ος}:

Στη περίπτωση κατά την οποία στη γραμμή παραγωγής της τσιμεντοβιομηχανίας δεν υφίσταται το στάδιο της ημιτελούς άλεσης του κλίνκερ, ως κύριοι σταθμοί δειγματοληψίας θα πρέπει να θεωρούνται (ιεραρχικά):

1. Οι ταινίες μεταφοράς υλικού προς τους μύλους τσιμέντου,
2. Τα σιλό αποθήκευσης του κλίνκερ ή οι ταινίες μεταφοράς υλικού προς αυτά.

5.2.3 Σταθμοί δειγματοληψίας

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στη μονάδα της **TITAN**, στην οποία λειτουργεί κυλινδρόπρεσα της εταιρείας *Maschinenfabrik Koppert*, στη φάση της ημιτελούς λειοτρίβησης του κλίνκερ, ως σταθμός λήψης των δειγμάτων ορίστηκε: *προσβάσιμο σημείο του συστήματος τροφοδοσίας του σπαστήρα*. Στο εξής ο σταθμός αυτός θα καλείται **Στ-Α**.



Εικόνα 5.1: Σταθμός δειγματοληψίας στη γραμμή παραγωγής γκρι τσιμέντου της τσιμ/χανίας **TITAN**

5.3 Διαδικασία συλλογής και αποθήκευσης δειγμάτων

Στο εργοστάσιο της TITAN και στο σύστημα τροφοδοσίας του υφιστάμενου σπαστήρα, αποσφραγίστηκε θυρίδα δειγματοληψίας, μέσω της οποίας έρευνε υλικό προς τα δοχεία συλλογής. Οι συλλεχθείσες ποσότητες, σε πρώτη φάση, εξαιτίας της θερμοκρασίας του υλικού, αποθηκεύτηκαν σε μεταλλικά δοχεία, ενώ στη συνέχεια αποθηκεύτηκαν και μεταφέρθηκαν σε σφραγισμένους πλαστικούς σάκους, ώστε να προστατευτούν από κάθε είδους εξωτερική επίδραση (*κυρίως την ατμοσφαιρική υγρασία*).

Αναφορικά με τον τρόπο συλλογής των δειγμάτων, σκόπιμη θεωρείται η παρούσα επισήμανση, η οποία αφορά τη διαδικασία συλλογής κόκκων κλίνκερ, αν αυτή πραγματοποιείται σε **ταινίες μεταφοράς υλικού**. Στις διατάξεις αυτές, εξαιτίας των έντονων κραδασμών, παρατηρείται ο διαχωρισμός του πολύ λεπτού κλάσματος και της σκόνης προς τα κάτω. Ωστόσο το κλάσμα αυτό δεν μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία, εξαιτίας του υφιστάμενου διάκενου των κυλινδρών της πρέσας. Κατά συνέπεια, αν ως σταθμοί δειγματοληψίας ορισθούν ταινιόδρομοι, η λήψη δειγμάτων θα πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά και κατά βάση, από τα επιφανειακά στρώματα του μεταφερόμενου υλικού.



Εικόνα 5.2: Ταινιόδρομοι (ταινίες) μεταφοράς clinker τσιμέντου

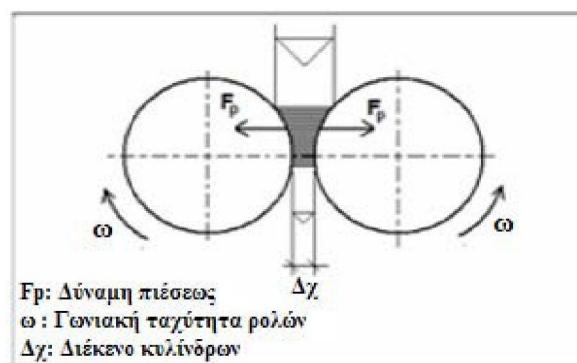
5.4 Μέγεθος δείγματος

Όσον αφορά στο μέγεθος του δείγματος κόκκων κλίνκερ γκρι τσιμέντου, το οποίο συλλέχθηκε από τη γραμμή παραγωγής της TITAN παρατίθενται τα ακόλουθα ποσοτικά στοιχεία:

- Από το σταθμό δειγματοληψίας Στ-Α του εργοστασίου της TITAN, στο Καμάρι Βοιωτίας, συλλέχθηκαν συνολικά **100kg** κόκκων κλίνκερ γκρι τσιμέντου, ποσότητα η οποία χωρίστηκε και μεταφέρθηκε σε τέσσερις **-4-** παρτίδες των **25kg**.

5.5 Διαλογή δοκιμών

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι επιφάνειες των ζωνών κατεργασίας των κυλίνδρων διατηρούν καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του σπαστήρα απόσταση $\Delta\chi$ (κατά την έννοια της διακέντρου των ρολών) η οποία καλείται **διάκενο των κυλίνδρων**. Πριν την έναρξη της τροφοδοσίας του υλικού, το διάκενο αυτό λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του (ιδανικό διάκενο), ενώ στη συνέχεια αυξάνει (10 έως 20mm), λαμβάνοντας τιμές εξαρτώμενες από το πάχος της σχηματιζόμενης κουβέρτας (διάκενο λειτουργίας). Παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την τιμή του διακένου λειτουργίας είναι η πυκνότητα του τροφοδοτούμενου υλικού, καθώς και η εφαρμοζόμενη δύναμη που συμπιέζει τους κυλίνδρους.

Εικόνα 5.3: Διάκενο λειτουργίας ($\Delta\chi$) κυλίνδρων

Βάσει της παραπάνω παρατήρησης, οι σκόνες και το λεπτόκοκκο κλάσμα του τροφοδοτούμενου, στο θραυστήρα, υλικού, με ονομαστικό μέγεθος μεγίστου κόκκου μικρότερο από το διάκενο λειτουργίας, είτε διέρχεται ακατέργαστο μεταξύ των κυλίνδρων και περνάει στα επόμενα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας είτε συμπιέζεται και ενσωματώνεται στο παραγόμενο από το σπαστήρα συσσωμάτωμα πεπιεσμένου υλικού (γκοφρέτα).

Θέτοντας ως δεδομένο ότι το μελετούμενο ιδανικό διάκενο στην παρούσα εργασία θα είναι $\Delta_x=10mm$ (σύννηθες διάκενο για κυλινδρόπρεσες στη φάση της ημιτελούς κατεργασίας του κλίνκερ), πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός με κοσκίνιση της $\varnothing>10mm$ κοκκομετρικής τάξης του συλλεχθέντος δείγματος. Από τη διαδικασία αυτή συγκεντρώθηκε ποσότητα στερεών με κοκκομετρική διαβάθμιση από $10mm$ έως $153mm$, τα οποία αποτελούν τα δοκίμια της γεωμετρικής και κοκκομετρικής ανάλυσης, καθώς και των πειραμάτων θλίψης τα οποία ακολουθούν.

5.6 Μέγεθος κλάσματος δοκιμών

Όσον αφορά στο πλήθος και στο βάρος των δοκιμών που διαχωρίστηκαν από την αρχική ποσότητα του δείγματος παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Από τις τέσσερις -4- συνολικά παρτίδες, κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, συνολικού βάρους $100kg$, διαχωρίστηκαν συνολικά 724 δοκίμια της $\varnothing>10mm$ κοκκομετρικής τάξης, συνολικού βάρους $75,4kg$.

ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

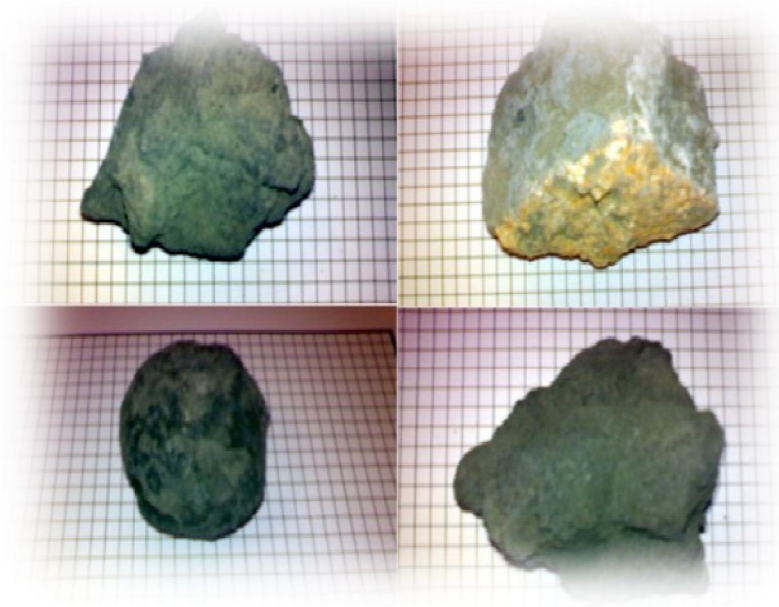
	Ποσότητα Υλικού (kg)	Τεμάχια (κόκκοι)
Αρχικό Δείγμα	100	-
Κλάσμα Δοκιμών	75,4 kg	724

Πίνακας 5.1: Μέγεθος κλάσματος στερεών δοκιμών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

6

Σχηματική & Κοκκομετρική ταξινόμηση δείγματος δοκιμίων



Εικόνα: Κόκκοι κλίνκερ τσιμέντου

6.1 Εισαγωγή

Όπως κάθε στερεό υλικό, έτσι και οι κόκκοι κλίνκερ, παρουσιάζουν μια γεωμετρία, η οποία μπορεί να εκφραστεί με τα γνωστά σχήματα και τις παραλλαγές τους. Επειδή όμως η ποικιλία των σχημάτων είναι ευρύτατη και στην πραγματικότητα κάθε κόκκος έχει σχήμα διαφορετικό από τους άλλους, είναι απαραίτητη η συσχέτισή τους με ορισμένα βασικά (*ιδανικά*) σχήματα και η ομαδοποίησή τους με βάση τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

Ταυτόχρονα, ευρύτατη είναι και η απαντώμενη ποικιλία των κοκκομετρικών χαρακτηριστικών, ακόμα και σε ένα περιορισμένο πλήθος δοκιμίων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την ταξινόμηση του δείγματος σε κοκκομετρικές τάξεις, εργασία η οποία θα διευκολύνει ουσιαστικά τη διαχείριση της μελετούμενης ποσότητας κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, καθώς και των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τη μελέτη των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Οι μεθοδολογίες για τη σχηματική και κοκκομετρική αυτή ταυτοποίηση του δείγματος των δοκιμίων, θα περιγραφεί στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.



Εικόνα 6.1: Κόκκοι κλίνκερ τσιμέντου με διαφορετικά μορφολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Ανεξάρτητα όμως από το σχήμα, οι επιφάνειες των κόκκων κλίνκερ μπορεί να είναι *επίπεδες, κοίλες, κυρτές, λείες ή ανώμαλες*, ενώ οι γωνίες που σχηματίζουν οι πλευρές μεταξύ τους μπορεί να είναι *οξείες, αμβλείες, ορθές, με μικρή ή με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας*. Ωστόσο, όλα αυτά τα στοιχεία τα οποία περιγράφουν τη μορφή των δοκιμίων, δηλαδή την εξωτερική τους εμφάνιση, δεν θα απασχολήσουν την παρούσα εργασία.

6.2 Θεωρητικό υπόβαθρο σχηματικής ταξινόμησης

6.2.1 Γενικά

Παρ' όλο που στην υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν ορίζεται σαφώς κάποια μέθοδος σχηματικής ταξινόμησης των παραγόμενων στις περιστροφικές καμίνους κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, εντούτοις ένα ουσιαστικής σημασίας θεωρητικό υπόβαθρο για την επίλυση του προβλήματος αυτού, αποτελούν μεθοδολογίες όπως: το διάγραμμα σχηματικής ταξινόμησης κατά **Zingg** και ο κανόνας των τριών αξόνων κατά **Griffiths**, οι οποίες απαντώνται στην επιστήμη της ορυκτολογίας. Ο κανόνας *Griffiths* και το διάγραμμα *Zingg*, αποτελούν ένα πολύ αποτελεσματικό συνδυασμό διαδικασιών σχηματικής ταξινόμησης ιζηματογενών κροκάλων.

Κροκάλες καλούνται οι ευμεγέθεις ιζηματογενείς κόκκοι, το μέγεθος των οποίων επιτρέπει την απ' ευθείας μέτρηση τους με κάποιο όργανο όπως: το παχύμετρο, η μετροταινία ή άλλο. Οι κόκκοι του κλίνκερ πληρούν όλες εκείνες τις προϋποθέσεις ώστε η σχηματική τους ταξινόμηση να επιτευχθεί, με ικανοποιητικά αποτελέσματα, μέσω της εφαρμογής των δύο προαναφερθέντων μεθοδολογιών, μιας και το μέγεθος τους επιτρέπει την απευθείας μέτρηση τους με παχύμετρο, ενώ παράλληλα είναι αρκετά σκληροί ώστε η επαφή τους με το μετρητικό όργανο να μην επηρεάσει τις διαστάσεις τους.

6.2.2 Κανόνας των τριών αξόνων κατά Griffiths (1967)

Σύμφωνα με τη μέθοδο **Griffiths** κάθε κόκκος υλικού (ιζηματογενούς προελεύσεως ή στην παρούσα περίπτωση του κλίνκερ τσιμέντου), τοποθετείται σε ένα ιδεατό σύστημα τριών αξόνων (*a-b-c*) κατάντη των οποίων λαμβάνεται από μια μέτρηση. Οι τρεις άξονες θεωρούνται κάθετοι μεταξύ τους, στο σημείο τομής τους, και αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και κατά τις μετρήσεις.

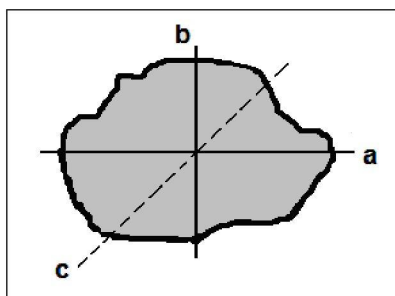
Η ανάθεση του ορθοκανονικού συστήματος των αξόνων Griffiths, σε κάθε στερεό κόκκο, πραγματοποιείται σύμφωνα με τους κανόνες που παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. Ο άξονας *a* τοποθετείται κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασης του μελετούμενου στερεού.
2. Ο άξονας *b* τοποθετείται **κάθετα** στον άξονα *a* και κατά μήκος της μεσαίας διάστασης του στερεού.
3. Ο άξονας *c* συμπληρώνει το ορθοκανονικό σύστημα των τριών αξόνων.

Με την εφαρμογή των παραπάνω, λαμβάνεται για κάθε στερεό κόκκο υλικού ένα σύνολο τριών χαρακτηριστικών μετρήσεων, οι οποίες ταυτοποιούν το στερεό και εκφράζουν:

- το **μήκος** του (μέτρηση κατάντη του άξονα *a*),
- το **πλάτος** του (μέτρηση κατάντη του άξονα *b*) και
- το **πάχος** του (μέτρηση κατάντη του άξονα *c*)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά Griffiths, θα αποτελέσουν τα αριθμητικά δεδομένα για τον προσδιορισμό του σχήματος του στερεού, μέσω της εφαρμογής του διαγράμματος προσδιορισμού της τάσης σχηματικής ομαδοποίησης κατά Zingg.

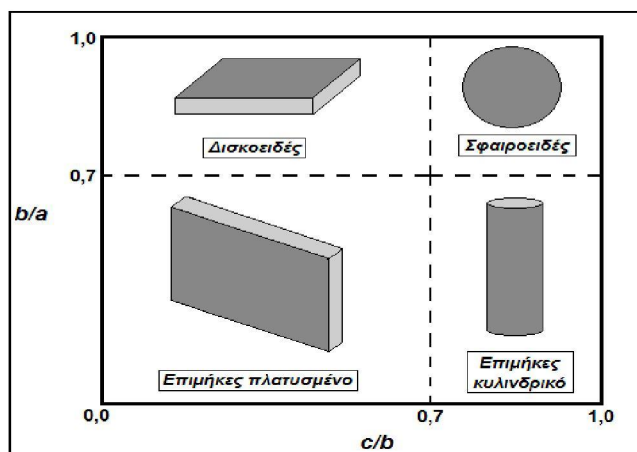


Εικόνα 6.2: Άξονες Griffiths

6.2.3 Διάγραμμα ταξινόμησης Zingg (1935)

Η μέθοδος **Zingg**, βασισμένη στους λόγους των αξόνων Griffiths: $b(\text{πλάτος})/a(\text{μήκος})$ και $c(\text{πάχος})/a(\text{μήκος})$, προσδιορίζει την τάση του κάθε στερεού να ομαδοποιηθεί σε κάποια από τις τέσσερις προβλεπόμενες κατηγορίες βασικών σχημάτων και πιο συγκεκριμένα σε αυτή των *σφαιροειδών*, των *δισκοειδών*, των *επιμήκων πλατυσμένων* (πλατύμορφα) ή των *επιμήκων κυλινδρικών* (κυλινδρόμορφα).

Οι τέσσερις τάσεις των βασικών σχημάτων κατά Zingg, σύμφωνα με τους λόγους των διαστάσεων Griffiths, παρουσιάζονται στο **Γράφημα 1** που ακολουθεί:



Γράφημα 6.1: Τάσεις σχηματικής ομαδοποίησης στερεών κατά Zingg.

6.3 Εργαστηριακές μετρήσεις

6.3.1 Απώλειες σε δοκίμια εξαιτίας φυσικών παραγόντων

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια το κλίνκερ, παράγεται, μεταφέρεται και φυλάσσεται σε περιβάλλον με πολύ χαμηλή έως και μηδενική περιεκτικότητα σε υγρασία (έως 1%). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υλικού, έχει σαν αποτέλεσμα οι κόκκοι κλίνκερ (όπως ακριβώς και η τσιμεντόσκονη) να παρουσιάζουν υψηλή απορροφητικότητα ως προς την ατμοσφαιρική υγρασία με αποτέλεσμα, τη γρήγορη ενυδάτωση τους, τη διόγκωση και τελικά τη θραύση τους, όταν αυτοί εκτεθούν σε φυσικό περιβάλλον. Μάλιστα το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο σε κόκκους με χαμηλή πυκνότητα (έντονο πορώδες) και εκτεταμένες επιφανειακές μικρορηγματώσεις (μακροσκοπικές παρατηρήσεις).



Εικόνα 6.3: Θρυμματισμένοι κόκκοι κλίνκερ, λόγω της επίδρασης της ατμοσφαιρικής υγρασίας.

Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν, ένα ποσοστό της τάξης του 44,1% του συλλεχθέντος κλάσματος δοκιμίων να καταστραφεί κατά τη διάρκεια των εργασιών διαλογής και καταγραφής του. Αν και εξ' αρχής χρησιμοποιήθηκαν πλαστικές προστατευτικές συσκευασίες για τον περιορισμό του φαινομένου, παρ' όλα αυτά οι απώλειες υπήρξαν, μειώνοντας το μέγεθος του προς μελέτη δείγματος.

Έπειτα από την παραπάνω εξέλιξη, το μέγεθος του δείγματος το οποίο τελικά θα χρησιμοποιηθεί στις εργαστηριακές εργασίες, θα μετρηθεί, θα ταξινομηθεί και θα περάσει στα επόμενα στάδια της παρούσας μελέτης, ανέρχεται στα 405 τεμάχια, συνολικού βάρους 52,5kg, το οποίο θεωρείται επαρκές.

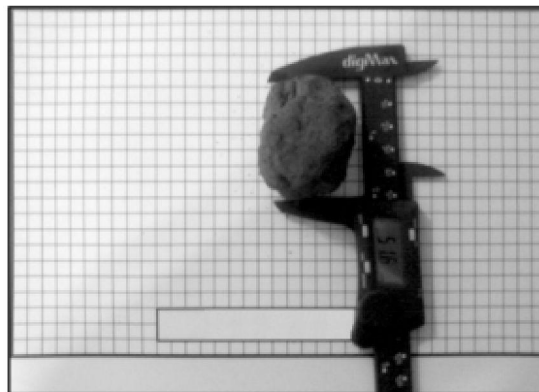
ΤΕΛΙΚΟ ΔΕΙΓΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

	Ποσότητα Υλικού (kg)	Τεμάχια (κόκκοι)
Δείγμα ταξ/μησης	52,5	405

Πίνακας 6.1: Δείγμα ταξινόμησης

6.3.2 Μετρήσεις

Για τη διευκόλυνση της διαχείρισης και αποθήκευσης των εξαγόμενων, από τη διαδικασία των μετρήσεων, πειραματικών δεδομένων, όλα τα δοκίμια του μελετούμενου δείγματος αριθμήθηκαν ένα προς ένα. Ο αύξων αριθμός ταξινόμησης του κάθε στερεού (**1...405**) καταγράφηκε σε αυτοκόλλητη πινακίδα, η οποία και προσαρτήθηκε πάνω του. Στη συνέχεια ένα προς ένα τα δοκίμια μετρήθηκαν, με τη χρήση ψηφιακού παχύμετρου, σύμφωνα με τη διαδικασία που ορίζει η μέθοδος των τριών αξόνων **Griffiths**.



Εικόνα 6.4: Ψηφιακό παχύμετρο για τη μέτρηση των αξόνων **Griffiths**, σε κόκκο κλίνκερ τσιμέντου

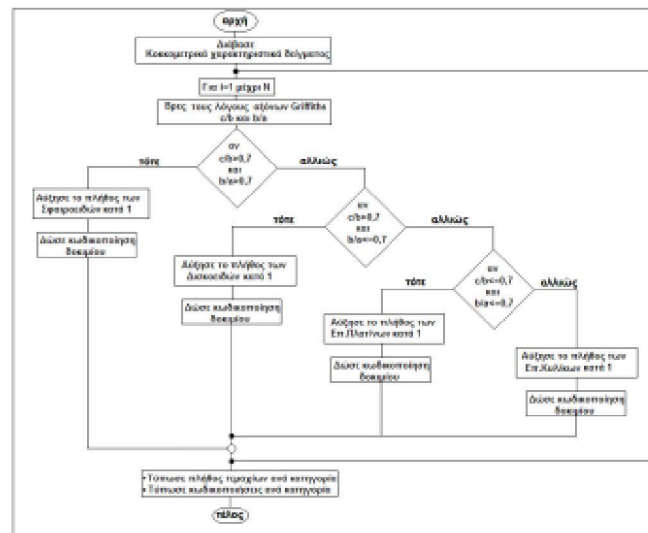
Οι πειραματικές μετρήσεις συγκεντρώθηκαν και αποθηκεύτηκαν για τη συγκρότηση βάσης δεδομένων σχετικής με τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά του μελετούμενου κλάσματος των δοκιμίων.

α/α κόκκου	Αξονας a (mm)	Αξονας b (mm)	Αξονας c (mm)
1	90.0	87.0	40.0
2	66.6	47.5	45.1
3	90.5	76.2	59.7
4	66.4	61.4	57.8
5	72.7	53.0	49.0
.	.	.	.
405	54.8	49.0	28.9

Πίνακας 6.2: Βάση δεδομένων κοκκομετρικών χαρακτηριστικών μελετούμενου δείγματος κόκκων κλίνκερ τσιμέντου

6.3.3 Αλγόριθμος σχηματικής ταξινόμησης

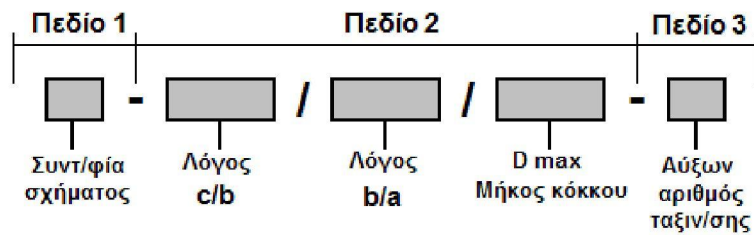
Για τη σχηματική ταξινόμηση των δοκιμίων, κατασκευάστηκε αλγόριθμος (σε γλώσσα προγραμματισμού C++), ο οποίος δέχεται ως δεδομένα εισόδου τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων του μελετούμενου δείγματος, από την υφιστάμενη βάση δεδομένων και αποδίδει, βασιζόμενος στις αρχές του διαγράμματος **Zingg**, τις τάσεις σχηματικής ομαδοποίησης τους, καθώς και την κωδικοποιημένη ονομασία τους.



Εικόνα 6.5: Δομικό διάγραμμα ροής αλγορίθμου ταξινόμησης σχήματος κόκκων κλίνκερ

6.3.4 Κωδικοποίηση

Προκειμένου να διευκολυνθεί η διαχείριση του ταξινομημένου δείγματος, στις επόμενες φάσεις της παρούσας εργασίας, κρίθηκε αναγκαία η ταυτοποίηση του συνόλου των δοκιμίων με μια κωδικοποιημένη ονομασία, η οποία θα παρέχει και μετά τον καταστρεπτικό έλεγχο των μηχανικών χαρακτηριστικών του δείγματος, πλήρη στοιχεία αναφορικά με τα κοκκομετρικά και μορφομετρικά χαρακτηριστικά των στερεών. Η δομή της κωδικοποίησης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6.6** που ακολουθεί:



Εικόνα 6.6: Δομή κωδικοποίησης

Όπου:

- **Πεδίο 1:** Περιλαμβάνει τη συντομογραφία του σχήματος του κόκκου.
- **Πεδίο 2:** Περιλαμβάνει τους λόγους των αξόνων Griffiths, καθώς και το μήκος της μέγιστης διάστασης του μελετούμενου δοκιμίου (άξονας *a*).
- **Πεδίο 3:** Περιλαμβάνει τον αύξοντα αριθμό ταξινόμησης κάθε κόκκου, ο οποίος του δίνεται κατά τη φάση των μετρήσεων.

Συντομογραφίες σχήματος των κόκκων κλίνκερ (**πεδίο 1**):

- **S:** Σφαιροειδές τεμάχιο
- **D:** Δισκοειδές τεμάχιο
- **EP:** Επιμήκες πλατυσμένο
- **EC:** Επιμήκες κυλινδρικό



Εικόνα 6.7: Κωδικοποιημένα / Ταξινομημένα δοκίμια

6.3.5 Αποθήκευση ταξινομημένων δοκιμίων

Τα ταξινομημένα δοκίμια, μετά τη διαδικασία των μετρήσεων και αφού ζυγίσθηκαν, επανασυσκευάστηκαν σε ατομικές πλαστικές αεροστεγείς συσκευασίες, ούτως ώστε να περιοριστεί στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό η έκθεση τους στην ατμοσφαιρική υγρασία. Για την ευκολότερη διαχείριση του δείγματος σε κάθε συσκευασία καταγράφηκε η κωδικοποιημένη ονομασία του δοκιμίου, η οποία προέκυψε από τον αλγόριθμο ταξινόμησης, καθώς και ο αύξων αριθμός ταξινόμησής του.

Επιπρόσθετα, το σύνολο των δοκιμίων κάθε σχηματικής κατηγορίας συσκευάστηκε σε μεγαλύτερες πλαστικές συσκευασίες, αεροστεγώς σφραγισμένες, μέχρι την πραγματοποίηση των δοκιμών για την μελέτη των μηχανικών τους χαρακτηριστικών.



Εικόνα 6.8: Πλαστικές (ατομικές/ομαδικές) αεροστεγείς συσκευασίες δοκιμίων

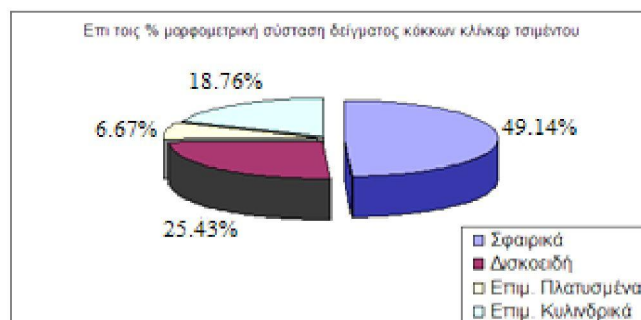
6.4 Αποτελέσματα σχηματικής ταξινόμησης

Οι κόκκοι κλίνκερ μετρήθηκαν σύμφωνα με τον κανόνα των τριών αξόνων κατά *Griffiths* (1967) και το σχήμα τους μελετήθηκε σύμφωνα με τις αρχές του διαγράμματος *Zingg* (1935). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ταξινόμησης, σε δείγμα 405 δοκιμίων, συνολικού βάρους 52,5kg, βρέθηκαν:

- 199 σφαιροειδείς κόκκοι
- 103 δισκοειδείς
- 27 επιμ. πλατυσμένοι και
- 76 επιμ. κυλινδρικοί

	Πλήθος δοκιμίων ανά κατηγορία	Επί τοις εκατό (%)
Σφαιροειδή	199	49.14
Δισκοειδή	103	25.43
Πλατυσμένα	27	6.67
Κυλινδρικά	76	18.76
Σύνολο:	405	100

Πίνακας 6.3: Μορφομετρική σύσταση δείγματος

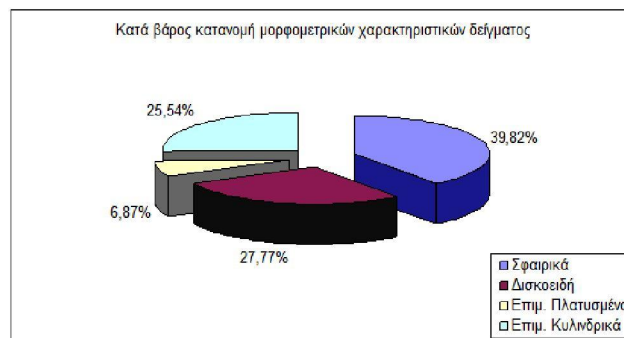


Γράφημα 6.2

Η κατά βάρος μορφομετρική σύσταση του δείγματος παρουσιάζεται στον **Πίνακα 6.4** που ακολουθεί:

	Βάρος (kg) δοκιμίων ανά κατηγορία	Επί τοις (%)
Σφαιρικά	20.79	39.82
Δισκοειδή	14.49	27.77
Πλατυσμένα	3.58	6.87
Κυλινδρικά	13.33	25.54
Σύνολο:	52.2	100.0

Πίνακας 6.4: Κατά βάρος μορφομετρική σύσταση δείγματος δοκιμίων



Γράφημα 6.3

6.5 Κοκκομετρική διαβάθμιση δείγματος δοκιμίων

6.5.1 Τάξεις κοκκομετρίας

Για την κοκκομετρική ταξινόμηση του μελετούμενου δείγματος κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, ορίστηκαν 4 κοκκομετρικές τάξεις εντός των οποίων, με την εφαρμογή αλγορίθμου, ταξινομήθηκε το κάθε στερεό δοκίμιο αναλόγως των κοκκομετρικών του χαρακτηριστικών και πιο συγκεκριμένα της μεγαλύτερης διάστασης του (άξονας *a* κατά Griffiths). Δεδομένα εισόδου για τον αλγόριθμο κοκκομετρικής ταξινόμησης αποτέλεσαν: τα αποτελέσματα της σχηματικής ομαδοποίησης του δείγματος, η βάση δεδομένων των μετρήσεων Griffiths, καθώς και τα όρια κοκκομετρικής ταξινόμησης, όπως αυτά ορίστηκαν για τις αντίστοιχες τάξεις. Όσον αφορά στις κοκκομετρικές τάξεις που όρισα, παραθέτω τα ακόλουθα στοιχεία:

- Η πρώτη κοκκομετρική τάξη (συμβολικά: **-A-**) θα έχει πλάτος 20mm και θα περιλαμβάνει τα στερεά δοκίμια με μήκος από **10mm** έως **30mm** ή
- Η δεύτερη τάξη (συμβολικά: **-B-**) θα έχει πλάτος 30mm και θα περιλαμβάνει τα στερεά δοκίμια με μήκος από **30mm** έως **60mm** ή
- Η τρίτη τάξη (συμβολικά: **-Γ-**), θα έχει πλάτος 30mm και θα περιλαμβάνει τα στερεά δοκίμια με μήκος από **60mm** έως **90mm** ή και

- Η τέταρτη τάξη (συμβολικά: -Δ-), το πλάτος της οποία προσδιορίζεται από την κοκκομετρία του μεγίστου κόκκου του δείγματος, περιλαμβάνει το $\geq 90\text{mm}$ κοκκομετρικό κλάσμα.

Συνοπτικά:

Τάξεις Κοκκομετρίας	Όρια Κοκκομετρικής Ταξινόμησης (mm)
-Α-	[10,30)
-Β-	[30,60)
-Γ-	[60,90)
-Δ-	≥ 90

Πίνακας 6.5: Τάξεις κοκκομετρίας

6.5.2 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ταξινόμησης

Βάση των ανωτέρω, αναφορικά με την κοκκομετρική διαβάθμιση του μελετούμενου δείγματος στερεών βρέθηκαν τα ακόλουθα στοιχεία:

Γενική κοκκομετρική ταξινόμηση:

Τάξη (mm)	Πλήθος Στερεών	Επί τοις (%)	Κατά Βάρος Κοκκομετρική Σύσταση (kg)	Επί τοις (%)
[10-30)	207	51.11	19.13	36.65
[30-60)	115	28.40	24.24	46.43
[60-90)	64	15.80	7.18	13.75
≥ 90	19	4.69	1.65	3.16
Σύνολα:	405	100	52.2	100

Πίνακας 6.6: Γενική κοκκομετρική σύσταση δείγματος κόκκων κλίνκερ

Κοκκομετρική ταξινόμηση ανά κατηγορία σχηματικής προσέγγισης:

Τάξη (mm)	Σχηματικές κατηγορίες κατά Zingg				
	Σφαιροειδή (τεμάχια)	Δισκοειδή (τεμάχια)	Κυλινδρικά (τεμάχια)	Πλατυσμένα (τεμάχια)	Σύνολο
[10-30)	162	33	12	0	207
[30-60)	34	46	30	5	115
[60-90)	3	21	30	10	64
≥ 90	0	3	4	12	19
Σύνολο:	199	103	76	27	405

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ταξινόμησης ανά κατηγορία σχήματος

Σχηματικές κατηγορίες κατά Zingg					
Τάξη (mm)	Σφαιροειδή (%)	Δισκοειδή (%)	Κυλινδρικά (%)	Πλατυσμένα (%)	Σύνολο (%)
[10-30)	78.26	15.95	5.79	0	100
[30-60)	29.56	40.00	26.08	4.36	100
[60-90)	4.69	32.82	46.87	15.62	100
≥ 90	0	15.79	21.05	63.16	100

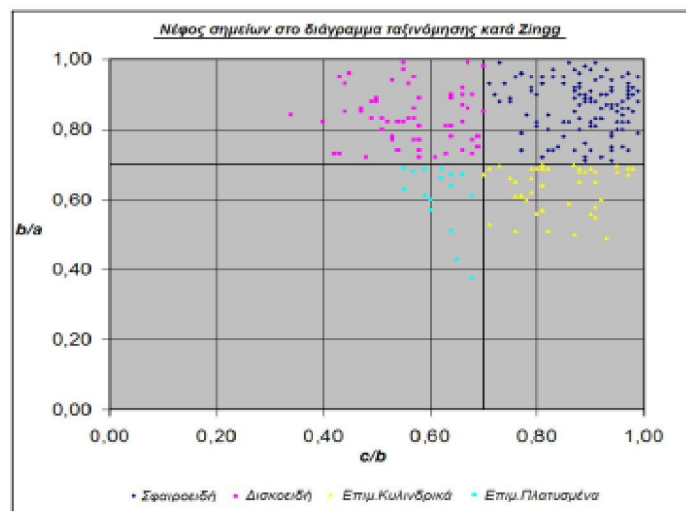
Πίνακας 6.8: Ποσοστιαία κοκκομετρική σύσταση δείγματος ανά κατηγορία σχήματος

6.6 Γενικές παρατηρήσεις

Όσον αφορά στο σχήμα των κόκκων κλίνκερ τσιμέντου παρατηρήθηκε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των στερεών του μελετούμενου δείγματος παρουσιάζει γεωμετρικά χαρακτηριστικά εγγύτερα σε αυτά της σφαίρας, ενώ ταυτόχρονα σημαντικό είναι και το ποσοστό των κυλινδρόμορφων κόκκων. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στην περιστροφική κίνηση των κλιβάνων όπτησης κατά την φάση παρασκευής τους.

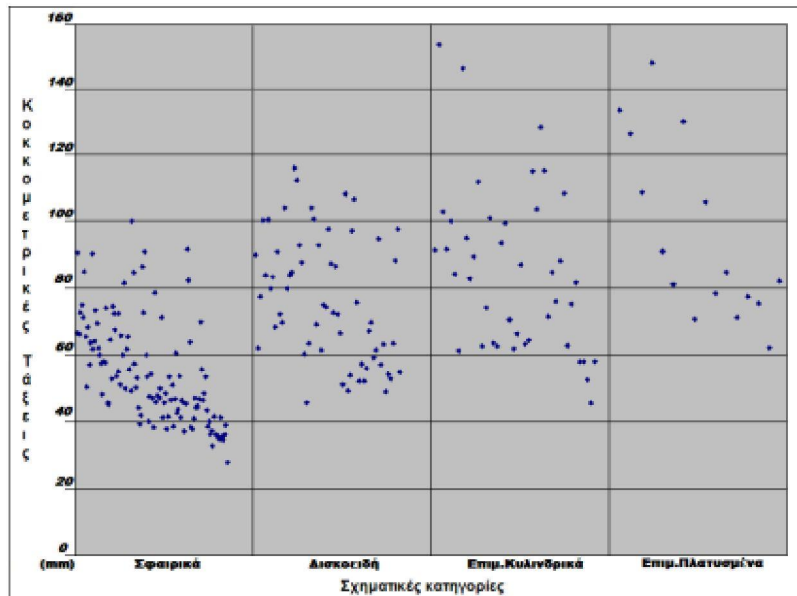
Τα δισκοειδή στερεά, το δεύτερο σε συχνότητα εμφανίσεως υποσύνολο, παρουσιάζουν χαρακτηριστικά τα οποία δείχνουν ότι πιθανώς οι κόκκοι αυτοί σχηματίστηκαν, είτε στις διατάξεις ψύξης του τηγμένου υλικού (*κοίλες επιφάνειες, καμπύλες ακμές*) είτε αποτελούν θραύσματα μεγαλύτερων πλακόμορφων στερεών, τα οποία και αυτά σχηματίστηκαν στις διατάξεις ψύξης (*επίπεδες επιφάνειες, ορθογώνιες ακμές, απότομες πλευρές*).

Τέλος, ύστερα από μακροσκοπική παρατήρηση διαπιστώθηκε ότι, τα επιμήκη πλατυσμένα στερεά, τα οποία παρουσιάζουν και τη μικρότερη συγκέντρωση στο μελετούμενο δείγμα, αποτελούν κατά βάση θραύσματα μεγαλύτερων πλακών υλικού, οι οποίες πιθανώς σχηματίστηκαν στις διατάξεις ψύξης. Οι επίπεδες επιφάνειες και οι ορθές γωνίες που σχηματίζουν οι πλευρές μεταξύ τους (*σκισίματα*) συνηγορούν στην άποψη αυτή.



Γράφημα 6.4: Νέφος σημείων (κόκκων) στο διάγραμμα ταξινόμησης Zingg

Παράλληλα παρατηρήθηκε η αύξηση των σφαιροειδών τεμαχίων στο λεπτόκοκκο κλάσμα του δείγματος. Αντιθέτως, στις ανώτερες κοκκομετρικές τάξεις, διαπιστώθηκε η μείωση της σφαιρικότητας των κόκκων και η αύξηση των δισκοειδών, των κυλινδρικών καθώς και των επιμήκων πλατυσμένων τεμαχίων. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται η πιθανή σχέση της σφαιρικότητας, με το κοκκομετρικό μέγεθος των στερεών. Η διαπίστωση αυτή απεικονίζεται και στο **Γράφημα 6.5** που ακολουθεί:



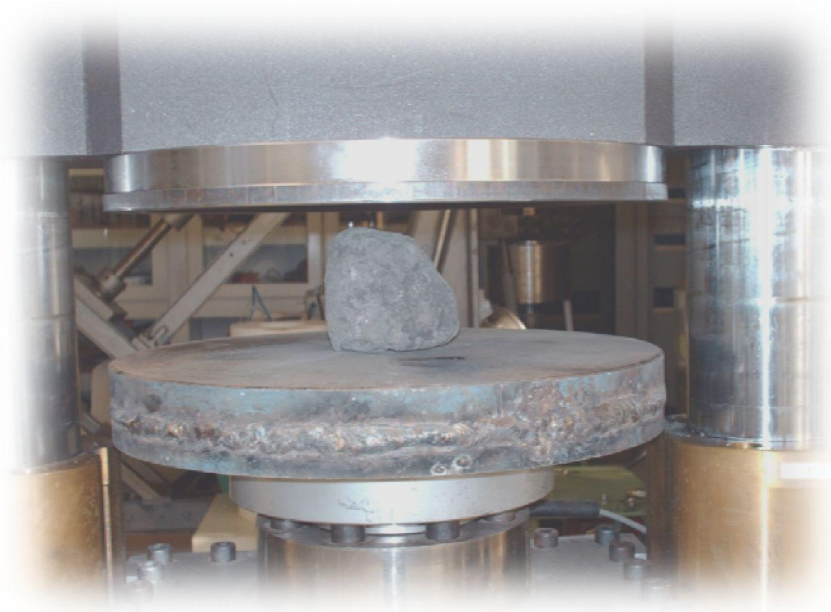
Γράφημα 6.5: Νέφος σημείων στο διάγραμμα των κοκκομετρικών τάξεων ανά σχηματική κατηγορία

Ενδεικτικό φωτογραφικό υλικό σχετικό με τα ταξινομημένα στερεά του μελετούμενου δείγματος κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, παρατίθεται στο **Παράρτημα 1**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

7

Δοκιμές σε ανεμπόδιστη μοναξονική θλίψη των κόκκων κλίνκερ τσιμέντου



Εικόνα: Κόκκος κλίνκερ στην υδραυλική μηχανή δοκιμών

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην πειραματική μεθοδολογία και στον εργαστηριακό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της ανεμπόδιστης αντοχής σε θλίψη των κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, του μελετούμενου δείγματος, καθώς επίσης και των αναπτυσσόμενων θλιπτικών φορτίων γκοφρετοποίησής τους. Παράλληλα θα παρατεθούν στοιχεία σχετικά με τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής καθώς και γενικά συμπεράσματα.

7.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός

7.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής δοκιμών

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του *Ινστιτούτου Μηχανικής Υλικών και Γεωδομών Α.Ε. (IMYT)* στην Πεντέλη Αττικής, με τη χρήση υδραυλικής μηχανής ικανότητας επιβολής μέγιστου φορτίου 200kN. Η μηχανή δοκιμών αποτελείται από ένα δικόλωνο, συμμετρικής κατασκευής, πλαίσιο φόρτισης, το οποίο φέρει, ενσωματωμένο, έναν υδραυλικό ενεργοποιητή και δυναμοκυψέλη (στην κάτω κεφαλή) μέγιστης ικανότητας στατικών φορτίων έως 200kN.



Εικόνα 7.1: Σύστημα άσκησης φορτίου μηχανής δοκιμών

Παράλληλα η μηχανή φέρει επιμηκυνσιόμετρο ενσωματωμένο στον ενεργοποιητή και λειτουργεί σε συνεργασία με ηλεκτρική μονάδα ελέγχου των δοκιμών, στην οποία με την εφαρμογή κατάλληλου λογισμικού H/Y, πραγματοποιείται η συλλογή και η ανάλυση όλων των δεδομένων της πειραματικής διαδικασίας, η έκδοση φύλλων αναφοράς, καθώς και η αρχειοθέτηση των δοκιμών. Επιπλέον στον κεντρικό ελεγκτή πραγματοποιείται η ψηφιακή απεικόνιση των τιμών του φορτίου και της μετατόπισης, με δυνατότητα παρακολούθησης των εν λόγω δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών.



Εικόνα 7.2: Γενική άποψη εργαστηρίου και μηχανής δοκιμών

7.2.2 Πλάκες θλίψης

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν σε μηχανουργείο, δύο χαλύβδινες συμπαγείς και δύσκαμπτες πλάκες θλίψης, μια άνω και μια κάτω, πάχους $20mm$ και $40mm$ αντίστοιχα και διαμέτρου $300mm$.

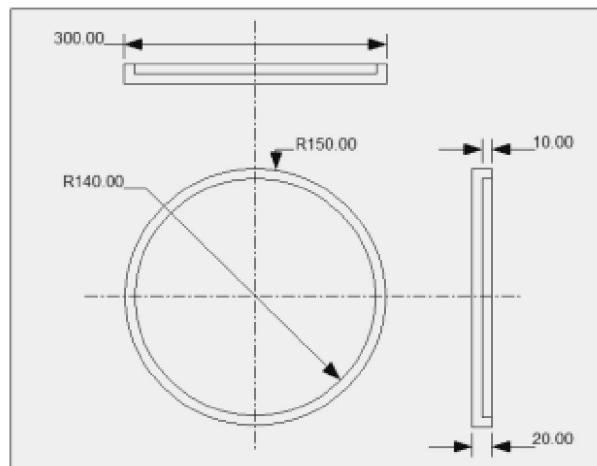


Εικόνα 7.3: Πλάκες θλίψης στην υδραυλική μηχανή δοκιμών

Στην άνω πλάκα κατασκευάστηκε κοίλωμα βάθους $10mm$, το οποίο κατά τη διάρκεια των δοκιμών, προσομοιώνει το *διάκενο λειτουργίας* των κυλίνδρων του σπαστήρα. Η διάμετρος του κοιλώματος τέθηκε ίση με $280mm$, ούτως ώστε να είναι επιτρεπτή η πλευρικά ανεμπόδιστη επέκταση και του μεγαλύτερου σε όγκο δοκιμίου.

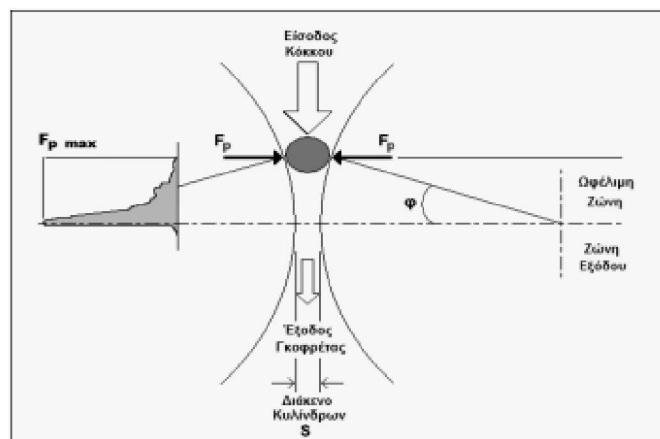


Εικόνα 7.4: Κατασκευή κοιλώματος άνω πλάκας θλίψης



Εικόνα 7.5: Σχέδιο Άνω Πλάκας

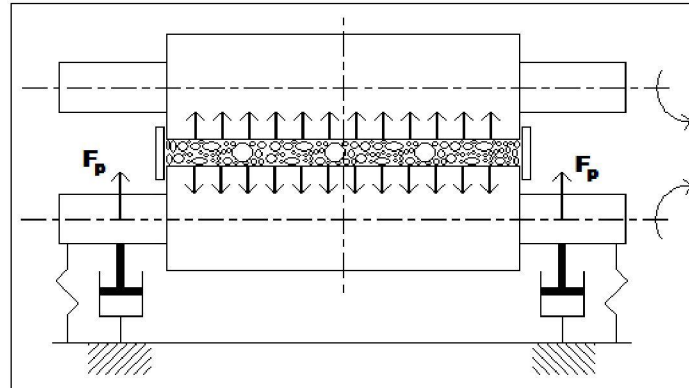
Όπως σημειώνεται σε προηγούμενα κεφάλαια, οι τροφοδοτούμενοι στην κυλινδρόπρεσα κόκκοι κλίνκερ τσιμέντου, εισέρχονται στη χοάνη που σχηματίζουν οι δύο οριζόντιοι και αντίθετα περιστρεφόμενοι κύλινδροι του σπαστήρα και φορτίζονται με σταδιακά αυξανόμενες δυνάμεις πίεσης (*Εικόνα 7.6*). Με την έναρξη της φόρτισης υπόκεινται σε φορτία τα οποία προκαλούν την *πρώτη τους θραύση* και έπειτα συμπιέζονται μέχρι το σχηματισμό ενός *συσσωματώματος λεπτόκοκκων θραυσμένων στερεών και σκόνης (γκοφρέτα)*. Η φόρτιση της γκοφρέτας παύει όταν το πάχος της γίνει ίσο με το *διάκενο λειτουργίας* των ρολών και το συσσωμάτωμα εξέρχεται της μηχανής, οδηγούμενο σε επόμενα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου.



Εικόνα 7.6: Διαδικασία σύνθλιψης κόκκου στο διάκενο των κυλίνδρων κυλινδρόπρεσας

Ωστόσο το *διάκενο λειτουργίας* είναι μια συνεχώς μεταβαλλόμενη παράμετρος, η τιμή της οποίας εξαρτάται από το πάχος του σχηματιζόμενου μεταξύ των κυλίνδρων στρώματος υλικού (*κουβέρτα*) και της εφαρμοζόμενης δύναμης πίεσης. Κατά συνέπεια, για την κατασκευή του κοιλώματος της άνω πλάκας και για πρακτικούς λόγους, κρίθηκε αναγκαία η παραδοχή ότι το *διάκενο λειτουργίας* παραμένει σταθερό και ίσο με την ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει. Η τιμή αυτή

είναι το *ιδανικό διάκενο* το οποίο εκφράζει την απόσταση των επιφανειών κατεργασίας των κυλίνδρων του σπαστήρα, πριν το σχηματισμό της *κουβέρτας*. Ωστόσο η παραδοχή αυτή δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα αφού οι μεταβολές στην τιμή του διακένου λειτουργίας είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών του μέτρου.



Εικόνα 7.7: Φόρτιση στρώματος υλικού

7.3 Τεχνικές δοκιμές στο εργαστήριο

7.3.1 Εισαγωγή

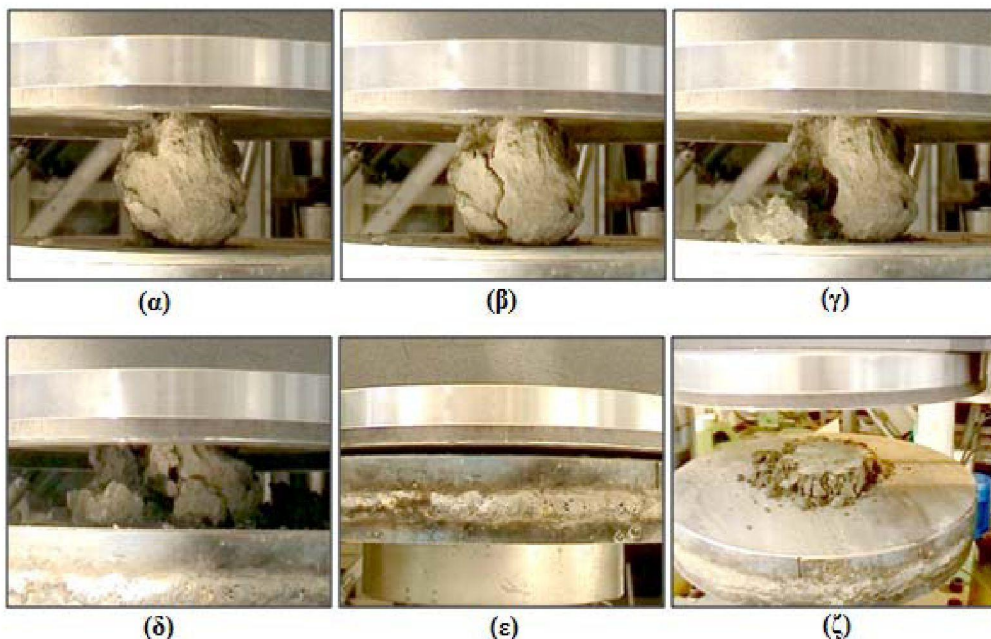
Η διαδικασία αυτή έχει σαν σκοπό τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των κόκκων κλίνκερ του δείγματος, άμεσα, μέσω της δοκιμής σε μοναξονική ανεμπόδιστη θλίψη, καθώς και την καταγραφή των επιβαλλόμενων θλιπτικών φορτίων έως το σχηματισμό **πεπιεσμένης γκοφρέτας πάχους 10mm**. Ωστόσο η μηχανική αντοχή των δοκιμίων η οποία αναφέρεται σε μοναξονικές συνθήκες φόρτισης, χωρίς την ύπαρξη πλευρικών, στις πραγματικές συνθήκες κατεργασίας του υλικού δεν υφίσταται. Αυτό διότι κάθε κόκκος, συμπιεζόμενος μεταξύ των κυλίνδρων της κυλινδρόπρεσας, υποβάλλεται σε επιπλέον πλευρικές δυνάμεις προερχόμενες από τη διαμετρική επέκταση γειτονικά φορτιζόμενων στερεών. Παρ' όλα αυτά, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα φορτία αυτά είναι υποπολλαπλάσια της αξονικής φόρτισης στην οποία υπόκεινται τα τροφοδοτούμενα στερεά, θα προχωρήσουμε στην εφαρμογή των δοκιμών σε μοναξονική ανεμπόδιστη θλίψη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σημαντικότερα σημεία της πειραματικής διαδικασίας:

7.3.2 Πειραματική διαδικασία

1. Εξαιτίας του σημαντικά μεγάλου όγκου του μελετούμενου δείγματος στερεών, διαχωρίστηκαν και οδηγήθηκαν στη φάση των εργαστηριακών δοκιμών, για τον προσδιορισμό της θλιπτικής τους αντοχής, μόνο τα ευμεγέθη στερεά και ειδικότερα αυτά της **$\geq 40mm$** κοκκομετρικής τάξης.
2. Τα επιλεγμένα δοκίμια μεταφέρονται στο εργαστήριο και φυλάσσονται μέχρι την πραγματοποίηση των δοκιμών. Κατά τη μεταφορά, λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα ούτως ώστε να περιοριστεί η πιθανότητα καταστροφής τους

(π.χ. θραύση), ενώ στο εργαστήριο προστατεύονται κατάλληλα από την ατμοσφαιρική υγρασία (κυρίως) και κάθε είδους άλλη εξωτερική επίδραση (αέρας, ήλιος κτλ.).

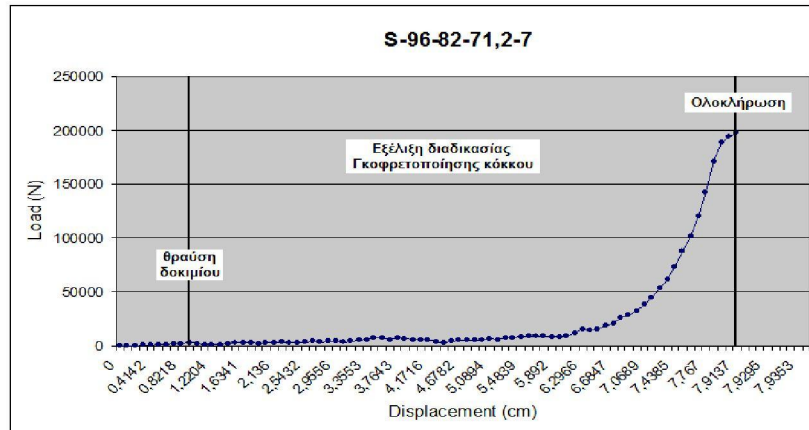
3. Οι κόκκοι του δείγματος **δεν** διαμορφώνονται πριν την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας, διατηρώντας τα αρχικά γεωμετρικά και κοκκομετρικά τους χαρακτηριστικά (σχήμα, όγκος, επιφανειακές ανωμαλίες κ.α.).
4. Μετέπειτα, κάθε ένα από τα 174 δοκίμια του προς μελέτη υπο-δείγματος, τοποθετείται μεταξύ των χαλύβδινων πλακών, κεντρωμένα σε σχέση με τον άξονα φόρτισης και υπόκεινται σε ταχεία μοναξονική θλίψη.
5. Η καταγραφή των δεδομένων (αξονικό φορτίο-αξονική παραμόρφωση) ξεκινά ταυτόχρονα με την έναρξη της κάθε δοκιμής, από τον κεντρικό ελεγκτή της πρέσας, ώστε το φορτίο της πρώτης θραύσης του κάθε δοκιμίου να μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς. Ο έλεγχος της αξονικής παραμόρφωσης των κόκκων πραγματοποιείται έμμεσα, μέσω του ενσωματωμένου στον υδραυλικό ενεργοποιητή μηχανομοιόμετρου, το οποίο καταγράφει τη μετατόπιση του εμβόλου.
6. Η επιβολή του φορτίου γίνεται βαθμιαία και με σταθερή ταχύτητα φόρτισης περίπου 0.25 έως 0.30mm/sec . Σε πρώτη φάση επέρχεται η θραύση του δοκιμίου και εν συνεχεία η συμπίεση του, έως το σχηματισμό πεπιεσμένης γκοφρέτας, πάχους 10mm , στην επιφάνεια της κάτω πλάκας. Πρακτικά το πείραμα τερματίζεται όταν τα «χείλη» της άνω πλάκας έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια της κάτω. Η εξέλιξη της πειραματικής διαδικασίας, για ενδεικτικό δοκίμιο, παρουσιάζεται στις φωτογραφίες που ακολουθούν:



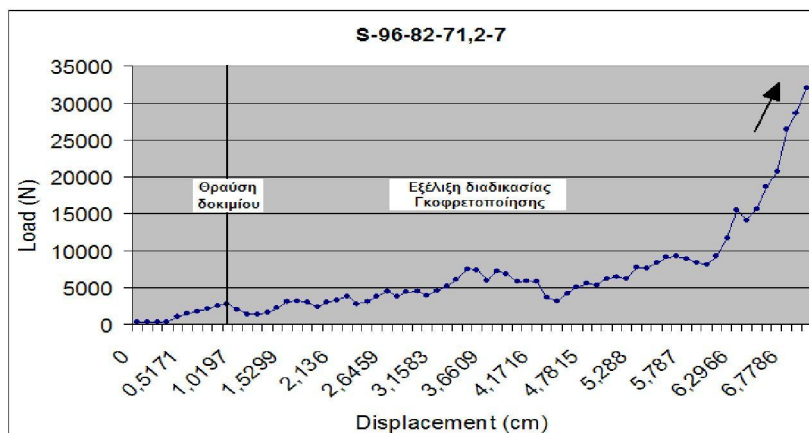
α) Έναρξη φόρτισης - **β)** Αστοχία δοκιμίου (φορτίο θραύσης) - **γ)** Έναρξη φάσης συμπίεσης, **δ)** Εξέλιξη συμπίεσης κόκκου - **ε)** Ολοκλήρωση διαδικασίας - **ζ)** Σχηματισμένη γκοφρέτα

7. Τα πειραματικά δεδομένα κάθε δοκιμής αποθηκεύονται σε φύλλα excel και αρχειοθετούνται βάση της κωδικοποίησης που φέρουν τα δοκίμια. Παράλληλα

ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων, εκδίδονται αντίστοιχα γράφημα στα οποία αποτυπώνεται η μεταβολή του φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης του εμβόλου:



Εικόνα 7.8: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης σφαιροειδούς δοκιμίου



Εικόνα 7.9: Εστίαση στο φορτίο ρηγμάτωσης του δοκιμίου

8. Ανάλογα με το μέγεθος του δοκιμίου, η πειραματική διαδικασία ολοκληρώνεται σε χρόνο που κυμαίνεται από 20 έως 120sec. Κατά τη διάρκεια αυτής λαμβάνονται μετρήσεις, με συχνότητα 1μέτρηση/0.4sec, του επιβαλλόμενου θλιπτικού φορτίου (σε N) και της αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου (σε cm).
9. Όλα τα δεδομένα συλλέγονται και αποτυπώνονται σε φύλλο αναφοράς (excel).

7.4 Αποτελέσματα - Παρατηρήσεις

7.4.1 Γενικά

Κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 174 δοκιμές ανεμπόδιστης μοναξονικής θλίψης, σε αντίστοιχο αριθμό δοκιμών. Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω, έγινε στατιστική επεξεργασία των συλλεχθέντων στοιχείων με σκοπό την εξαγωγή διαφόρων συμπερασμάτων σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των κόκκων κλίνκερ τσιμέντου.

7.4.2 Θλιπτική αντοχή ρηγμάτωσης δοκιμίων

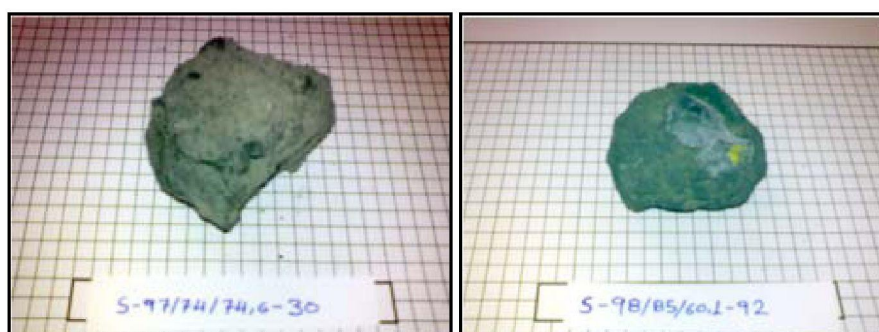
Αναφορικά με τη *θλιπτική αντοχή* των δοκιμίων, για κάθε μια από τις τέσσερις κατηγορίες σχήματος, βρέθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα τα οποία αποτυπώνονται στον **Πίνακα 7.1** καθώς και στα διαγράμματα που ακολουθούν.

	Εύρος τιμών φορτίου ρηγμάτωσης (kN)	Μέση τιμή κατηγορίας (kN)
Σφαιροειδή Δοκίμια	0,53 ~ 11,69	3,52
Δισκοειδή Δοκίμια	0,41 ~ 12,13	2,64
Επιμ.Κυλινδρικά Δοκίμια	0,60 ~ 8,99	2,82
Επιμ.Πλατυσμένα Δοκίμια	0,34 ~ 4,02	1,57

Πίνακας 7.1: Φορτία ρηγμάτωσης

Σύμφωνα με τα στοιχεία του **Πίνακα 7.1**, οι τιμές του φορτίου ρηγμάτωσης για το δείγμα των σφαιροειδών κόκκων κλίνκερ κυμαίνονται από *0,53 έως 11,69kN*, με μέσο όρο κατηγορίας *3,52kN*, ενώ για το δείγμα των δισκοειδών από *0,41 έως 12,13kN*, με μέσο όρο *2,64kN*. Παράλληλα για τα επιμ. κυλινδρικά δοκίμια οι τιμές του φορτίου ρηγμάτωσης θραύσης κυμαίνονται από *0,60 έως 8,99kN*, με μέσο όρο κατηγορίας *2,82kN*, ενώ για τα επιμ. πεπλατυσμένα από *0,34 έως 4,02kN*, με μέσο όρο *1,57kN*.

Η σημαντική διακύμανση η οποία παρατηρείται στις τιμές των φορτίων θραύσης, οφείλεται στην ύπαρξη πόρων, μικρορωγμών και άλλης μορφής ασυνεχειών μικρής κλίμακας στη μάζα των κόκκων, παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά τη θλιπτική αντοχή τους. Συμπερασματικά παρατηρούμε ότι δοκίμια με υψηλό ποσοστό μικρο-ρηγματώσεων και έντονο πορώδες (*χαμηλή πυκνότητα*), ανεξαρτήτως του κοκκομετρικού τους μεγέθους και των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών, παρουσιάζουν χαμηλή ανθεκτικότητα σε συμπίεση.



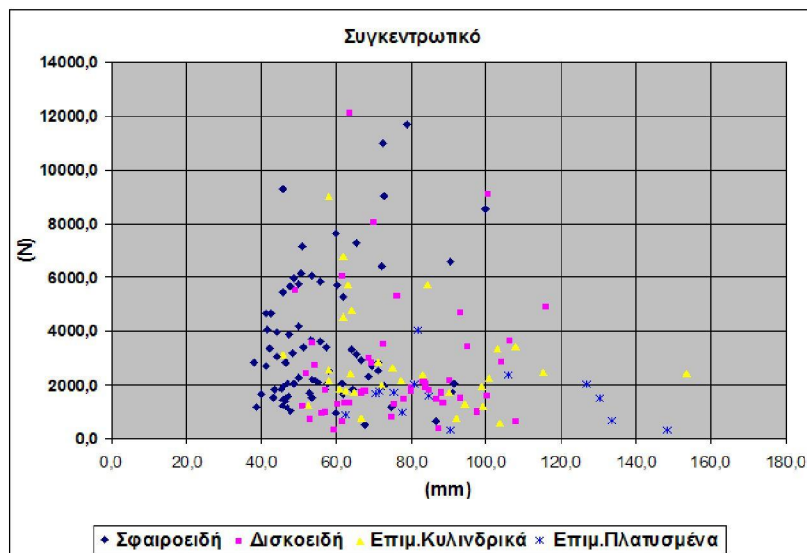
Εικόνα 7.10

- ο **(Αριστερά)**: Σφαιροειδές δοκίμιο με εκτεταμένες μικρο-ρωγματώσεις στην εξωτερική του επιφάνεια και έντονο πορώδες (*μακροσκοπική παρατήρηση*) **Φορτίο θραύσης: 1.18kN**
- ο **(Δεξιά εικόνα)**: Σφαιροειδές δοκίμιο με μικρό ποσοστό μικρο-ρωγματώσεων, χαμηλό πορώδες και αυξημένη συνοχή (*μακροσκοπική παρατήρηση*) **Φορτίο θραύσης: 7.63kN**

Ωστόσο, μια μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμών κατέδειξε ότι τα ευμεγέθη στερεά (B , Γ και Δ κοκκομετρική τάξη) εν συγκρίσει με τα λεπτόκοκκα (A κοκκομετρική τάξη), στερούνται συνοχής και εμφανίζουν συχνότερα υψηλό ποσοστό μικρο-ρηγματώσεων στη μάζα τους, καθώς και έντονο πορώδες. Το παραπάνω και με δεδομένη την παρατήρηση προηγούμενου κεφαλαίου κατά την οποία τα λεπτόκοκκα στερεά εμφανίζουν συχνότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά εγγύτερα σε αυτά της σφαίρας, δικαιολογούν την κατά μέσο όρο αυξημένη αντοχή σε θλίψη των σφαιροειδών δοκιμών. Στατιστικά περίπου το 78% των στερεών της A κοκκομετρικής τάξης ταξινομούνται στην κατηγορία των σφαιροειδών.

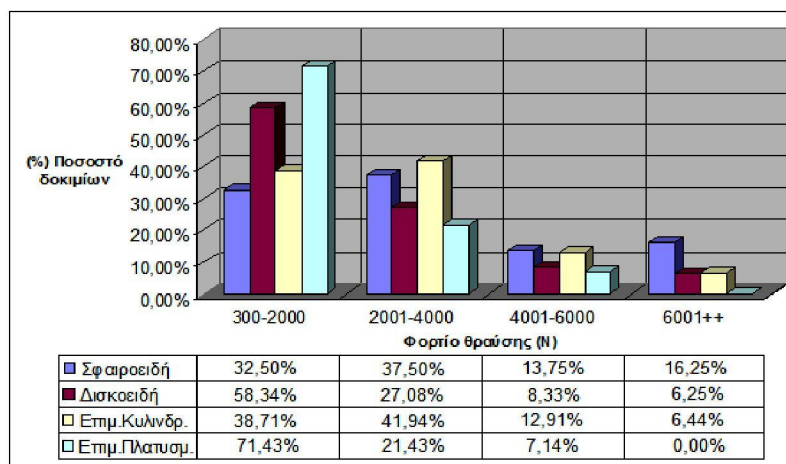
Ταυτόχρονα, μέσω της παραπάνω επισήμανσης δικαιολογείται και η χαμηλή αντοχή σε θλίψη των δοκιμών της κατηγορίας των επιμήκεις πλατυσμένων στερεών, μιας και στην κατηγορία αυτή ομαδοποιούνται κυρίως ευμεγέθη δοκίμια των κοκκομετρικών τάξεων (Γ) και (Δ).

Οι παραπάνω προτάσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν στο συμπέρασμα της ύπαρξης κάποιας συσχέτισης μεταξύ της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών και του κοκκομετρικού τους μεγέθους. Ωστόσο μια τέτοια πρόταση πιθανώς να ήταν επισφαλής και αυτό διότι, αν και στη χαμηλή κοκκομετρική τάξη εμφανίζεται ένα σημαντικό ποσοστό δοκιμών με υψηλή αντοχή σε συμπίεση, ταυτόχρονα ένας σημαντικός αριθμός στερεών εμφανίζει χαμηλή αντοχή. Συνεπώς η συσχέτιση αυτή δεν είναι ξεκάθαρη. Χαρακτηριστικά παρατίθεται το ακόλουθο διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η συσχέτιση του φορτίου θραύσης με το κοκκομετρικό μέγεθος των δοκιμών.



Εικόνα 7.11: Συσχέτιση φορτίου θραύσης με το μέγεθος των δοκιμών

Αναλυτικότερα τα φορτία θραύσης των δοκιμίων, ανά κατηγορία σχήματος, παρουσιάζονται στα *ραβδόγραμμα 1* που ακολουθεί:

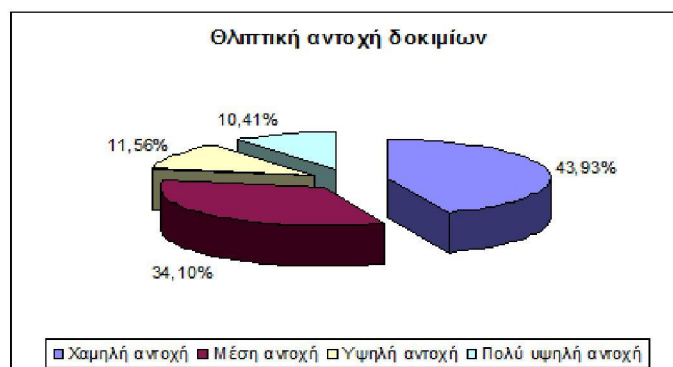


Ραβδόγραμμα 7.1

Σύμφωνα με το *ραβδόγραμμα 1*, το 71,43% των *Επιμ. Πλατυσμένων* δοκιμίων, το 58,34% των *Δισκοειδών*, το 38,71% των *Κυλινδρικών* και το 32,50% των *Σφαιροειδών* παρουσιάζουν *χαμηλή* αντοχή σε θλίψη, αστοχώντας σε φορτία μικρότερα των 2000N. Εξ' αυτών δε, περίπου το 35,71% των *Επιμ. Πλατυσμένων*, το 16,67% των *Δισκοειδών*, το 9,68% των *Επιμ. Κυλινδρικών* και το 3,57% των *Σφαιροειδών* θραύονται σε θλιπτικά φορτία μικρότερα και των 1000N.

Μέση αντοχή σε θλίψη (2000N,4000N] εμφανίζει το 41,94% των *Κυλινδρικών*, το 37,50% των *Σφαιροειδών*, το 27,08% των *Δισκοειδών* και το 21,43% των *Επιμ. Πλατυσμένων* δοκιμίων, ενώ *υψηλή* αντοχή (4000N,6000N] παρουσιάζει το 13,75% των *Σφαιροειδών*, το 12,91% των *Κυλινδρικών*, το 8,33% των *Δισκοειδών* και το 7,14% των *Επιμ. Πλατυσμένων* στερεών. Τέλος *πολύ υψηλή* αντοχή (>6000N) εμφανίζει το 16,25% των *Σφαιροειδών*, το 6,44% των *Κυλινδρικών* και το 6,25% των *Δισκοειδών* δοκιμίων.

Ανεξαρτήτως των γεωμετρικών και κοκκομετρικών χαρακτηριστικών, η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων του δείγματος διαμορφώνεται ως εξής: το 43,93% των στερεών παρουσιάζει *χαμηλή* αντοχή σε θλίψη, το 34,10% *μέση* αντοχή, το 11,56% *υψηλή* αντοχή, ενώ το 10,41% *πολύ υψηλή* αντοχή.

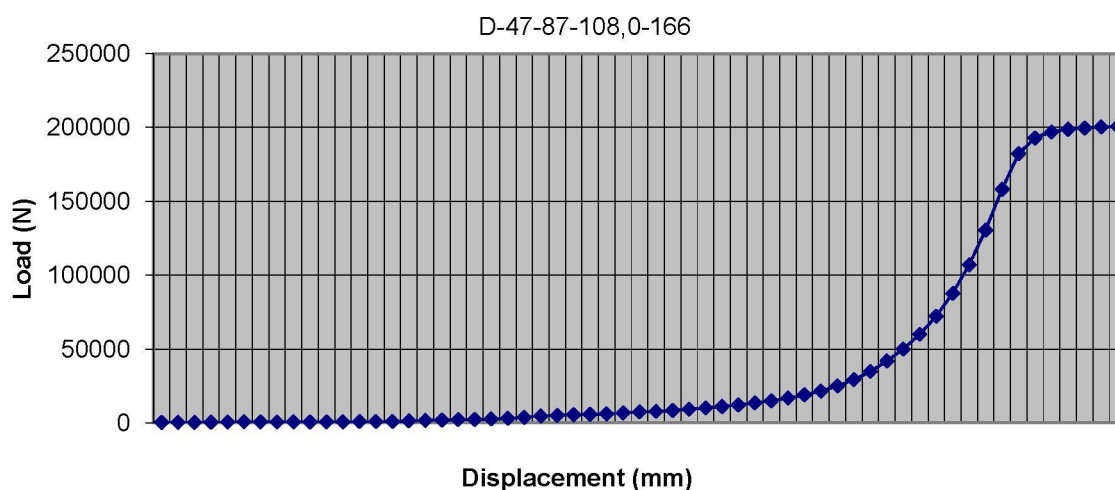
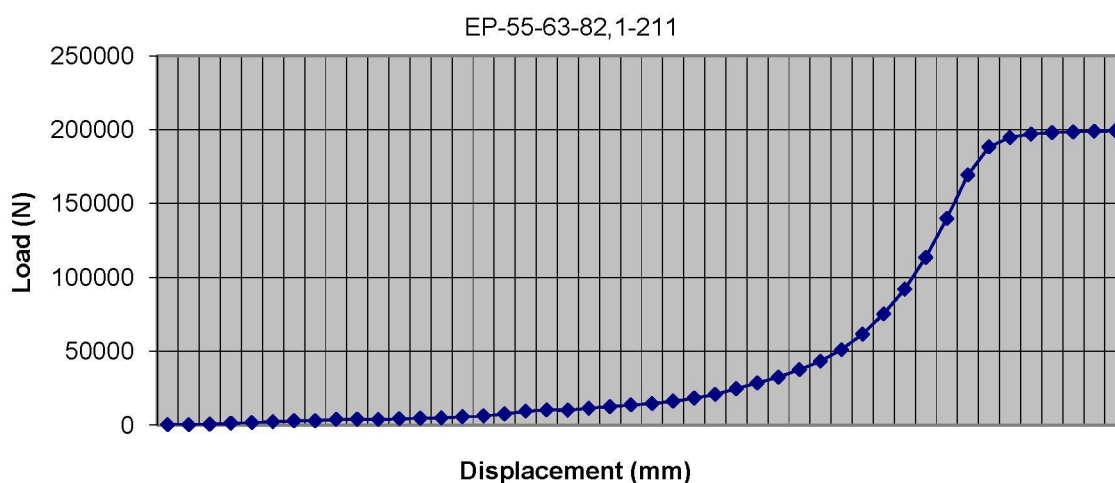


Εικόνα 7.12: Θλιπτική αντοχή δοκιμίων ανεξαρτήτως των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών

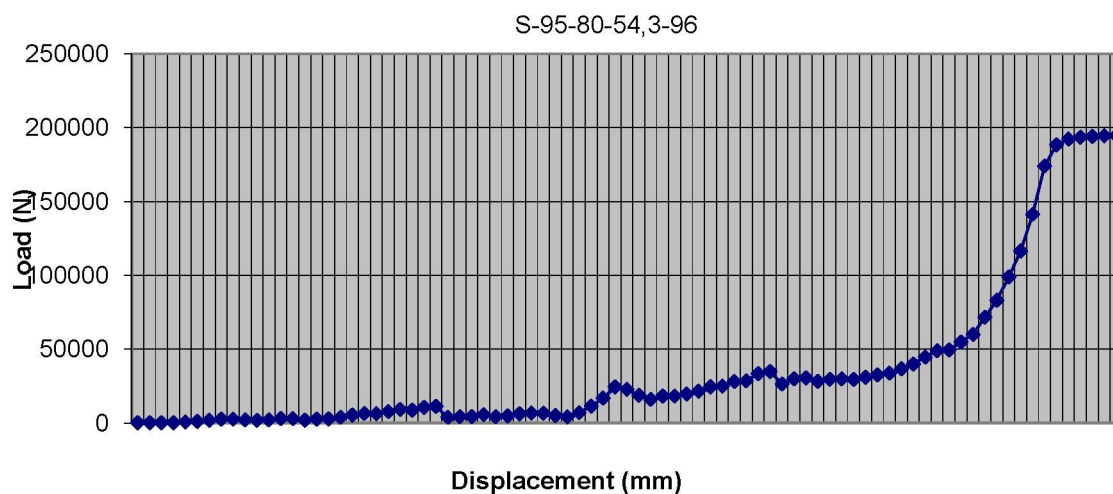
7.4.3 Θλιπτικά φορτία γκοφρετοποίησης

Αναφορικά με τα φορτία που αναπτύσσονται μέχρι το σχηματισμό πεπιεσμένης γκοφρέτας πάχους 10mm, σημειώνουμε τα ακόλουθα:

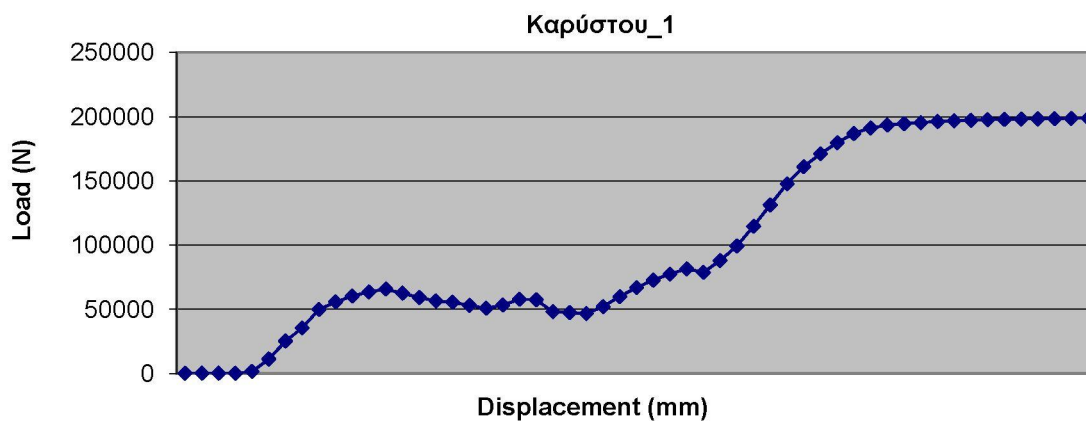
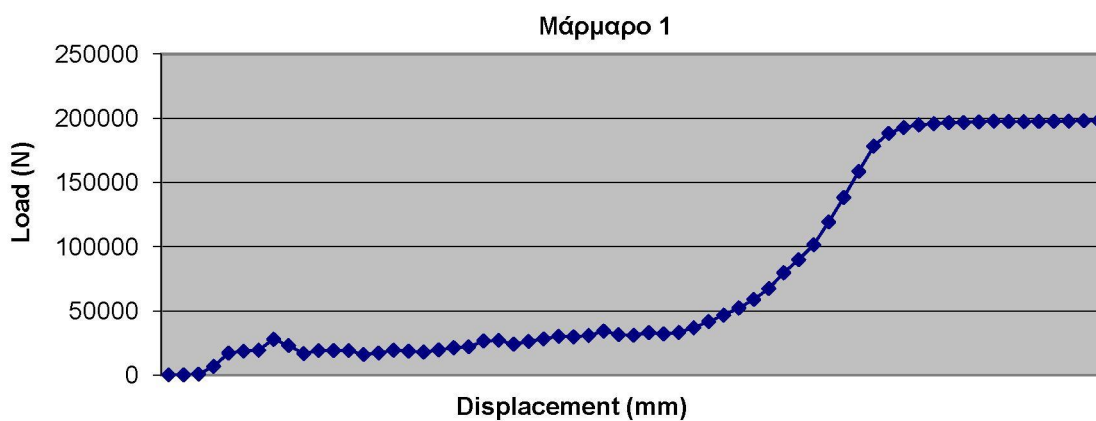
⇒ Τα δοκίμια τα οποία είναι έντονα ρηγματωμένα, με αυξημένο πορώδες και γενικά σαθρή δομή (*μακροσκοπικές παρατηρήσεις*) εν γένει παρουσιάζουν ομαλή, σχεδόν γραμμική, αύξηση των θλιπτικών φορτίων γκοφρετοποίησης, μέχρι την απόδοση του πεπιεσμένου συσσωματώματος. Τέτοια συμπεριφορά παρουσιάζουν συχνότερα τα ευμεγέθη στερεά δοκίμια της μεγαλύτερης των 60mm κοκκομετρικής τάξης.



⇒ Αντιθέτως, τα σκληρά, περισσότερο συμπαγή δοκίμια παρουσιάζουν σημαντικότερες διακυμάνσεις στα αναπτυσσόμενα θλιπτικά φορτία γκοφρετοποίησης τους. Γενικά, τέτοια συμπεριφορά εμφανίζουν τα λεπτόκοκκα δοκίμια του δείγματος, κυρίως της <60mm κοκκομετρικής τάξης.



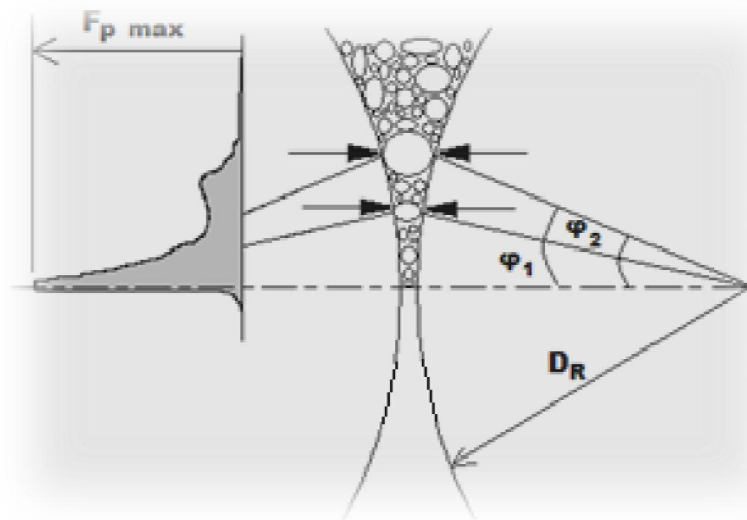
Συγκριτικά παραθέτουμε αντίστοιχα διαγράμματα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε άλλα αδρανή υλικά όπως το **Πεντελικό Μάρμαρο** και η πέτρα **Καρύστου**.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

8

Μοντελοποίηση της συμπίεσης των κόκκων



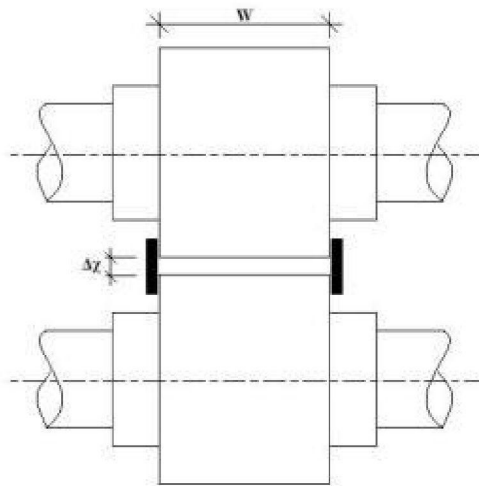
Εικόνα: Φόρτιση κόκκων στα ρολά του σπαστήρα

8.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στοιχεία αναφορικά με τη διαδικασία φόρτισης, συμπίεσης και τελικά γκοφρετοποίησης των τροφοδοτούμενων στα ρολά του σπαστήρα στερεών, ενώ παράλληλα θα αναπτυχθούν και θα παρατεθούν οι αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τη διαδικασία αυτή και που θα αποτελέσουν τμήμα του μαθηματικού μοντέλου, για την προσομοίωση της κατεργασίας.

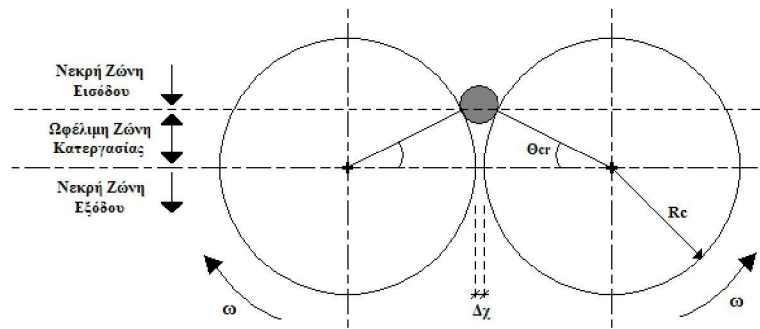
8.2 Φόρτιση του στρώματος υλικού στους κυλίνδρους του σπαστήρα

Όπως περιγράφεται και σε προηγούμενα κεφάλαια, τα χονδρόκοκκα στερεά, το λεπτόκοκκο κλάσμα και οι σκόνες, του τροφοδοτούμενου στο σπαστήρα υλικού, εισέρχονται στη *χοάνη* που σχηματίζουν οι δύο οριζόντιοι και αντίθετα περιστρεφόμενοι κύλινδροι της πρέσας, δημιουργώντας ανάμεσα τους **στρώμα υλικού (κουβέρτα)**. Το πλάτος του σχηματιζόμενου στρώματος υλικού είναι πάντα ίσο με το πλάτος (W) της ζώνης κατεργασίας των κυλίνδρων ενώ το πάχος του, συνδέεται άμεσα με την ακτίνα τους, καθώς και το εφαρμοζόμενο διάκενο λειτουργίας (Δx). Για το λόγο αυτό, η αύξηση του πλάτους της ζώνης κατεργασίας των κυλίνδρων, καθώς και της ακτίνας αυτών, επιφέρουν, υπό προϋποθέσεις, την αύξηση της παραγωγικότητας του μηχανήματος.



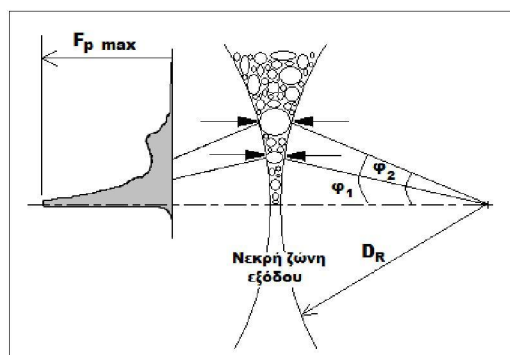
Εικόνα 8.1: Κάτοψη της ζώνης κατεργασία των κυλίνδρων

Εντός της χοάνης ο κάθε κόκκος στερεού, ανάλογα με το μέγεθός του, φορτίζεται και θραύεται, από τη στιγμή που αυτός βρεθεί παγιδευμένος ανάμεσα στους κυλίνδρους, δηλαδή στη μικρότερη απόσταση από τα κέντρα περιστροφής τους. Από τη στιγμή δε που οι κύλινδροι επιβάλουν στον κόκκο του υλικού τα πρώτα θλιπτικά φορτία, θεωρείται ότι το τεμάχιο έχει περάσει από τη **νεκρή ζώνη εισόδου**, στην **ωφέλιμη ζώνη γκοφρετοποίησης** της χοάνης.



Εικόνα 8.2: Λειτουργικές ζώνες στη χοάνη των ρολών

- Ως **νεκρή ζώνη εισόδου** ορίζω το τμήμα εκείνο της χοάνης, στο οποίο συσσωρεύεται το τροφοδοτούμενο υλικό, πριν του επιβληθούν τα πρώτα θλιπτικά φορτία. Στο γεγονός αυτό έγκειται και ο χαρακτηρισμός «νεκρή ζώνη», διότι η φόρτιση των στερεών στο τμήμα αυτό, σαν αποτέλεσμα της λειτουργίας των κυλίνδρων, είναι σχεδόν μηδενική. Κατά συνέπεια μπορούμε να πούμε ότι η **νεκρή ζώνη εισόδου** αποτελεί την εσωτερική, βραχύχρονη αποθήκη υλικού, του σπαστήρα.
- Ως **ωφέλιμη ζώνη γκοφρετοποίησης** ορίζω το τμήμα της χοάνης στο οποίο οι κόκκοι του τροφοδοτούμενου υλικού υποβάλλονται σε δυνάμεις συμπίεσης μεγάλης έντασης, για μια και μόνο φορά (σε αντίθεση με άλλα συστήματα όπως π.χ. οι κυλινδρόμυλοι), που ανάλογα με τη δυναμικότητα της πρέσας κυμαίνονται μεταξύ των 7,0 έως 20,0 kN/mm. Οι οριζόντιες δυνάμεις για τη φόρτιση και θραύση των διερχόμενων μεταξύ των κυλίνδρων στερεών κόκκων, μεταφέρονται από συμμετρικά τοποθετημένα υδραυλικά έμβολα στα άκρα του ενός εκ των δύο κυλίνδρων και κατανέμονται ομοιόμορφα πάνω στο στρώμα του υλικού. Οι δυνάμεις συμπίεσης αυξάνουν σταδιακά μέσα στην ζώνη γκοφρετοποίησης, ενώ κορυφώνονται όταν η μάζα του στερεού κόκκου βρεθεί πάνω στην διάκεντρο των ρολών.



Εικόνα 8.3: Εξέλιξη επιβαλλόμενων δυνάμεων συμπίεσης, σε κόκκους εντός της ζώνης γκοφρετοποίησης

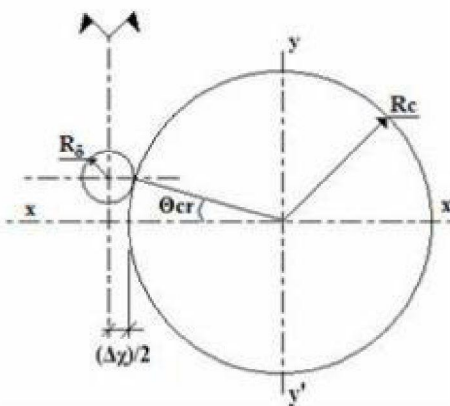
Το υλικό, με την έξοδο του από τη ζώνη κατεργασία, εισέρχεται στη **νεκρή ζώνη εξόδου**, έχοντας τη μορφή συσσωματώματος σκόνης και λεπτόκοκκων στερεών. Το συσσωμάτωμα αυτό (**γκοφρέτα**), συλλέγεται στο κάτω μέρος της μηχανής και

οδηγείται για να αποδιοργανωθεί σε επόμενες διατάξεις όπως οι αερο-διαχωριστές μεγέθους.

Στους διαχωριστές η τροφοδοτούμενη γκοφρέτα, η πυκνότητα της οποίας εξαρτάται από τις συνθήκες κατεργασίας του υλικού (εφαρμοζόμενες δυνάμεις συμπίεσης και διάκενο κυλίνδρων), αφού διαλυθεί από ισχυρά και κυρίως θερμά ρεύματα αέρα (στην περίπτωση των τσιμ/νιών), διαχωρίζεται ώστε το λεπτόκοκκο κλάσμα της να οδηγηθεί στα επόμενα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Γενικά, περισσότερο από το **40%** της συνολικής τροφοδοτούμενης ποσότητας υλικού στις κυλινδρόπρεσες, παρουσιάζει κοκκομετρία, μετά την κατεργασία του, της τάξης των **90 μ m**. Ωστόσο το ποσοστό αυτό μεταβάλλεται κατά περίπτωση αφού εξαρτάται άμεσα από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού.

8.3 Κρίσιμη γωνία εμπλοκής

Ως «**κρίσιμη γωνία εμπλοκής**» ορίζω τη γωνία που σχηματίζει η διάκεντρος των κυλίνδρων του σπαστήρα, με τη νοητή ευθεία που διέρχεται από το κέντρο περιστροφής και του σημείου επαφής του στερεού με την επιφάνεια κατεργασίας, **ακριβώς** τη στιγμή που αυτό εισέρχεται στην **ωφέλιμη ζώνη γκοφρετοποίησης** της χοάνης.



Εικόνα 8.4: Εμπλοκή δοκιμίου στα ρολά σπαστήρα σε γωνία Θ_{cr}

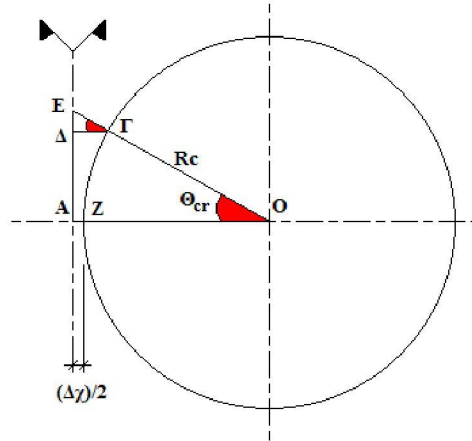
Συμβολίζω την κρίσιμη γωνία εμπλοκής με Θ_{cr} , η οποία όπως θα δειχθεί εξαρτάται από τις ακόλουθες γεωμετρικές παραμέτρους:

- D_c : Διάμετρος των κυλίνδρων του σπαστήρα
- Δ_χ : Εφαρμοζόμενο διάκενο λειτουργίας
- D_δ : Διάμετρος του εμπλεκόμενου στερεού.

8.3.1 Υπολογισμός της σχέσης για την κρίσιμη γωνία εμπλοκής

Θεωρώ τους κυλίνδρους κυλινδρόπρεσας, ακτίνας (στη ζώνη κατεργασίας) R_c και το μεταξύ τους διάκενο λειτουργίας (κατάντη της διακέντρου) Δ_χ . Στη χοάνη των ρολών ρίπτεται στερεός κόκκος ακτίνας R_δ , ο οποίος εμπλέκεται σε γωνία Θ_{cr} και εισέρχεται στην ωφέλιμη ζώνη γκοφρετοποίησης. Ζητούμενο αποτελεί η σύνδεση της

θ_{cr} , με τα κρίσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά του σπαστήρα (Ακτίνα κυλίνδρων R_c - Διάκενο λειτουργίας $\Delta\chi$) και την κοκκομετρία του τροφοδοτούμενου υλικού.



Εικόνα 8.5: Ανάλυση γωνίας εμπλοκής

Αν

$$\triangleright (\Delta\Gamma)=R_\delta \quad (1)$$

$$\triangleright (O\Gamma)=(OZ)=R_c \quad (2)$$

$$\triangleright (AZ)=\frac{(\Delta\chi)}{2} \quad (3)$$

Από το ορθογώνιο τρίγωνο **ΕΔΓ** λαμβάνω:

$$\cos(\theta_{cr}) = \frac{(\Delta\Gamma)}{(E\Gamma)} \stackrel{(1)}{\Leftrightarrow} \cos(\theta_{cr}) = \frac{R_\delta}{(E\Gamma)} \quad (4)$$

Και από το ορθογώνιο τρίγωνο **ΟΑΕ** :

$$(OE)^2 = (OA)^2 + (AE)^2 \Leftrightarrow (OE)^2 = \left(R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2}\right)^2 + (AE)^2 \quad (5) \text{ καθώς και}$$

$$\sin(\theta_{cr}) = \frac{(AE)}{(EO)} \Leftrightarrow (AE) = \sin(\theta_{cr})(OE) \quad (6)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (6) στην (5) λαμβάνω:

$$\begin{aligned} (OE)^2 &= \left(R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2}\right)^2 + ((OE) \sin(\theta_{cr}))^2 \Leftrightarrow (OE)^2 - (OE)^2 (\sin(\theta_{cr}))^2 = \left(R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2}\right)^2 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow (OE)^2 (1 - (\sin(\theta_{cr}))^2) = \left(R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2}\right)^2 \Leftrightarrow (OE)^2 = \frac{\left(R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2}\right)^2}{(\cos(\theta_{cr}))^2} = \sqrt{\frac{\left(R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2}\right)^2}{(\cos(\theta_{cr}))^2}} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow (OE) = \frac{R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2}}{\cos(\theta_{cr})} \quad (7) \end{aligned}$$

Έχοντας ότι: $(ΕΓ) = (ΟΕ) - (ΟΓ) \xLeftrightarrow{(2)\&(7)} (ΕΓ) = \frac{R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2}}{\cos(\theta_{cr})} - (R_c)$, μπορώ να πάρω με αντικατάσταση στη σχέση (3):

$$\cos(\theta_{cr}) = \frac{R_\delta}{R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2} - R_c} \leftrightarrow 1 = \frac{R_\delta}{R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2} - R_c \cos(\theta_{cr})} \leftrightarrow R_c + \frac{(\Delta\chi)}{2} - R_c \cos(\theta_{cr}) = R_\delta \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow 2R_c + (\Delta\chi) - 2R_c \cos(\theta_{cr}) = 2R_\delta \leftrightarrow D_c + (\Delta\chi) - D_c \cos(\theta_{cr}) = D_\delta \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow D_c \cos(\theta_{cr}) = D_c + (\Delta\chi) - D_\delta \leftrightarrow \cos(\theta_{cr}) = \frac{D_c + (\Delta\chi) - D_\delta}{D_c} \leftrightarrow$$

$$\boxed{\theta_{cr} = \cos^{-1} \left(\frac{D_c + \Delta\chi - D_\delta}{D_c} \right)} \quad (8.1)$$

Από την σχέση (8.1) διαπιστώνεται ότι η **κρίσιμη γωνία εμπλοκής** εξαρτάται από **σταθερά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά** του σπαστήρα όπως τη **διάμετρο των μεταλλικών κυλίνδρων (στην ζώνη κατεργασίας)** και το **εφαρμοζόμενο διάκενο λειτουργίας**, αλλά και από τα **κοκκομετρικά χαρακτηριστικά των τροφοδοτούμενων στερεών**. Κατά συνέπεια, για κάθε στερεό υλικό το οποίο ρίπτεται στη χοάνη και με δεδομένο ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ρολών είναι σαφώς αμετάβλητα, αντιστοιχεί μια μοναδική τιμή της θ_{cr} , από την οποία ξεκινάει η φάση της σύνθλιψης και γκοφρετοποίησης του.

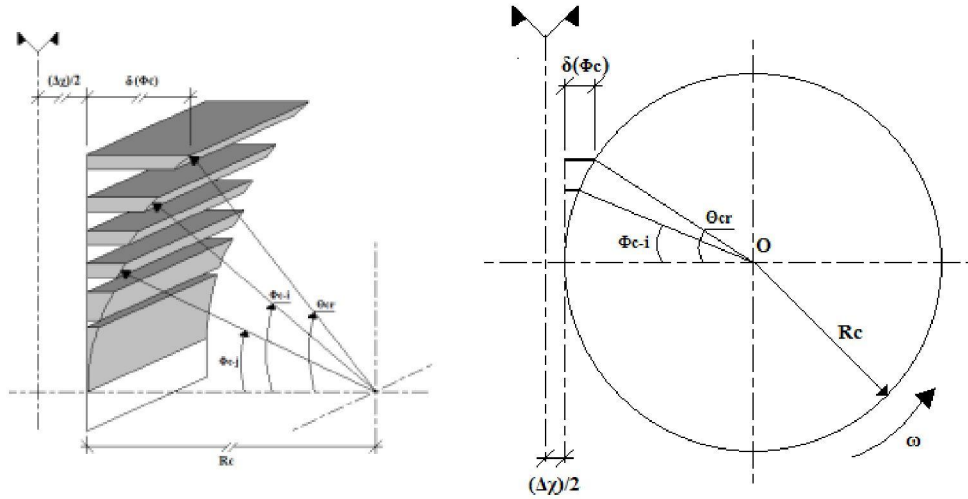
8.4 Συμπίεση κόκκων

Θεωρώ στερεό κόκκο υλικού, γνωστής κοκκομετρίας D_δ , το οποίο τροφοδοτείται στη χοάνη δύο ομοίων, οριζοντίων και αντίθετα περιστρεφόμενων κυλίνδρων, κυλινδρόπρεσας. Οι κρίσιμες διαστάσεις των κυλίνδρων, από τον κατασκευαστή τους, είναι ίσες (**Ακτίνα: $R_{c1} = R_{c2} = R_c$ & Πλάτος ζώνης κατεργασίας: $w_1 = w_2 = w$**), όπως επίσης και οι γωνιακές τους ταχύτητες, οι οποίες είναι κατά μέτρο ίσες και σταθερές ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω όταν το στερεό υλικό εμπλακεί με τους κυλίνδρους της πρέσας σε κρίσιμη γωνία θ_{cr} , τότε εισέρχεται στη ζώνη γκοφρετοποίησης που συντελείται η σταδιακή συμπίεση της μάζας του μέχρι το σχηματισμό **πεπιεσμένης γκοφρέτας** πάχους ίσου με το διάκενο λειτουργίας ($\Delta\chi$). Ζητούμενο της παρούσας παραγράφου αποτελεί η έκφραση της εξέλιξης της συμπίεσης αυτής του στερεού, μέσα στη ζώνη γκοφρετοποίησης, μέχρι το σχηματισμό του πεπιεσμένου συσσωματώματος, συναρτήσει της γωνίας περιστροφής των κυλίνδρων του σπαστήρα. Την γωνία αυτή την ονομάζω «**γωνία συμπίεσης**» και τη συμβολίζω Φ_c .

Συμβολίζοντας τη συμπίεση του στερεού με το γράμμα δ , η συνάρτηση $\delta = f(\Phi_c)$ βρίσκεται ότι προκύπτει από τη μαθηματική έκφραση ως εξής:

$$\delta(\Phi_c) = R_c(1 - \cos(\Phi_c)) \quad , \text{ με } \Phi_c \in [0, \theta_{cr}] \quad (8.2)$$



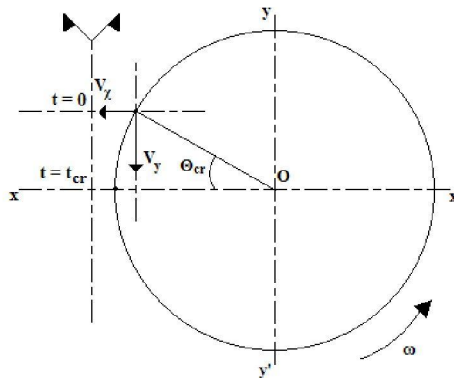
Εικόνα 8.6: Συμπίεση στερεού κόκκου

Όπου: R_c , η ακτίνα των κυλίνδρων του σπαστήρα.

8.4.1 Υπολογισμός της σχέσης συμπίεσης του κόκκου

Έστω στερεό υλικό το οποίο ρίπτεται στη χοάνη του σπαστήρα και εμπλέκεται με τους κυλίνδρους σε κρίσιμη γωνία θ_{cr} . Αν θεωρήσω t_{cr} το συνολικό χρόνο που απαιτείται για να διέλθει το στερεό μέσα από τη ζώνη γκοφρετοποίησης, τότε για δεδομένη ακτίνα κυλίνδρων R_c και για δεδομένη (και σταθερή) γωνιακή ταχύτητα ω , η συμπίεση του στερεού είναι δυνατόν να εκφραστεί μέσω της μεταβολής της οριζόντιας συνιστώσας της γραμμικής ταχύτητας των κυλίνδρων, στο χρονικό διάστημα $[0, t_{cr}]$. Μαθηματικά εκφρασμένη η ανωτέρω πρόταση, δίνεται στη συνέχεια από τη **Σχέση (1)**:

$$\int_0^{t_{cr}} V_x dt \quad \text{Σχέση (1)}$$



Εικόνα 8.7: Ανάλυση συνιστωσών γραμμικής ταχύτητας ρολού

Βρίσκοντας ότι η οριζόντια συνιστώσα της γραμμικής ταχύτητας του κυλίνδρου, συναρτήσει της γωνιακής του ταχύτητας, δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{V}_x = V \sin(\omega t)$$

και με δεδομένη τη Σχέση 1 προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \delta(t) &= \int_0^{t_{cr}} V dt = \int_0^{t_{cr}} V \sin(\omega t) dt = \int_0^{t_{cr}} \omega R_c \sin(\omega t) dt = \omega R_c \int_0^{t_{cr}} \sin(\omega t) dt = \\ &= \omega R_c \left[-\frac{\cos(\omega t)}{\omega} \right]_0^{t_{cr}} = \omega R_c \left[-\frac{\cos(\omega t_{cr})}{\omega} + \frac{1}{\omega} \right] = -R_c \cos(\omega t_{cr}) + R_c \rightarrow \\ &\rightarrow \delta(t) = R_c (1 - \cos(\omega t_{cr})) \quad (2) \end{aligned}$$

Η παραπάνω μαθηματική Σχέση (2) εκφράζει την εξέλιξη της συμπίεσης του στερεού, εντός της ζώνης γκοφρετοποίησης, συναρτήσει του χρόνου κατεργασίας.

Εξ' ορισμού για τη γωνιακή ταχύτητα των ρολών έχουμε: $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ όπου η ω θεωρείται σταθερά ορισμένη από την κατασκευή του σπαστήρα.

Για τα $\Delta\theta$ και Δt ορίζουμε:

- $\theta_2 = \theta_{cr}$ (θέση εμπλοκής) και $t_2 = 0$ (έναρξη κατεργασίας)
- $\theta_1 = \theta_0 = 0^\circ$ (θέση σχηματισμού της γκοφρέτας πάνω στη διάκεντρο των κυλίνδρων του σπαστήρα) και $t_1 = t_{cr}$ (διάρκεια γκοφρετοποίησης)

Επομένως από τη γωνιακή ταχύτητα των κυλίνδρων προκύπτει ότι:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_{cr}}{t_{cr}} \quad \text{ή} \quad \theta_{cr} = \omega t_{cr} \quad (3)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (3), στη σχέση (2), παίρνουμε την έκφραση της εξέλιξης της συμπίεσης του στερεού, μέσα στη ζώνη γκοφρετοποίησης, συναρτήσει της γωνίας συμπίεσης:

$$\delta(\theta_{cr}) = R_c (1 - \cos(\theta_{cr})) \quad \text{ή}$$

$$\boxed{\delta(\Phi_c) = R_c (1 - \cos(\Phi_c))} \quad \text{με } \Phi_c \in [0, \theta_{cr}]$$

8.5 Μαθηματική σχέση μείωσης της ακτίνας του κόκκου

Έστω κόκκος στερεού, ακτίνας R_δ , ο οποίος εισέρχεται στην ωφέλιμη ζώνη γκοφρετοποίησης και υπόκειται σε σταδιακά αυξανόμενα θλιπτικά φορτία. Όπως αποδείχτηκε παραπάνω, η σταδιακή συμπίεση του στερεού, εντός της ζώνης, προκύπτει από τη μαθηματική έκφραση $\delta(\Phi_c) = R_c (1 - \cos(\Phi_c))$. Προσθέτοντας στη

σχέση αυτή και τον παράγοντα του διάκενου λειτουργίας Δ_χ του σπαστήρα, μπορούμε να πάρουμε τη σταδιακά μειούμενη ακτίνα του τροφοδοτούμενου στερεού, συναρτήσει της γωνίας συμπίεσης. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

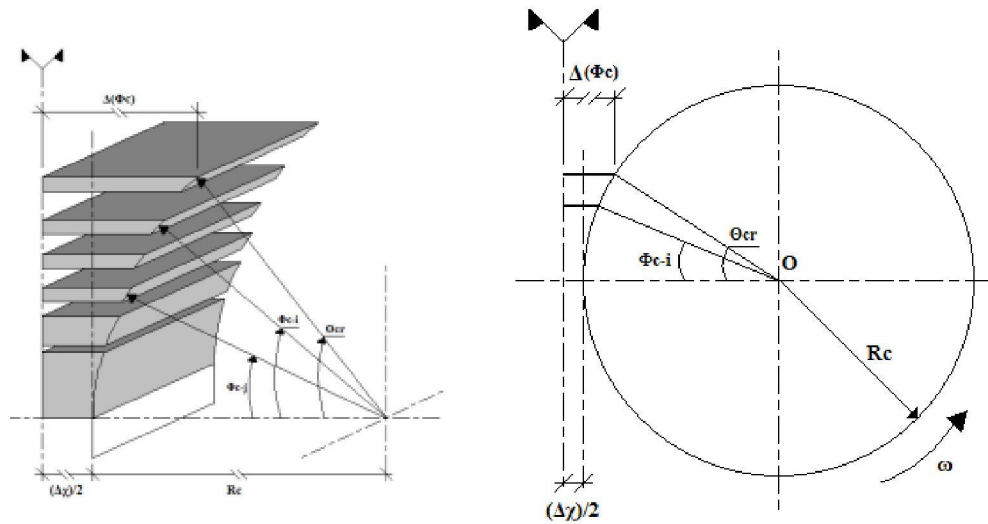
$$\Delta(\Phi_c) = \delta(\Phi_c) + \frac{(\Delta_\chi)}{2} \xLeftrightarrow{(8.2)} \boxed{\Delta(\Phi_c) = R_c(1 - \cos(\Phi_c)) + \frac{(\Delta_\chi)}{2}} \quad (8.3)$$

όπου: $\Phi_c \in [0, \theta_{cr}]$

Από τη σχέση (8.3) προκύπτει η συμπεζόμενη ακτίνα του τροφοδοτούμενου στερεού υλικού, για κάθε βήμα της γωνίας συμπίεσης, δηλαδή για κάθε $\Phi_{c(i)} \rightarrow \Phi_{c(i+1)}$.

Συνεπώς για τις ακραίες θέσεις της χοάνης των ρολών θα έχουμε:

- Για γωνία συμπίεσης $\Phi_c = \theta_{cr}$ (γωνία εμπλοκής) $\rightarrow \Delta(\Phi_c) = R_\delta$ (ακτίνα στερεού)
- Για γωνία συμπίεσης $\Phi_c = 0^\circ \rightarrow \Delta(\Phi_c) = \frac{\Delta_\chi}{2}$ (διάκενο λειτουργίας)



Εικόνα 8.8: Σταδιακά μειούμενη ακτίνα στερεού συναρτήσει της γωνίας συμπίεσης

Η συνολικά μειούμενη διάμετρος του στερεού, συναρτήσει της γωνίας συμπίεσης, όπως γίνεται κατανοητό προκύπτει από την σχέση:

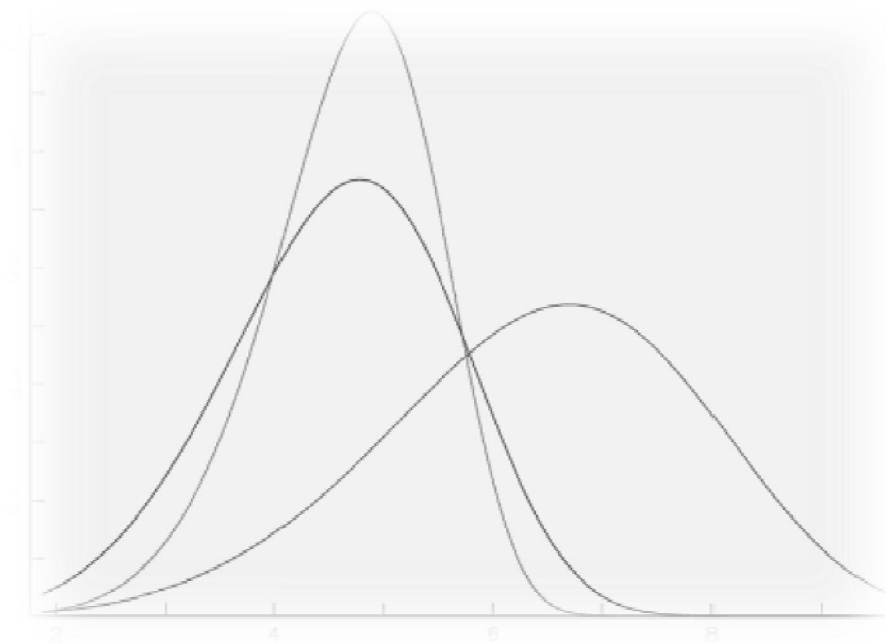
$$\boxed{\Delta(\Phi_c) = D_c(1 - \cos(\Phi_c)) + \Delta_\chi}$$

όπου: $\Phi_c \in [0, \theta_{cr}]$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

9

Γεννήτρια κοκκομετρικού μεγέθους στερεών



Εικόνα: Καμπύλες κατανομών

9.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η στατιστική ανάλυση των κοκκομετρικών χαρακτηριστικών του μελετούμενου δείγματος στερεών, για την επιλογή της κατανομής εκείνης η οποία περιγράφει ικανοποιητικότερα τα χαρακτηριστικά αυτά και τελικά, την κατασκευή της αντίστοιχης γεννήτριας τυχαίων αριθμών που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της λειτουργίας του σπαστήρα.

Ειδικότερα, στις παραγράφους που θα ακολουθήσουν θα περιγραφούν οι μεθοδολογίες και τα μαθηματικά εργαλεία που βρήκαν εφαρμογή για:

- τη στατιστική περιγραφή του δείγματος,
- τη γραφική παρουσίαση των δεδομένων και τη θεωρητική επιλογή της καταλληλότερης κατανομής,
- την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στην επιλεγθείσα κατανομή και τελικά,
- την κατασκευή της γεννήτριας τυχαίων αριθμών.

9.2 Στατιστικές παράμετροι δείγματος

9.2.1 Γενικά

Τα αριθμητικά περιγραφικά μέτρα είναι τιμές εκείνες, οι οποίες εξάγονται μέσω της στατιστικής ανάλυσης του μελετούμενου δείγματος και συμβάλουν στο να αποκτήσει κανείς μια πρώτη εικόνα της κατανομής του. Στην παρούσα εργασία, τα αριθμητικά μέτρα που θα μελετηθούν είναι:

- **Σχετικά με την κεντρική θέση του δείγματος:** η δειγματική μέση τιμή $\bar{x}$ της κοκκομετρίας των μελετούμενων στερεών κόκκων κλίνκερ τσιμέντου και
- **Σχετικά με τη μεταβλητότητα:** η δειγματική μεταβλητότητα, η τυπική απόκλιση και το εύρος της κοκκομετρίας του δείγματος.

9.2.2 Δειγματική μέση τιμή

Η δειγματική μέση τιμή ($\bar{x}$), η οποία εκφράζει το «κέντρο ισορροπίας» των πειραματικών παρατηρήσεων του δείγματος, προκύπτει από την αμερόληπτη εκτιμήτρια συνάρτηση:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Όπου: N το πλήθος των $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ παρατηρήσεων.

Κατά συνέπεια, με την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης σε δείγμα 405 παρατηρήσεων, αναφορικά με τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά των κόκκων κλίνκερ τσιμέντου ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_{405}$), η δειγματική μέση τιμή βρίσκεται:

$$\bar{x} = \frac{1}{405} \sum_{i=1}^{405} (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{405}) \leftrightarrow \boxed{\bar{x} = 43.23mm}$$

9.2.3 Δειγματικό εύρος της κοκκομετρίας του μελετούμενου δείγματος

Το δειγματικό εύρος ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στη μεγαλύτερη και τη μικρότερη τιμή των παρατηρήσεων του μελετούμενου δείγματος. Η μαθηματική έκφραση δίνεται ως: $\varepsilon = \max[x_i] - \min[x_i]$

Με εφαρμογή του παραπάνω, στο δεδομένο σύνολο των 405 δοκιμών, με κοκκομετρικό μέγεθος το οποίο κυμαίνεται από τα $\min[x] = 10\text{mm}$ έως τα $\max[x] = 153\text{mm}$, το δειγματικό εύρος προκύπτει:

$$\varepsilon = \max[x_i] - \min[x_i] \leftrightarrow \varepsilon = 153\text{mm} - 10\text{mm} \leftrightarrow \boxed{\varepsilon = 143\text{mm}}$$

9.2.4 Μεταβλητότητα και τυπική απόκλιση δείγματος

Αναφορικά με τα στατιστικά μέτρα της δειγματικής μεταβλητότητας και της δειγματικής τυπικής απόκλισης, τα οποία αναφέρονται στο «άπλωμα» της κατανομής των πειραματικών δεδομένων, προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

Η αμερόληπτη εκτιμήτρια της δειγματικής μεταβλητότητας, η οποία εκτιμά τη μεταβλητότητα των παρατηρήσεων γύρω από τη δειγματική μέση, δίνεται από τη μαθηματική έκφραση: $s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$, με την εφαρμογή της οποίας προκύπτει για το μελετούμενο δείγμα στερεών:

$$s^2 = \frac{1}{405 - 1} \sum_{i=1}^{405} [(x_i - \bar{x})^2] \leftrightarrow \boxed{s^2 = 889.94}$$

Η δειγματική τυπική απόκλιση των πειραματικών δεδομένων, η οποία εκτιμά το κατά πόσο μια τυπική τιμή της μελετούμενης μεταβλητής απέχει από τη δειγματική μέση, προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας ίση με:

$$\boxed{\sigma = \sqrt{(s^2)} = 29.83\text{mm}}$$

Παραθέτοντας συνοπτικά τα ανωτέρω στατιστικά αποτελέσματα του μελετούμενου δείγματος κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, κατασκευάζεται ο **Πίνακας 9.1** που ακολουθεί:

Στατιστικό Μέτρο	Συμβολισμός	Εκτιμήτρια	Αποτελέσματα
Δειγματική μέση	$\bar{x}$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	43.23 mm
Δειγματικό Εύρος	ε	$\max[x_i] - \min[x_i]$	143 mm
Μεταβλητότητα	s^2	$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$	889.94 mm²
Τυπική Απόκλιση	σ	$\sqrt{s^2}$	29.83 mm

Πίνακας 9.1: Συνοπτικά αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης δείγματος

9.3 Γραφική αποτύπωση δεδομένων

Η γραφική αποτύπωση των δεδομένων μιας πειραματικής διαδικασίας, αποτελεί πολύ αποτελεσματική μέθοδο, μέσω της οποίας μπορούμε να λάβουμε άμεση και πρακτική «αίσθηση» των δεδομένων, αλλά και να εξάγουμε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά στην επιλογή της καταλληλότερης θεωρητικής κατανομής, η οποία περιγράφει καλύτερα τις υπό μελέτη μεταβλητές. Από μια πληθώρα γραφικών τεχνικών της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, επιλέγω να χρησιμοποιήσω αυτή των ιστογραμμάτων και ειδικότερα το «**ιστόγραμμα σχετικών συχνοτήτων**». Η διαδικασία αυτή της εφαρμογής της μεθόδου του *ιστογράμματος σχετικών συχνοτήτων*, παρουσιάζεται στη συνέχεια της παραγράφου:

ο Διαμέριση εύρους πειραματικών μετρήσεων σε κοκκομετρικές τάξεις:

Σε πρώτη φάση πραγματοποιείται η διαμέριση του εύρους των πειραματικών δεδομένων σε τέσσερις (-4-) κοκκομετρικές τάξεις. Το πλάτος της πρώτης τάξης το ορίζω ίσο με 20mm, της δεύτερης και τρίτης ίσο με 30mm, ενώ θέτω το πλάτος της τέταρτης τάξης τέτοιο, που να περιλαμβάνει όλα τα στερεά δοκίμια με κοκκομετρία μεγαλύτερη των **90mm**. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι, ως κριτήριο για την κοκκομετρική ταξινόμηση των στερεών θεωρώ τη μεγαλύτερη διάσταση αυτών, δηλαδή τον άξονα a των μετρήσεων κατά **Griffiths** (Κεφάλαιο 6). Βάση αυτών δημιουργώ τις κάτωθι κοκκομετρικές τάξεις:

- A. Τάξη 10 έως 30 (mm)
- B. Τάξη 30 έως 60 (mm)
- C. Τάξη 60 έως 90 (mm) και
- D. Τάξη > 90 (mm)

ο Εύρεση σχετικών συχνοτήτων για τις ανωτέρω κοκκομετρικές τάξεις:

Έχοντας διαμερίσει το δείγμα, βρίσκω την αντίστοιχη σχετική συχνότητα των κοκκομετρικών τάξεων που έχω ορίσει, η οποία ορίζεται ως: *το πηλίκο του αριθμού των παρατηρήσεων που βρίσκονται μέσα στα όρια της τάξης, προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων του δείγματος.*

$$\text{Μαθηματική έκφραση: } \boxed{v_i = \frac{n_i}{N}} \quad (1)$$

Όπου:

- ✓ v_i : Σχετική συχνότητα (i) κοκκομετρικής τάξης.
- ✓ n_i : Πλήθος παρατηρήσεων στην (i) κοκκομετρική τάξη
- ✓ N : Πλήθος παρατηρήσεων δείγματος

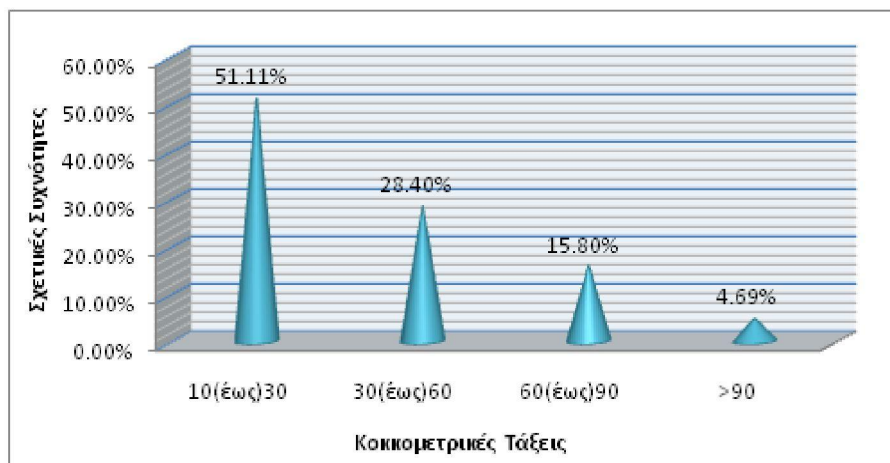
Με εφαρμογή της Σχέσης (1) προκύπτουν για τις προβλεπόμενες κοκκομετρικές τάξεις του δείγματος, οι ακόλουθες σχετικές συχνότητες:

Τάξεις	Σχετικές Συχνότητες
10 έως 30	51.11%
30 έως 60	28.40%
60 έως 90	15.80%
> 90	4.69%

Πίνακας 9.2: Σχετικές συχνότητες διαμέρισης δείγματος

ο **Κατασκευή ιστογράμματος σχετικών συχνοτήτων:**

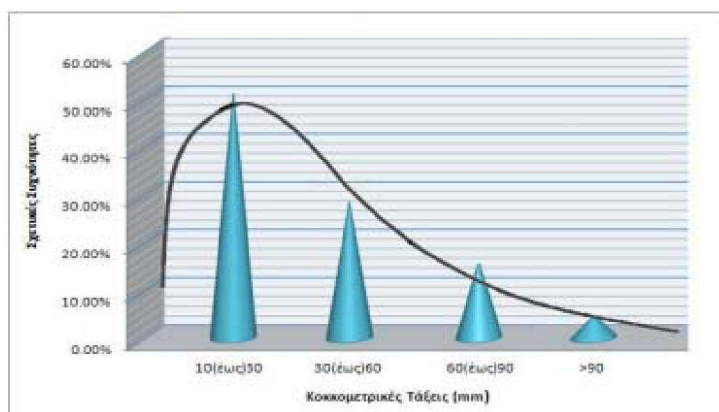
Με τα στοιχεία του **Πίνακα 9.1**, κατασκευάζω το αντίστοιχο **ιστόγραμμα σχετικών συχνοτήτων**. Στον **οριζόντιο άξονα** αποτυπώνονται οι κοκκομετρικές τάξεις της διαμέρισης του δείγματος και στον **κατακόρυφο άξονα**, οι αντίστοιχες σχετικές τους συχνότητες:



Γράφημα 9.1: Ιστόγραμμα σχετικών συχνοτήτων

9.4 Γραφικός έλεγχος για τον προσδιορισμό θεωρητικής κατανομής

Έχοντας αποτυπώσει τις σχετικές συχνότητες των κοκκομετρικών τάξεων στο ιστογράμμα, η κατασκευή του οποίου παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, εντοπίζουμε πλέον ποιες από τις γνωστές κατανομές μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά τα δεδομένα, ελέγχοντας ποιων κατανομών οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ομοιάζουν με τη μορφή του δεδομένου ιστογράμματος. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής και έχοντας μια *φθίνουσα και αποσβεννύμενη θετική μορφή ιστογράμματος*, είναι να θεωρήσουμε την τριπαραμετρική κατανομή **Weibull** (α, β, γ), ως την καταλληλότερη.



Γράφημα 9.2: Ένδειξη καλής προσαρμογής της κατανομής **Weibull** από τη σύγκριση της μορφής του ιστογράμματος, με τη μορφή της **σ.π.π.** της κατανομής.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π), η συνάρτηση κατανομής και η πρώτη και δεύτερη ροπή της τριπαραμετρικής κατανομής **Weibull**, παρουσιάζονται στο τυπολόγιο του **Πίνακα 9.3** που ακολουθεί:

Weibull (α, β, γ)

$$f(x) = \begin{cases} \alpha \beta^{-\alpha} (x - \gamma)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}} & \text{αν } x \geq \gamma \\ 0 & \text{αλλιού} \end{cases}$$

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}}$$

$$\mu = \gamma + \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$$

$$\sigma^2 = \frac{\beta^2}{\alpha} \left[2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right]$$

$$\alpha, \beta > 0 \text{ \& } \gamma \leq x < \infty$$

Πίνακας 9.3: Τυπολόγιο Κατανομής Weibull (α, β, γ)

9.5 Προσαρμογή κατανομής – Μέθοδος μεγίστης πιθανοφάνειας

9.5.1 Γενικά

Έχοντας εκτιμήσει (γραφικά) τη θεωρητική κατανομή η οποία περιγράφει την κοκκομετρία των στερεών κόκκων κλίνκερ, προχωρούμε στην πραγμάτευση του θέματος της εκτίμησης των παραμέτρων της. Αν και αρκετές μεθοδολογίες έχουν προταθεί για την επίλυση του θέματος αυτού, εντούτοις μια από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους σημειακών εκτιμητών παραμέτρων, θεωρείται η «**μέθοδος της μεγίστης πιθανοφάνειας**», η οποία προτάθηκε από τον **Ronald A. Fisher** (1922). Στη μέθοδο αυτή, οι τιμές των εκτιμητών είναι οι τιμές των παραμέτρων που μεγιστοποιούν τη συνάρτηση πιθανοφάνειας.

Η συνάρτηση πιθανοφάνειας $L(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_m)$ μιας τυχαίας μεταβλητής X με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_x(x; \theta_1, \theta_2 \dots \theta_m)$, όπου $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_m$ οι παράμετροι της κατανομής, για συγκεκριμένο δείγμα $x_1, x_2 \dots x_n$, δίνεται από τη σχέση:

$$L(\theta_1, \theta_2 \dots \theta_m) = \prod_{i=1}^n f_x(x; \theta_1, \theta_2 \dots \theta_m) \quad (2)$$

Αν για κάποια επιλογή των $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_m$ η L έχει μεγάλη τιμή, τότε η κατανομή ταιριάζει στα δεδομένα. Επομένως βρίσκουμε τα $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_m$ που μεγιστοποιούν την L . Επειδή όμως στην πράξη, η μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας είναι δύσκολη, γι' αυτό μεγιστοποιείται ο λογάριθμός της. Αυτό γίνεται αναλυτικά μηδενίζοντας τις μερικές παραγώγους ως προς κάθε άγνωστη παράμετρο του λογαρίθμου της πιθανοφάνειας, οπότε και προκύπτει ένα σύστημα n εξισώσεων με n αγνώστους.

9.5.2 Εφαρμογή της μεθόδου μεγίστης πιθανοφάνειας

Ορίζοντας την παράμετρο θέσης (γ) της κατανομής **Weibull** εκ των προτέρων γνωστή και ίση με το *διάκενο λειτουργίας* (Δ_x) του σπαστήρα δηλαδή: $\gamma = (\Delta_x)$ & $\gamma \leq x < \alpha$ ή $(\Delta_x) \leq x < \alpha$, θα προβώ, στην παρούσα παράγραφο, στον προσδιορισμό των παραμέτρων α, β , μέσω της εφαρμογής της μεθόδου μεγίστης πιθανοφάνειας.

Ειδικότερα, από την γενική έκφραση της **σ.π.π.** της τριπααραμετρικής **Weibull**, όπως σημειώνεται στο τυπολόγιο του **Πίνακα 9.3**, έχουμε:

$$f(x; \alpha, \beta, \gamma) = \alpha \beta^{-\alpha} (x - \gamma)^{\alpha-1} e^{\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]} \quad \text{με } \gamma = (\Delta_x) \quad (3)$$

Και από τη γενική έκφραση της **συνάρτησης πιθανοφάνειας** (Σχέση 2) έχουμε:

$$L(\alpha, \beta, \gamma) = f(x_1 | \alpha, \beta, \gamma) f(x_2 | \alpha, \beta, \gamma) \dots f(x_m | \alpha, \beta, \gamma)$$

Συνεπώς από τις σχέσεις (2) και (3) παίρνουμε:

$$\begin{aligned} (2) \Leftrightarrow L(\alpha, \beta, \gamma) &= \left(\prod_{i=1}^m \alpha \right) \left(\prod_{i=1}^m \beta^{-\alpha} \right) \left(\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{(\alpha-1)} \right) e^{\frac{1}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow L(\alpha, \beta, \gamma) = \alpha^m \beta^{-\alpha m} \left(\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right)^{(\alpha-1)} e^{\frac{1}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha} \Leftrightarrow \\ &\boxed{L(\alpha, \beta, \gamma) = \alpha^m \beta^{-\alpha m} \left(\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right)^{(\alpha-1)} e^{\frac{1}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha}} \quad (4) \end{aligned}$$

Η Σχέση (4) αποτελεί τη γενική έκφραση της συνάρτησης μεγίστης πιθανοφάνειας για την τριπααραμετρική **Weibull**(α, β, γ). Στόχος μας αποτελεί η ανεύρεση των α, β για τα οποία μεγιστοποιείται η λογαριθμισμένη **ln(L)**, άρα και η **L**.

Λογαριθμίζοντας τη Σχέση (4) παίρνουμε:

$$\begin{aligned}\ln L(\alpha, \beta, \gamma) &= \ln(\alpha^m) + \ln(\beta^{-\alpha m}) + \ln \left[\left(\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right)^{(\alpha-1)} \right] + \ln \left(e^{\frac{1}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha} \right) \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \ln L(\alpha, \beta, \gamma) = m \ln(\alpha) - (\alpha m) \ln(\beta) + (\alpha-1) \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \frac{1}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha\end{aligned}$$

Για τη βελτιστοποίηση της $\ln(L)$ μηδενίζουμε τις μερικές παραγώγους της συνάρτησης αυτής, ως προς τις άγνωστες παραμέτρους α, β . Θέτουμε δηλαδή:

$$\nabla \ln(L) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \ln(L)}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta} \end{pmatrix} = 0$$

Συνεπώς προχωρούμε στην ανεύρεση των μερικών παραγώγων της συνάρτησης πιθανοφάνειας ως προς τις άγνωστες παραμέτρους α, β :

Μερική παράγωγος ως προς παράμετρο β :

$$\begin{aligned}\frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta} &= 0 - (\alpha m) \frac{(\beta)'}{\beta} + 0 - (\beta^{-\alpha})' \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha = -\frac{(\alpha m)}{\beta} - (-\alpha \beta^{-(\alpha-1)}) \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta} = -\frac{(\alpha m)}{\beta} + \alpha \beta^{-(\alpha-1)} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha \quad (5)\end{aligned}$$

Και μερική παράγωγος ως προς παράμετρο α :

$$\begin{aligned}\frac{\partial \ln(L)}{\partial \alpha} &= m \frac{(\alpha)'}{\alpha} - m \ln(\beta) + \alpha \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \left[\frac{1}{\beta^\alpha} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha \right]' = \\ &= \frac{m}{\alpha} - m \ln(\beta) + \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \left[\left(\frac{1}{\beta^\alpha} \right)' \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha + \frac{1}{\beta^\alpha} \left(\sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha \right)' \right] = \\ &= \frac{m}{\alpha} - m \ln(\beta) + \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \left[-\beta^{-\alpha} \ln(\beta) \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha + \beta^{-\alpha} \left(\sum_{i=1}^m \ln(x_i - \gamma) (x_i - \gamma)^\alpha \right) \right] \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \frac{\partial \ln(L)}{\partial \alpha} = \frac{m}{\alpha} - m \ln(\beta) + \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \left(\frac{-\ln(\beta) \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha + \left(\sum_{i=1}^m \ln(x_i - \gamma) (x_i - \gamma)^\alpha \right)}{\beta^\alpha} \right) \quad (6)\end{aligned}$$

Μηδενίζοντας τις μερικές παραγώγους της λογαριθμισμένης συνάρτησης πιθανοφάνειας παίρνουμε:

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta} = 0 \leftrightarrow -\frac{(\alpha m)}{\beta} + \alpha \beta^{-(\alpha-1)} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha = 0 \leftrightarrow \frac{(\alpha m)}{\beta} = \alpha \beta^{-(\alpha-1)} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^\alpha \leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow m = \beta^{-\alpha} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha} \Leftrightarrow \frac{1}{\beta^{-\alpha}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha} \Leftrightarrow \beta^{\alpha} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\beta = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (7)$$

και

$$\frac{\partial \ln(\mathbf{L})}{\partial \mathbf{a}} = \mathbf{0} \stackrel{(5) \& (6)}{\Leftrightarrow} \frac{m}{\alpha} - m \ln(\beta) + \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \left(\frac{-\ln(\beta) \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha} + (\sum_{i=1}^m \ln(x_i - \gamma) (x_i - \gamma)^{\alpha})}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha}} \right) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{m}{\alpha} + \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \frac{m(\sum_{i=1}^m \ln(x_i - \gamma) (x_i - \gamma)^{\alpha})}{\sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha}} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \boxed{f(\mathbf{a}) = \frac{m}{\alpha} + \ln \left[\prod_{i=1}^m (x_i - \gamma) \right] - \frac{m(\sum_{i=1}^m \ln(x_i - \gamma) (x_i - \gamma)^{\alpha})}{\sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha}} = 0} \quad (8)$$

Εκκινώντας τη διαδικασία για τη βελτιστοποίηση της λογαριθμισμένης συνάρτησης μεγίστης πιθανοφάνειας, προχωρώ σε μια πρώτη εκτίμηση της παραμέτρου $\mathbf{a}$, χρησιμοποιώντας την εκτιμήτρια συνάρτηση:

$$\tilde{\alpha} = \frac{(\text{Δειγματική μέση τιμή})}{(\text{Δειγματική διασπορά})} = \frac{\bar{x}}{\sigma} = \frac{43.23 \text{ (mm)}}{29.83 \text{ (mm)}} \Leftrightarrow \boxed{\tilde{\alpha} = 1.449}$$

Αντικαθιστώντας την εκτιμηθείσα τιμή της παραμέτρου σχήματος $\mathbf{a}$, της κατανομής **Weibull**, στη Σχέση (7), παίρνω και την αντίστοιχη πρώτη εκτίμηση για την τιμή της παραμέτρου κλίμακας β :

$$\beta = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \Leftrightarrow \beta = \left[\frac{1}{405} \sum_{i=1}^{405} (x_i - (10))^{1.449} \right]^{\frac{1}{1.449}} \Leftrightarrow \boxed{\beta = 39.056}$$

Για να ελέγξω το βέλτιστο της εκτίμησης, παραγωγίζεται η σχέση (8) και παίρνουμε:

$$\boxed{f'(a) = -\frac{m}{\alpha^2} - \frac{m \sum_{i=1}^m [(x_i - \gamma)^{\alpha} (\ln(x_i - \gamma))^2]}{\sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha}} + \frac{m [\sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha} \ln(x_i - \gamma)]^2}{[\sum_{i=1}^m (x_i - \gamma)^{\alpha}]^2}}$$

Αντικαθιστώντας την εκτίμηση $\tilde{\alpha} = 1.449$ βρίσκουμε ότι η $f'(\tilde{\alpha}) < 0$ συνεπώς τελειώνει η διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου. Άρα από τη διαδικασία της εφαρμογής της μεθόδου μεγίστης πιθανοφάνειας προκύπτει ότι, η τυχαία μεταβλητή X , η οποία εκφράζει την κοκκομετρία των στερεών του κλίνκερ τσιμέντου, ακολουθεί την τριπαραμετρική κατανομή:

$$\mathbf{x} \sim \mathbf{Weibull} (1.449, 39.056, 10)$$

9.6 Κατασκευή γεννήτριας τυχαίων αριθμών

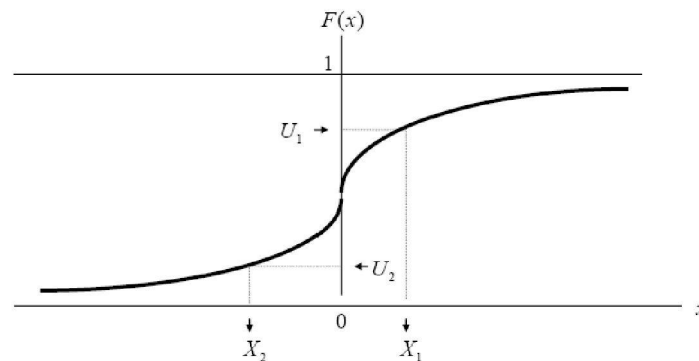
9.6.1 Γενικά

Για την κατασκευή της γεννήτριας του κοκκομετρικού μεγέθους των στερεών κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο του **αντίστροφου μετασχηματισμού**. Με τη μέθοδο αυτή, γίνεται εφικτή η χρήση της ομοιόμορφης κατανομής $U(0, 1)$ ως βάση, για την κατασκευή γεννητριών οι οποίες ακολουθούν άλλες κατανομές, όπως στην παρούσα περίπτωση της Weibull.

Ειδικότερα, έστω ότι θέλουμε να δημιουργήσουμε μια τυχαία τιμή X από μια τυχαία μεταβλητή, η οποία είναι συνεχής και έχει συνάρτηση κατανομής F συνεχή και αύξουσα όταν $0 < F(x_1) < F(x_2) < 1$ (δηλαδή αν $x_1 < x_2$ και $0 < F(x_1) < F(x_2) < 1$ τότε $F(x_1) < F(x_2)$). Και έστω η F^{-1} η αντίστροφη συνάρτηση της F . Τότε ο αλγόριθμος για τη γέννηση της τυχαίας τιμής θα δίνεται ως:

1. Γέννησε $U \sim U(0, 1)$ (Μεταβλητή που ακολουθεί την κανονική κατανομή)
2. Επίστρεψε την τυχαία τιμή $X = F^{-1}(U)$

Όπου η $F^{-1}(U)$ θα ορίζεται πάντα αφού ισχύει ότι $0 \leq U \leq 1$ και η F έχει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$.



Γράφημα 9.3

Παράδειγμα Μεθόδου Αντίστροφου Μετασχηματισμού για συνεχή μεταβλητή X , η οποία λαμβάνει αρνητικές ή και θετικές τιμές. Από την U_1 θα προκύψει τελικά μέσω της $X = F^{-1}(U)$ η τυχαία θετική τιμή X_1 και από την U_2 η αρνητική X_2 , ενώ όπως φαίνεται η $U \sim U(0, 1)$

9.6.2 Εφαρμογή της μεθόδου του αντίστροφου μετασχηματισμού

Αντιστρέφοντας την συνάρτηση κατανομής για την τριπαραμετρική Weibull έχουμε:

$$F(x) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]}$$

Θέτω:

$$F(x) = U \leftrightarrow 1 - e^{\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]} = U \leftrightarrow 1 - U = e^{\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]} = \ln(1 - U) = \ln\left(e^{\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]}\right) \leftrightarrow \ln(1 - U) = -\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha \leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (-\ln(1-U))^{\frac{1}{\alpha}} = \frac{(x-\gamma)}{\beta} \Leftrightarrow \beta(-\ln(1-U))^{\frac{1}{\alpha}} = (x-\gamma) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \boxed{x = \gamma + \beta(-\ln(1-U))^{\frac{1}{\alpha}}} \text{ με } x \in [10, \infty] \text{ και } U \sim U(0, 1)$$

Συνεπώς ο αλγόριθμος αντίστροφου μετασχηματισμού γίνεται:

1. Γέννησε $U \sim U(0, 1)$
2. Επίστρεψε $x = \gamma + \beta(-\ln(1-U))^{\frac{1}{\alpha}}$

Η με την αντικατάσταση των εκτιμηθέντων παραμέτρων α, β, γ , της κατανομής Weibull:

1. Γέννησε $U \sim U(0, 1)$
2. Επίστρεψε $x = 10 + 39.056(-\ln(1-U))^{\frac{1}{1.449}}$

Όπου η $(1-U)$ μπορεί να αντικατασταθεί και με (U) , αφού και οι δύο μεταβλητές ακολουθούν από κοινού την κανονική κατανομή.

Με την εφαρμογή της γεννήτριας του κοκκομετρικού μεγέθους των στερεών κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, λαμβάνουμε σύνολο τυχαίων αριθμών, δείγμα των οποίων παρουσιάζεται στον **Πίνακα 9.4** που ακολουθεί:

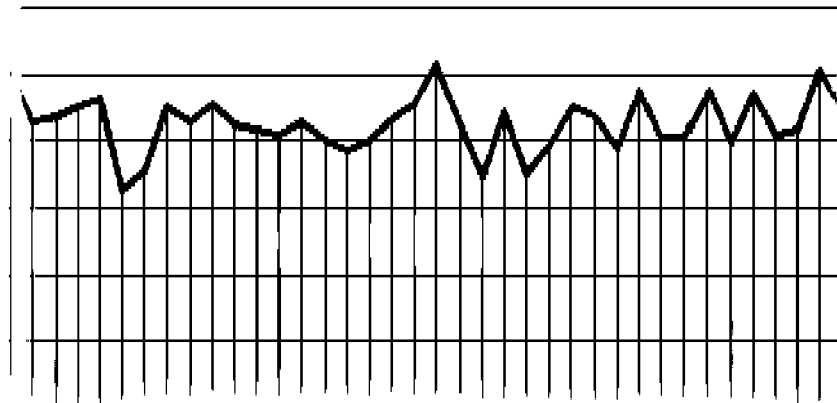
Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8	Column9
26	53	18	67	24	42	32	55	...
43	70	65	20	39	56	63	49	...
36	22	61	66	74	70	59	37	...
33	19	44	85	74	72	78	50	...
46	81	29	30	28	53	19	18	...
31	34	42	104	25	55	10	72	...
37	21	43	80	78	24	35	98	...
71	37	79	13	82	26	29	20	...
48	23	74	39	12	53	36	98	...
51	71	124	13	98	27	53	29	...
27	14	40	13	52	27	36	66	...
20	63	90	74	14	16	65	60	...
29	36	68	54	56	130	22	69	...
46	78	20	33	26	64	62	27	...
45	69	47	82	15	53	23	43	...
66	73	20	49	45	48	27	32	...
26	63	68	36	35	62	25	63	...
27	15	36	96	67	61	35	23	...
31	27	17	44	51	29	19	33	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Πίνακας 9.4: Πίνακας γεννημένων τυχαίων αριθμών σχετικών με την κοκκομετρία των στερεών κόκκων κλίνκερ τσιμέντου σε mm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

10

Ενέργεια & στρεπτικές ροπές γκοφρετοποίησης



Εικόνα: Κυματομορφή δρώσας στους κυλίνδρους, στρεπτικής ροπής

10.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην *ενέργεια*, καθώς και στην αντίστοιχη *δρώσα*, στους κυλίνδρους του σπαστήρα, *στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης* των τροφοδοτούμενων στερεών κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, ενώ ταυτόχρονα θα παρατεθούν στοιχεία σχετικά με τη διαδικασία μέσω της οποίας προσδιορίστηκαν τα μεγέθη αυτά, πειραματικά.

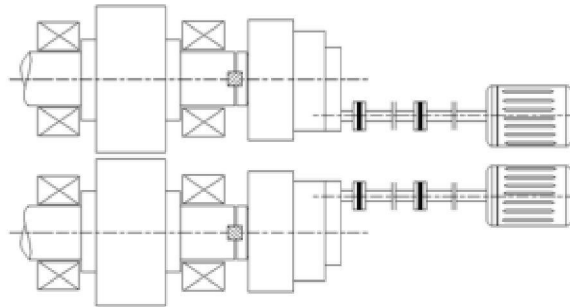
10.2 Ενέργεια και στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης

10.2.1 Ορισμός της ενέργειας γκοφρετοποίησης

Ως *ενέργεια γκοφρετοποίησης* ορίζω την απαιτούμενη ενέργεια η οποία παρέχεται από τους κυλίνδρους του σπαστήρα στα θλιβόμενα στερεά, για τη θραύση και συμπίεση τους, μέχρι το σχηματισμό πεπιεσμένης γκοφρέτας πάχους $\Delta\chi$ (διάκενο λειτουργίας).

10.2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Έστω ζευγάρι κυλίνδρων, γνωστών διαστάσεων, οι οποίοι λειτουργούν σε σπαστήρα που κατεργάζεται κοκκώδη και εύθρυπτα στερεά υλικά, όπως για παράδειγμα το κλίνκερ τσιμέντου. Οι κύλινδροι περιστρέφονται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω , ενώ σε κάθε έναν από αυτούς δρα στρεπτική ροπή M_d , η οποία μεταφέρεται από τους ηλεκτροκινητήρες, μέσω των ατράκτων και των μειωτήρων στροφών.

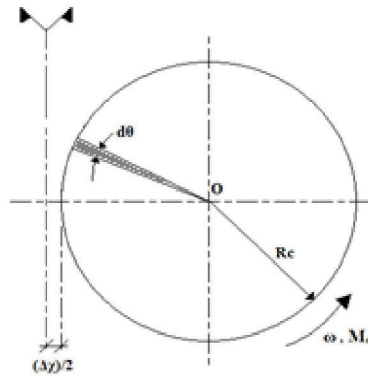


Εικόνα 10.1: Διατάξεις μεταφορά στρεπτικών ροπών στα ρολά του σπαστήρα

Θεωρώντας $d\theta$ μια απειροστή περιστροφή του κυλίνδρου, περί του σταθερού του άξονα, εντός απειροστού χρονικού διαστήματος dt , τότε το παραγόμενο από τη ροπή έργο dW , κατά την διάρκεια της περιστροφής $d\theta$, θα προκύπτει από τη μαθηματική έκφραση:

$$dW = M_d(\theta) \times d\theta$$

Όπου: $M_d(\theta)$, η τιμή της στρεπτικής ροπής του κυλίνδρου κατά το απειροστό διάστημα χρόνου dt , εντός του οποίου συμβαίνει η στοιχειώδης περιστροφή $d\theta$.

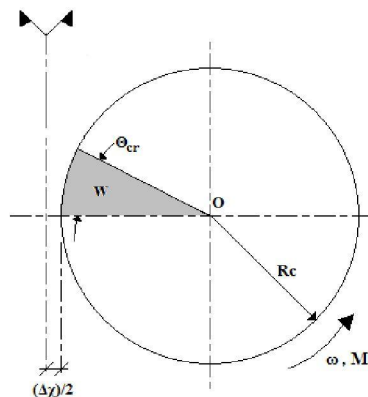
Εικόνα 10.2: Απειροστή περιστροφή $d\theta$ σε ρολό σπαστήρα, ακτίνας R_c

Συνεπώς, κατά τη διάρκεια μιας γωνιακής μετατόπισης με αρχική γωνία την θ_1 και τελική την θ_2 , το συνολικά παραγόμενο, από τη ροπή στρέψης, έργο W θα δίνεται ως:

$$W = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M_d(\theta) d\theta$$

Στην περίπτωση λοιπόν ενός στερεού κόκκου, ο οποίος ρίπτεται στη χοάνη των κυλίνδρων του σπαστήρα και εμπλέκεται με αυτά σε γωνία θ_{cr} , το συνολικά παραγόμενο από τη ροπή έργο, από τη στιγμή της εμπλοκής του ($\theta_2 = \theta_{cr}$), μέχρι τη στιγμή της απόδοσης πεπιεσμένης γκοφρέτας πάχους Δ_x (δηλαδή έως $\theta_1 = 0^\circ$ πάνω στη διάκεντρο των ρολών), θα δίνεται από τη μαθηματική έκφραση:

$$W = \int_0^{\theta_{cr}} M_d(\theta) d\theta$$

Εικόνα 10.3: Συνολικά παραγόμενο από τη ροπή έργο, για γωνιακή μετατόπιση $0^\circ \rightarrow \theta_{cr}$

Όπως γίνεται κατανοητό, κατά τη λειτουργία του σπαστήρα και για το απλουστευμένο μοντέλο του ενός κόκκου, το παραπάνω ολικό έργο θα πρέπει να είναι **τουλάχιστον ίσο** με την απαιτούμενη **ενέργεια γκοφρετοποίησης** του στερεού, μέγεθος το οποίο όπως θα δείξουμε στη συνέχεια του κεφαλαίου μπορεί να

προσδιορίζεται και πειραματικά. Συνεπώς, συμβολίζοντας την *ενέργεια γκοφρετοποίησης* ενός στερεού κόκκου ως W_p και θεωρώντας τη ροπή στο πεπερασμένο διάστημα της γωνιακής μετατόπισης $[0, \theta_{cr}]$ σταθερή και ίση με τη μέση τιμή της $\overline{M_d}$ παίρνουμε:

$$W_p = \int_0^{\theta_{cr}} M_d(\theta) d\theta = \overline{M_d} \times \theta_{cr} \quad \text{ή} \quad \boxed{\overline{M_d} = \frac{W_p}{\theta_{cr}}} \quad (10.1)$$

Όπου: θ_{cr} εκφρασμένη σε ακτίνια (rad).

10.2.3 Ορισμός της στρεπτικής ροπής γκοφρετοποίησης

Το μέγεθος $\overline{M_d}$ το ονομάζω *στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης* για ένα στερεό κόκκο υλικού και εκφράζει την στρεπτική ροπή που πρέπει να δράσει στους κυλίνδρους του σπαστήρα, ούτως ώστε να αποδοθεί η απαιτούμενη, για την κατεργασία του τροφοδοτούμενου σε αυτόν στερεού υλικού, *ενέργεια γκοφρετοποίησης*.

10.3 Πειραματικός προσδιορισμός της ενέργειας γκοφρετοποίησης

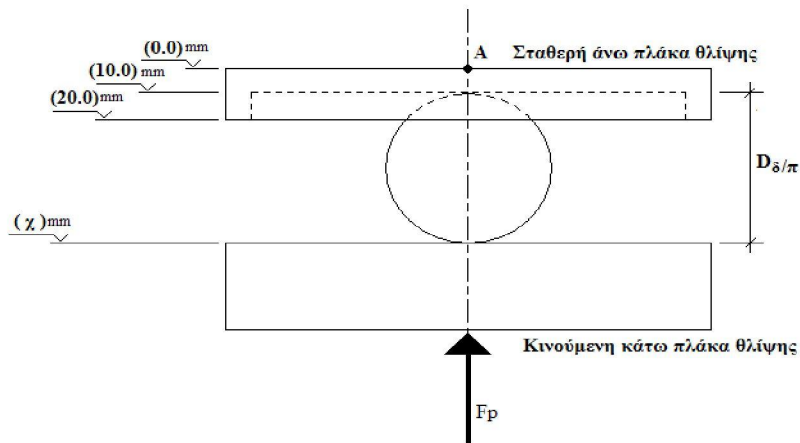
10.3.1 Γενικά

Ο προσδιορισμός της απαιτούμενης ενέργειας γκοφρετοποίησης για τα μελετούμενα στερεά δοκίμια κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, πραγματοποιήθηκε μέσω της ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων από τις δοκιμές θλίψης, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο *Κεφάλαιο 7* της παρούσας εργασίας. Τα στάδια της ανάλυσης αυτής συνοψίζονται στα κάτωθι σημεία:

- ✓ *Εύρεση της πειραματικής διαμέτρου των δοκιμίων και της αντίστοιχης πειραματικής γωνίας εμπλοκής.*
- ✓ *Αναγωγή των πειραματικών δεδομένων, στο μοντέλο των κυλίνδρων του σπαστήρα,*
- ✓ *Υπολογισμός της πειραματικής ενέργειας γκοφρετοποίησης για κάθε ένα στερεό κόκκο.*

10.3.2 Πειραματική διάμετρος δοκιμίων & πειραματική κρίσιμη γωνία εμπλοκής

Ως *πειραματική διάμετρο*, ορίζω τη μετρούμενη από το επιμηκυνσιόμετρο της υδραυλικής πρέσας δοκιμών, *διάμετρο* του δοκιμαζόμενου στερεού κόκκου, η οποία αναφέρεται στη μέτρηση κατάντι του άξονα φόρτισης του. Η κατά προσέγγιση σχηματική ομαδοποίηση των στερεών δοκιμίων, η ευρύτατη ποικιλία των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της εξωτερικής τους επιφανείας (εξογκώματα, κοιλώματα, λοιπές άλλες ανωμαλίες), καθώς και το γεγονός ότι τα δοκίμια *δεν* διαμορφώνονται πριν την εκτέλεση των πειραμάτων, ενώ παράλληλα τοποθετούνται κατά τυχαίο τρόπο μεταξύ των πλάκων θλίψης, επιβάλουν τη διαδικασία αυτή.



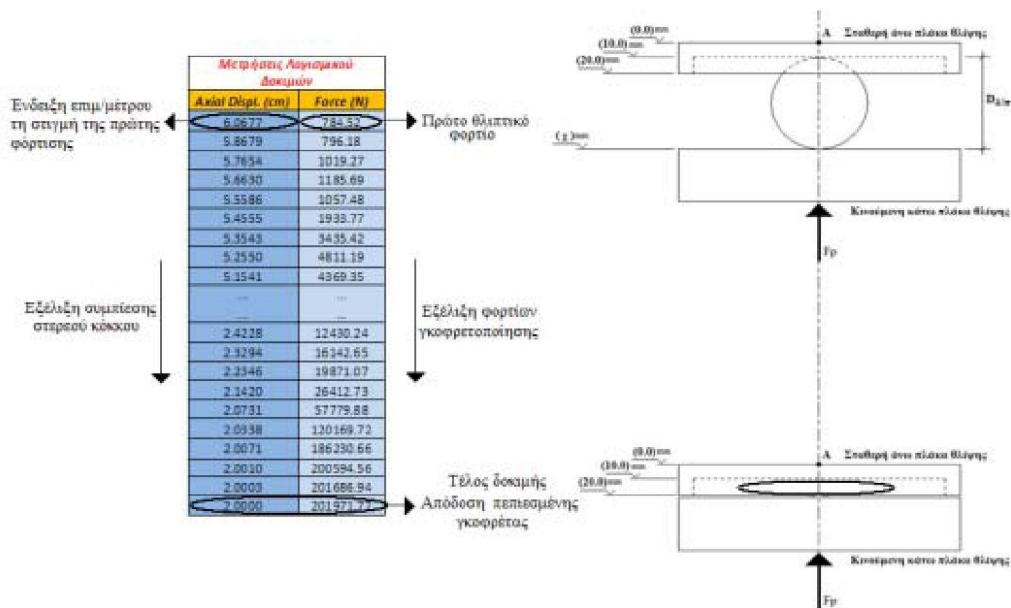
Εικόνα 10.4: Στάθμες στις πλάκες θλίψης της εργαστηριακής υδραυλικής μηχανής δοκιμών

Έχοντας ορισμένη τη στάθμη **0.0 mm** στο σημείο **A** της υδραυλικής μηχανής δοκιμών και **x** την ένδειξη του επιμηκυνσιομέτρου **ακριβώς** τη στιγμή της πρώτης φόρτισης του θλιβόμενου στερεού κόκκου, η πειραματική διάμετρος $D_{\delta/\pi}$ του δοκιμίου προκύπτει από τη σχέση:

$$D_{\delta/\pi} = x - 10 \text{ mm} \quad (10.2)$$

Βάση της πειραματικής αυτής διαμέτρου, υπολογίζεται για κάθε στερεό δοκίμιο και η αντίστοιχη κρίσιμη πειραματική γωνία εμπλοκής του, η οποία δίνεται (από την 8.1) ως:

$$\theta_{cr/\pi} = \cos^{-1} \left(\frac{D_c + \Delta x - D_{\delta/\pi}}{D_c} \right) \quad (10.3)$$



Εικόνα 10.5: Προσδιορισμός της πειραματικής διαμέτρου βάσει των πειραματικών δεδομένων από τις δοκιμές θλίψης. Για το παράδειγμα η $D_{\delta/\pi}$ βρίσκεται 50.677mm

10.3.3 Αναγωγή των πειραματικών δεδομένων στο μοντέλο των κυλίνδρων

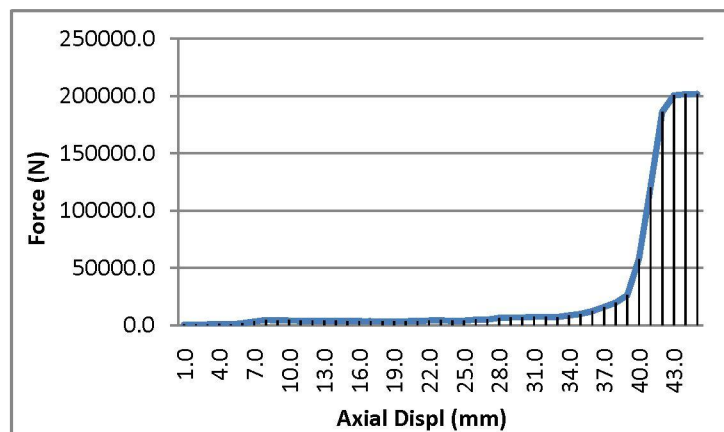
Σκοπός της παρούσας παραγράφου αποτελεί η επίδειξη της διαδικασίας αναγωγής των πειραματικών δεδομένων από τις δοκιμές θλίψης του εργαστηρίου, στις συνθήκες κατεργασίας των στερεών κόκκων κλίνκερ στους κυλίνδρους του σπαστήρα. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει:

- ✓ Τη σύνδεση της συμπίεσης των στερεών κατά τη θλίψη τους στην υδραυλική πρέσα δοκιμών, με την αντίστοιχη συμπίεση εξαιτίας της λειτουργίας των κυλίνδρων του σπαστήρα καθώς και
- ✓ Τη σύνδεση της συμπίεσης των κόκκων κλίνκερ κατά τη θλίψη τους στην πρέσα δοκιμών, με την αντίστοιχη γωνιακή μετατόπιση των κυλίνδρων του σπαστήρα.

Η εύρεση των αναλόγων, θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μαθηματικές σχέσεις οι οποίες απεδείχθησαν σε προηγούμενα κεφάλαια.

Για κάθε ένα από τα στερεά δοκίμιο, τα οποία τοποθετούνται στην υδραυλική πρέσα δοκιμών και υπόκεινται στη διαδικασία της μοναξονικής θλίψης, μέχρι το σχηματισμό πεπιεσμένης γκοφρέτας πάχους $\Delta\chi$, λαμβάνεται ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων τα οποία αφορούν στη μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας, δηλαδή της συμπίεσης του δοκιμαζόμενου στερεού, συναρτήσει των αναπτυσσόμενων θλιπτικών φορτίων. Παράδειγμα τέτοιων (ήδη επεξεργασμένων) δεδομένων, τα οποία αφορούν σφαιροειδές δοκίμιο πειραματικής διαμέτρου $D_{\delta/\pi} = 48.68\text{mm}$ δίνεται στον **Πίνακα 10.1** που ακολουθεί:

Axial (li) (mm)	Force (N)
48,679	796,18
47,654	1019,27
46,630	1185,69
45,586	1057,48
44,555	1933,77
43,543	3435,42
42,550	4811,19
⋮	⋮
18,204	7427,99
17,182	7312,15
16,185	8772,89
15,195	10059,09
14,228	12430,24
13,294	16142,65
12,346	19871,07
11,420	26412,73
10,731	57779,88
10,338	120169,72
10,071	186230,66
10,010	200594,56
10,003	201686,94
10,000	201971,77



Πίνακας 10.1: Αξονική μετατόπιση εμβόλου στην πρέσα δοκιμών (συμπίεση στερεού), συναρτήσει των αναπτυσσόμενων θλιπτικών φορτίων μέχρι την απόδοση γκοφρέτας πάχους $\Delta\chi=10\text{mm}$

Τότε, το ανάλογο της μετατόπισης του εμβόλου της πρέσας δοκιμών, για τους κυλίνδρους του σπαστήρα, δηλαδή η γωνιακή μετατόπιση των ρολών συναρτήσει των αναπτυσσόμενων θλιπτικών φορτίων κατά την κατεργασία του στερεού, θα μπορεί να εκφραστεί μέσω της μαθηματικής σχέσης 8.1 και πιο συγκεκριμένα από την:

$$\Theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{D_c + \Delta_x - D_i}{D_c} \right) \quad (10.4)$$

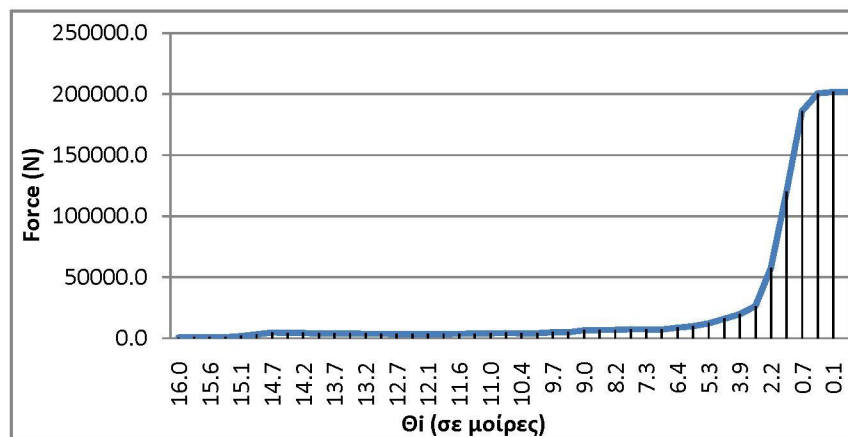
Όπου: D_i η συμπιεζόμενη και πειραματικά μετρούμενη διάμετρος του στερεού κόκκου, κατά τη φάση των δοκιμών.

Με εφαρμογή της σχέσης 10.4 λαμβάνουμε τα αριθμητικά ανάλογα τα οποία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10.2** που ακολουθεί:

Axial (mm)	Force (N)	Θ_i (°)
48,679	796,18	15,988
47,654	1019,27	15,773
46,630	1185,69	15,556
45,586	1057,48	15,331
44,555	1933,77	15,106
43,543	3435,42	14,882
42,550	4811,19	14,659
⋮	⋮	⋮
18,204	7427,99	7,344
17,182	7312,15	6,871
16,185	8772,89	6,376
15,195	10059,09	5,843
14,228	12430,24	5,271
13,294	16142,65	4,652
12,346	19871,07	3,925
11,420	26412,73	3,054
10,731	57779,88	2,191
10,338	120169,72	1,490
10,071	186230,66	0,683
10,010	200594,56	0,256
10,003	201686,94	0,140
10,000	201971,77	0,000

Πίνακας 10.2: Γωνιακή μετατόπιση των ρολών του σπαστήρα (Θ_i), ως ανάλογο της αξονικής μετατόπισης του εμβόλου της πρέσας δοκιμών (με εφαρμογή της σχέσης 10.4)

Από τα παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί και το αντίστοιχο γράφημα της γωνιακής μετατόπισης των κυλίνδρων του σπαστήρα (Θ_i), συναρτήσει των αναπτυσσόμενων θλιπτικών φορτίων:



Γράφημα 10.1: Γωνιακή μετατόπιση των κυλίνδρων, συναρτήσει των αναπτυσσόμενων θλιπτικών φορτίων

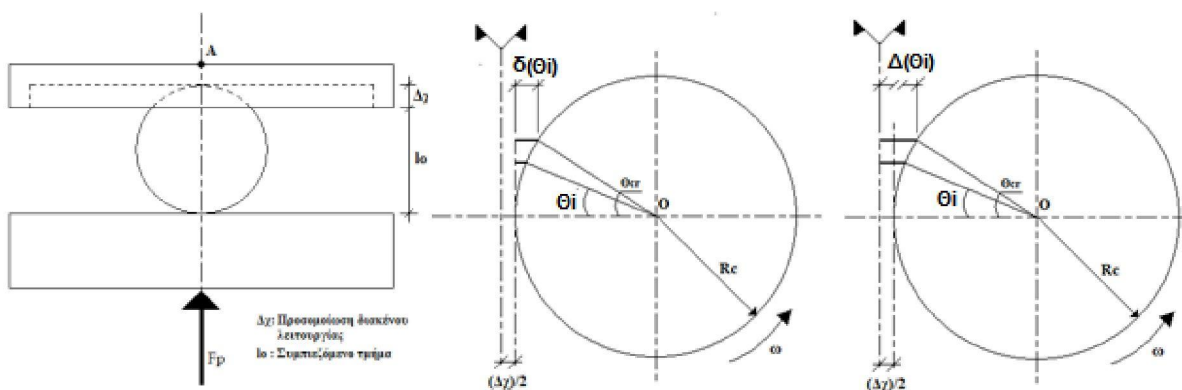
Επόμενο βήμα της διαδικασίας αποτελεί η εύρεση των πειραματικών αναλόγων και για τα μεγέθη της συμπίεσης των στερεών κόκκων κλίνκερ, καθώς και της σταδιακά ελαττούμενης πειραματικής ακτίνας τους, ώστε να ολοκληρωθεί η αναγωγή στο μοντέλο των κυλίνδρων και συγκεκριμένα, στη λειτουργία του ενός εξ' αυτών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω των σχέσεων **8.2** και **8.3** και ειδικότερα των:

$$\delta(\theta_i) = R_c \times (1 - \cos(\theta_i)) \quad \& \quad \Delta(\theta_i) = R_c \times (1 - \cos(\theta_i)) + \frac{(\Delta\chi)}{2}$$

από την εφαρμογή των οποίων προκύπτουν:

Axial (mm)	Force (N)	θ_i (°)	$\delta(\Phi_c)$	$\Delta(\Phi_c)$
48,679	796,18	15,988	19,340	24,340
47,654	1019,27	15,773	18,827	23,827
46,630	1185,69	15,556	18,315	23,315
45,586	1057,48	15,331	17,793	22,793
44,555	1933,77	15,106	17,278	22,278
43,543	3435,42	14,882	16,772	21,772
42,550	4811,19	14,659	16,275	21,275
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
18,204	7427,99	7,344	4,102	9,102
17,182	7312,15	6,871	3,591	8,591
16,185	8772,89	6,376	3,093	8,093
15,195	10059,09	5,843	2,598	7,598
14,228	12430,24	5,271	2,114	7,114
13,294	16142,65	4,652	1,647	6,647
12,346	19871,07	3,925	1,173	6,173
11,420	26412,73	3,054	0,710	5,710
10,731	57779,88	2,191	0,366	5,366
10,338	120169,72	1,490	0,169	5,169
10,071	186230,66	0,683	0,036	5,036
10,010	200594,56	0,256	0,005	5,005
10,003	201686,94	0,140	0,002	5,002
10,000	201971,77	0,000	0,000	5,000

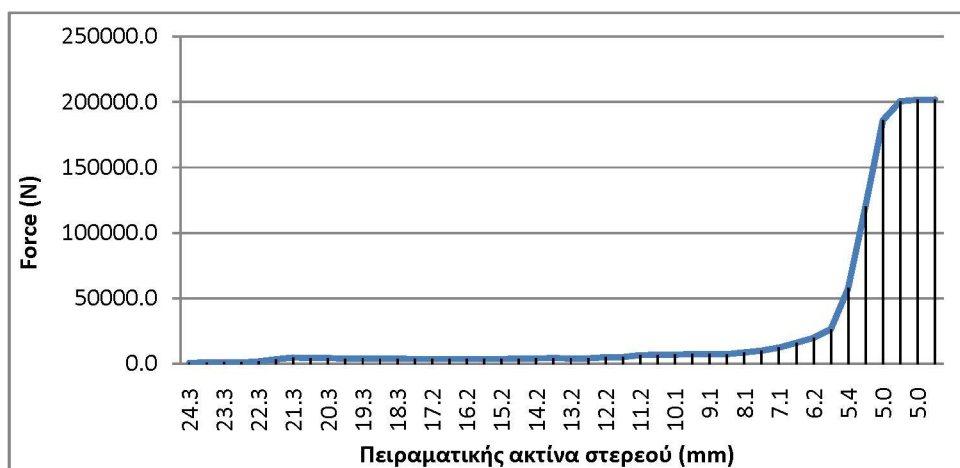
Πίνακας 10.3: Εξαγωγή αριθμητικών αναλόγων για τη συμπίεση και τη σταδιακά ελαττούμενη πειραματική ακτίνα του στερεού, στους κυλίνδρους του σπαστήρα



Εικόνα 6: Σχηματικά οι αντιστοιχίες της πρέσας δοκιμών με τους κυλίνδρους του σπαστήρα όπου:

$$\frac{l_0'}{2} = \delta(\theta_i) \quad \text{και} \quad \left(\frac{\Delta\chi + l_0}{2}\right) = \Delta(\theta_i)$$

Από τα παραπάνω πειραματικά στοιχεία εξάγονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα που αφορούν τη σχέση του αναπτυσσόμενου θλιπτικού φορτίου με τη σταδιακά ελαττούμενη πειραματική ακτίνα του στερεού, κατά τη φόρτίσή του στους κυλίνδρους του μελετούμενου σπαστήρα:

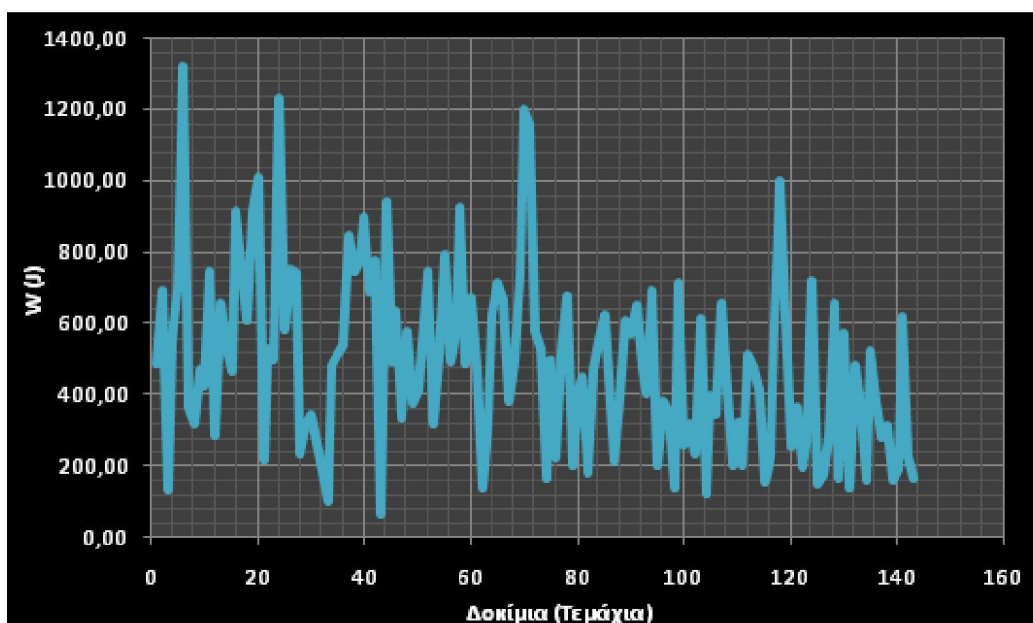


Γράφημα 10.2

10.3.4 Υπολογισμός της πειραματικής ενέργειας γκοφρετοποίησης

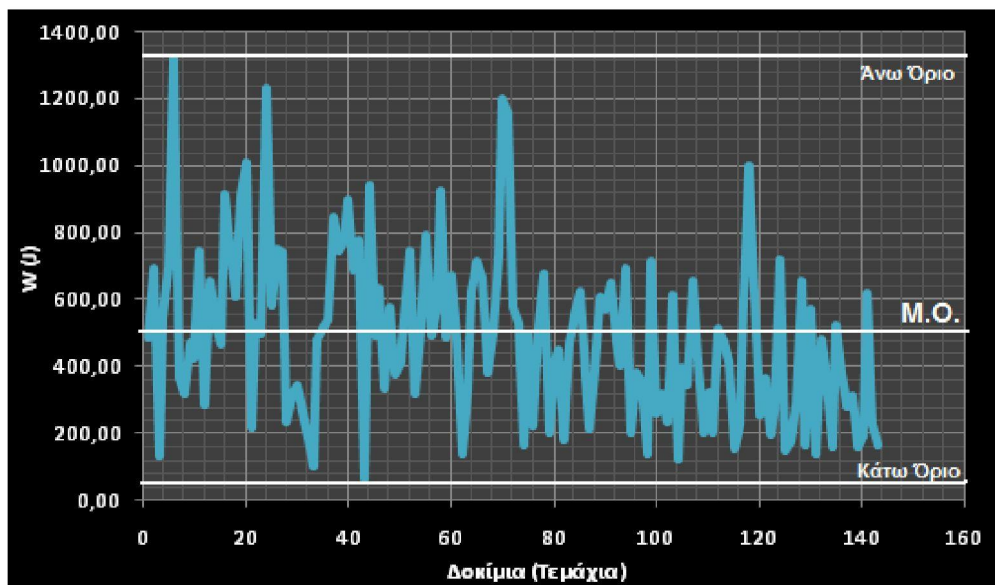
Έχοντας ολοκληρώσει τη διαδικασία της αναγωγής των πειραματικών δεδομένων στο μοντέλο των κυλίνδρων του σπαστήρα και ειδικότερα σε αυτό της λειτουργίας του ενός από αυτούς, αφού το μοντέλο είναι συμμετρικό και μπορεί να μελετηθεί κατά το ήμισυ, η πειραματική ενέργεια γκοφρετοποίησης μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με την εύρεση του εμβαδού, κάτω από την καμπύλη των διαγραμμάτων των αναπτυσσόμενων θλιπτικών φορτιών, συναρτήσει της ελάττωσης της πειραματικής ακτίνας του θλιβόμενου στερεού. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μεθοδολογιών όπως για παράδειγμα του κανόνα του τραπεζίου ή άλλης.

Με εφαρμογή των παραπάνω, για **146** δοκίμια της >40mm κοκκομετρικής τάξης, λαμβάνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:



Γράφημα 10.3: Ενέργεια γκοφρετοποίησης για τους μελετούμενους κόκκους κλίνκερ τσιμέντου

Με τη στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι, σε ένα δειγματικό εύρος 1251,68J, η μέγιστη απαίτηση σε ενέργεια που πρέπει να παραχθεί από τη δρώσα, σε κάθε κύλινδρο του σπαστήρα, στρεπτική ροπή και να προσφερθεί για τη συμπίεση και γκοφρετοποίηση ενός κόκκου κλίνκερ, είναι της τάξης των 1318,49J (*άνω όριο*), ενώ η ελάχιστη απαίτηση (*κάτω όριο*) είναι της τάξης των 66,81J. Η κατά μέσο όρο αναγκαία ενέργεια γκοφρετοποίησης προκύπτει 487,30J.



Γράφημα 10.4

10.4 Μέση ενέργεια γκοφρετοποίησης ανά κοκκομετρική τάξη

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, εξαιτίας του σημαντικού μεγέθους του προς μελέτη δείγματος στερεών, διαχωρίστηκαν και οδηγήθηκαν στη φάση των εργαστηριακών δοκιμών μόνο τα ευμεγέθη δοκίμια του >40mm κοκκομετρικού κλάσματος. Έπειτα, αφού πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές σε ανεμπόδιστη μοναξονική θλίψη, έγινε η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων με σκοπό την εύρεση της αναγκαίας ενέργειας γκοφρετοποίησης για κάθε ένα από τα δοκιμαζόμενα στερεά.

Για την ταξινόμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων και για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αναγκαία ενέργεια γκοφρετοποίησης των στερεών, συναρτήσε του κοκκομετρικού τους μεγέθους, προβήκαμε στη διαμέριση του κλάσματος αυτού σε επτά (-7-) κοκκομετρικές τάξεις. Το πλάτος των έξι (-6-) πρώτων τάξεων τέθηκε ίσο με 10mm, ενώ το πλάτος της έβδομης και τελευταίας τάξης, ορίσθηκε κατά τρόπο τέτοιο, ούτως ώστε να περιλαμβάνει τα δοκίμια της >100mm κοκκομετρίας. Βάσει αυτών και με την εφαρμογή των διαδικασιών που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους βρέθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10.4** που ακολουθεί:

Ενέργειες Γκοφρετοποίησης ανα Κοκκομετρική τάξη													
40-50		50-60		60-70		70-80		80-90		90-100		>100	
Κόκκος (mm)	Wp (J)	Κόκκος (mm)	Wp (J)	Κόκκος (mm)	Wp (J)	Κόκκος (mm)	Wp (J)	Κόκκος (mm)	Wp (J)	Κόκκος (mm)	Wp (J)	Κόκκος (mm)	Wp (J)
47,37	487,21	58,75	693,87	65,60	698,51	70,74	533,73	85,24	1318,49	90,47	1006,98	109,00	608,53
48,68	135,53	54,92	544,15	60,63	368,81	71,26	755,02	80,28	497,83	94,84	739,02	103,06	1228,99
47,60	317,91	52,27	471,31	61,76	746,39	73,08	914,25	87,61	750,89	95,07	1199,96	100,39	897,68
47,91	217,69	52,18	422,11	62,42	289,81	70,96	531,22	83,68	539,26	90,05	522,40	119,60	656,29
49,16	574,77	56,45	267,60	65,01	654,71	74,17	313,50	86,45	847,11	95,07	523,46		
46,60	321,44	57,75	186,69	64,13	468,83	73,29	484,13	88,46	743,23				
48,84	139,83	53,89	104,21	67,75	914,59	73,98	495,07	87,54	939,88				
44,46	180,06	50,96	687,92	67,25	582,86	73,61	614,96	84,84	625,36				
46,90	213,97	59,12	775,14	64,71	233,88	79,83	671,00	85,56	650,23				
48,99	269,26	58,72	66,81	62,05	344,47	74,13	712,31	84,51	122,53				
48,68	166,25	54,63	633,18	66,61	512,80	76,65	666,56	86,25	653,76				
48,89	140,96	50,85	378,57	67,60	777,74	79,71	496,87	84,94	415,17				
47,66	168,48	56,10	414,36	69,59	335,42	73,51	1153,43	83,31	366,26				
43,35	353,80	57,67	581,33	64,23	743,79	73,50	413,07	80,58	574,26				
		55,26	478,96	63,16	509,31	75,49	557,95						
		57,67	622,39	65,96	790,83	76,27	608,51						
		51,95	576,30	67,32	495,23	73,08	572,62						
		58,99	223,02	69,63	924,92	74,86	349,71						
		54,72	675,81	66,53	486,34	74,61	712,24						
		52,82	205,52	63,01	328,14	73,06	615,27						
		58,08	449,00	69,48	381,75	77,14	720,87						
		57,31	367,15	65,74	733,93	70,68	480,10						
		53,87	201,87	69,54	527,17								
		55,74	380,63	61,05	500,50								
		56,46	263,54	68,34	471,16								
		51,44	318,69	67,21	395,28								
		57,21	234,74	61,82	470,12								
		58,88	346,11	65,75	404,03								
		55,52	414,15	66,52	690,12								
		51,93	153,88	67,58	139,82								
		52,36	230,14	69,42	611,77								
		57,10	255,75	62,28	397,75								
		54,16	197,61	64,48	204,33								
		58,66	152,96	61,64	326,35								
		54,73	162,44	64,16	201,66								
		52,08	383,99	68,82	511,24								
		58,63	282,91	69,85	476,99								
		59,21	192,26	66,91	597,12								
		50,11	227,27	68,76	1000,14								
		52,02	167,04	61,88	311,81								
				67,75	162,45								
				69,77	620,13								

Πίνακας 10.4: Πειραματικές ενέργειες γκοφρετοποίησης (σε J) στερεών δοκιμίων, ταξινομημένες στις 7 προβλεπόμενες κοκκομετρικές τάξεις

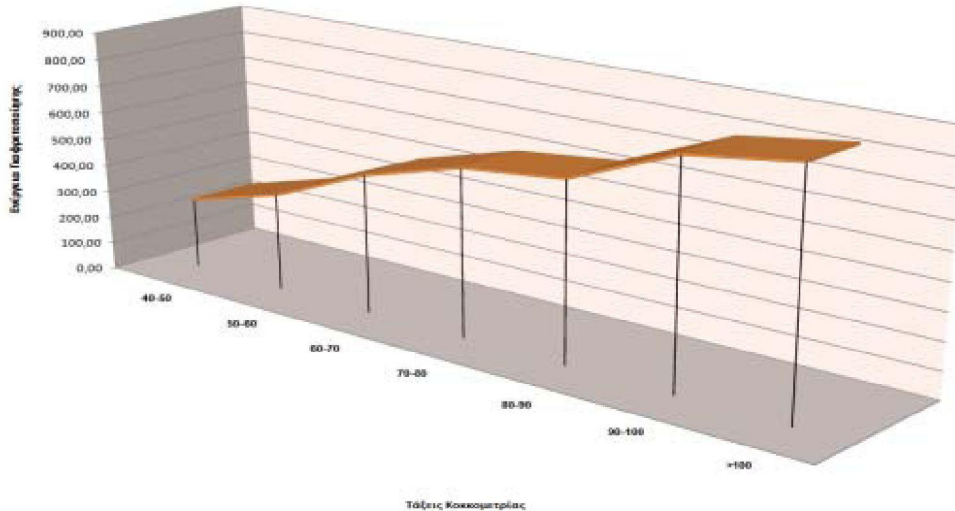
Αναλύοντας περαιτέρω τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα, εξάγεται το μέγεθος της μέσης απαιτούμενης ενέργειας γκοφρετοποίησης ανά κοκκομετρική τάξη, για το οποίο παρατίθενται στοιχεία στον **Πίνακα 10.5** που ακολουθεί:

	Κοκκομετρικές Τάξεις						
	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	>100
Μέση Κοκκομετρία (mm):	47,51	55,27	65,80	74,25	84,95	93,10	108,01
Μέση Ενέργεια Γκοφ/σης Wp (J):	263,37	359,78	508,17	607,84	646,02	798,36	847,87

Πίνακας 5: Μέση κοκκομετρία και μέση αναγκαία ενέργεια γκοφρετοποίησης, ανά κοκκομετρική τάξη

Όπως διαπιστώνεται και από τα αναγραφόμενα στον **Πίνακα 10.5**, με την αύξηση της κοκκομετρίας αυξάνεται και η μέση απαίτηση σε ενέργεια για την κατεργασία των στερεών κόκκων στους κυλίνδρους του σπαστήρα. Η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 5,84% έως 29,2%. Αν και η μελετούμενη κοκκομετρία αυξάνει σταθερά κατά 10mm (πλην της τελευταίας τάξης) και κατά συνέπεια κάποιος θα περίμενε μια αντίστοιχη σταθερή αύξηση και στις τιμές της προκύπτουσας ενέργειας γκοφρετοποίησης μεταξύ των διαμερίσεων, εντούτοις παρατηρείται μια σημαντική διακύμανση στα ποσοστά της αύξησης αυτής. Η παρατήρηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε δοκίμιο, πέραν του κοκκομετρικού του μεγέθους, παρουσιάζει τη δική του συνοχή (πορώδες, μικρορηγματώσεις) και τις δικές του επιφανειακές μικρο-ανωμαλίες, παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τις τιμές των αναπτυσσόμενων θλιπτικών φορτίων κατά τη συμπίεση, άρα και την αναγκαία προκύπτουσα ενέργεια γκοφρετοποίησης.

Γραφικά, η μέση αναγκαία ενέργεια γκοφρετοποίησης για κάθε κοκκομετρική τάξη του >40mm κοκκομετρικού κλάσματος, παρουσιάζεται στο **Γράφημα 10.5** που ακολουθεί:



Γράφημα 10.5: Μέση ενέργεια γκοφρετοποίησης ανά κοκκομετρική τάξη

10.5 Μέση ενέργεια γκοφρετοποίησης του <40mm κοκκομετρικού κλάσματος

Με δεδομένο ότι τα δοκίμια της <40mm κοκκομετρικής τάξης δεν έλαβαν μέρος στη διαδικασία των πειραματικών δοκιμών, ο προσδιορισμός της μέσης ενέργειας γκοφρετοποίησης για το κλάσμα αυτό του δείγματος, θα πραγματοποιηθεί έμμεσα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της βέλτιστης ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων.

Θεωρητικό υπόβαθρο:

Έχοντας τη γενική εξίσωση της ευθείας αναδρομής $y = ax + b$ και τα σημεία $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ (όπου $n \geq 2$) και ζητούμενο αποτελεί ο προσδιορισμός των παραμέτρων a και b , ώστε η ευθεία αυτή να προσαρμόζεται βέλτιστα στο σύνολο των δεδομένων αυτών σημείων, τότε το πρόβλημα προσεγγίζεται με την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 = \min$$

Για να λάβουμε τη λύση εκείνη η οποία θα ελαχιστοποιεί την παραπάνω συνάρτηση, θα πρέπει να μηδενίζονται ταυτόχρονα οι μερικές της παράγωγοι ως προς τις παραμέτρους a και b δηλαδή:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n x_i [y_i - (ax_i + b)] = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)] = 0 \end{cases}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i y_i = b \sum_{i=1}^n x_i + a \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n y_i = b \sum_{i=1}^n 1 + a \sum_{i=1}^n x_i \end{cases}$$

Και τελικά λύνοντας ως προς τις παραμέτρους a και b , λαμβάνουμε τις σχέσεις:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

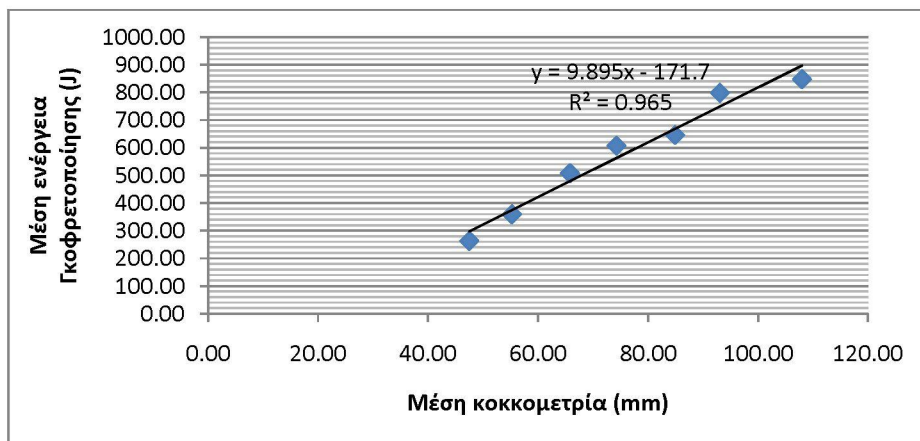
και

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

Θέτοντας ως x_i , τις τιμές της μέσης κοκκομετρίας που εξήχθησαν από την παράγραφο 10.4 και y_i τις αντίστοιχες τιμές της μέσης απαιτούμενης ενέργειας για την γκοφρετοποίηση των στερεών κόκκων και με την εφαρμογή των παραπάνω μαθηματικών σχέσεων προκύπτει η εξίσωση της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων:

$$y = 9.895x - 171,7$$

από την οποία λαμβάνεται η μέση αναμενόμενη ενέργεια γκοφρετοποίησης (y), για κοκκομετρία (x) μικρότερη των 40mm.



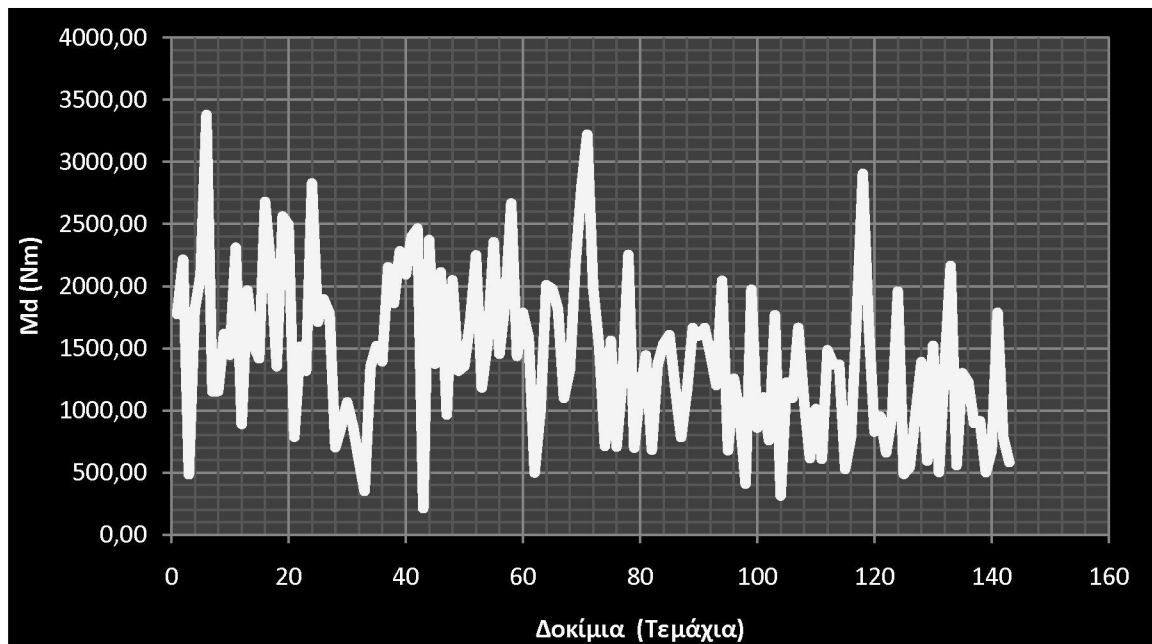
Γράφημα 10.6: Ευθεία ελαχίστων τετραγώνων για την εύρεση της μέσης αναμενόμενης ενέργειας γκοφρετοποίησης για στερεούς κόκκους κλίνκερ, συνάρτησε της μέσης κοκκομετρίας τους

10.6 Υπολογισμός των στρεπτικών ροπών γκοφρετοποίησης

Όπως αποδείχθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η μέση ροπή που πρέπει να δράσει στους κύλινδρους του σπαστήρα για να αποδώσει την αναγκαία ενέργεια γκοφρετοποίησης των τροφοδοτούμενων στερεών κόκκων κλίνκερ τσιμέντου, δίνεται από την μαθηματική έκφραση:

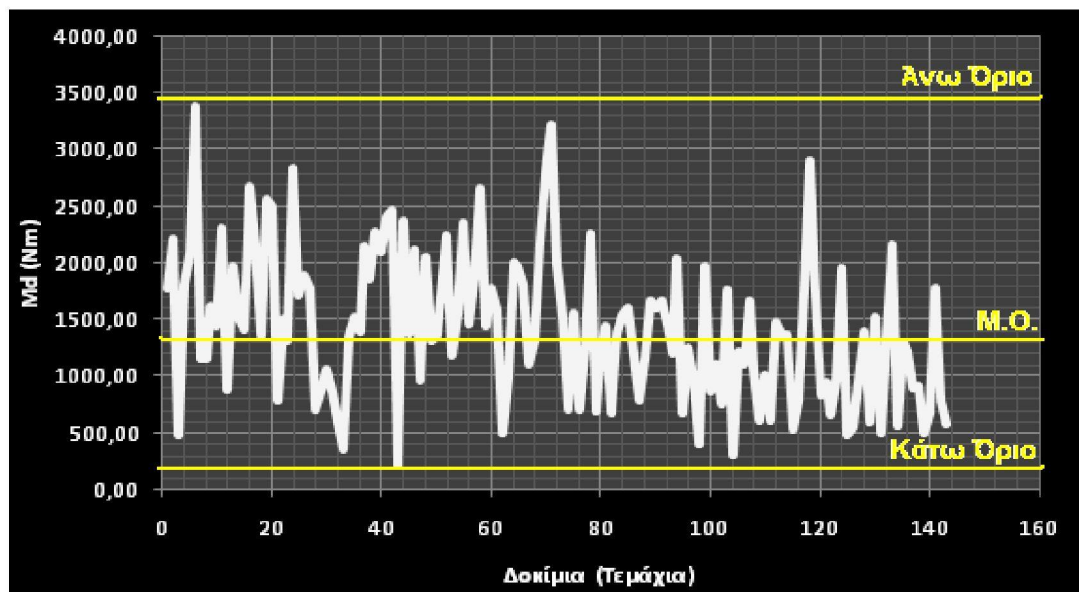
$$\overline{M_d} = \frac{W_p}{\Theta_{cr}}$$

Εξάγοντας από τα μελετούμενα πειραματικά δεδομένα, την αναγκαία ενέργεια γκοφρετοποίησης κάθε στερεού κόκκου, καθώς και την πειραματική γωνία εμπλοκής του στους κύλινδρους του σπαστήρα και με την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης, μπορούμε να πάρουμε τις αντίστοιχες τιμές για τη στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής συνοψίζονται στο **Γράφημα 10.7** που ακολουθεί:



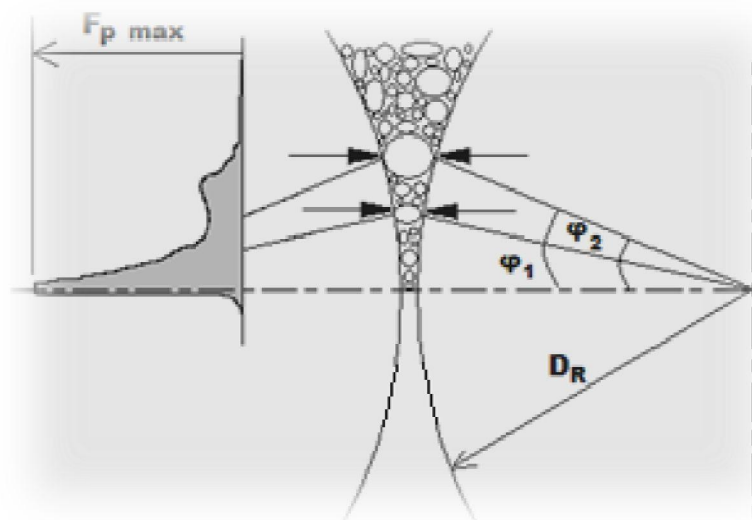
Γράφημα 10.7: Αναγκαίες στρεπτικές ροπές γκοφρετοποίησης στον κύλινδρο σπαστήρα, για την κατεργασία στερεών κόκκων κλίνκερ τσιμέντου

Με τη στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι, σε ένα δειγματικό εύρος 3164,26Nm, η μέγιστη στρεπτική ροπή που πρέπει να δράσει σε κάθε κύλινδρο του μελετούμενου σπαστήρα, ούτως ώστε να παραχθεί η αναγκαία ενέργεια για την γκοφρετοποίησης των τροφοδοτούμενων στερεών κόκκων κλίνκερ τσιμέντου είναι της τάξης των 3377,43Nm (*άνω όριο*), ενώ η ελάχιστη απαίτηση (*κάτω όριο*) είναι της τάξης των 213,17Nm. Η κατά μέσο όρο αναγκαία στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης προκύπτει ίση με 1430,22 Nm.



Γράφημα 10.8: Άνω και κάτω όριο και μέση τιμή της αναπτυσσόμενης αναγκαίας ροπής γκοφρετοποίησης

Προσομοίωση της διαδικασίας θραύσης των
κόκκων κλίνκερ στους κυλίνδρους του
σπαστήρα



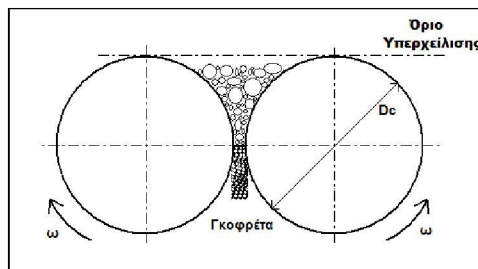
Εικόνα: Φόρτιση κόκκων στα ρολά του σπαστήρα

11.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφεί η μεθοδολογία της μαθηματικής προσομοίωσης για τη φόρτιση και συμπίεση των τροφοδοτούμενων στον σπαστήρα στερεών κόκκων κλίνκερ γκρι τσιμέντου, μέχρι το σχηματισμό πεπιεσμένου συσσωματώματος πάχους $\Delta\chi$. Σκοπός της διαδικασίας αυτής αποτελεί η εκτίμηση των αναπτυσσόμενων στρεπτικών ροπών γκοφρετοποίησης, κατά την λειτουργία του σπαστήρα σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες.

11.2 Γραμμές συμπίεσης

Στη χοάνη δύο οριζόντιων και αντίθετα περιστρεφόμενων κυλίνδρων, οι οποίοι λειτουργούν σε σπαστήρα τύπου κυλινδρόπρεσας, τροφοδοτούνται με συνεχή ροή, στερεοί κόκκοι κλίνκερ, ποικίλης κοκκομετρίας, μέχρι σχεδόν την πλήρωσή της.



Εικόνα 11.1: Τροφοδοσία χοάνης κυλίνδρων

Η διάμετρος (D_c), το πλάτος της ζώνης κατεργασίας των κυλίνδρων (W), καθώς και το διάκενο λειτουργίας τους ($\Delta\chi$) (κατάντι της διακέντρου) θεωρούνται (από κατασκευής) γνωστά και αμετάβλητα μεγέθη. Γνωστές και σταθερά ίσες θεωρούνται και οι γωνιακές ταχύτητες των κυλίνδρων (ω).

Όπως έχει αναφερθεί, κάθε στερεός κόκκος υλικού εισέρχεται στην ωφέλιμη ζώνη κατεργασίας της χοάνης, από τη στιγμή που αυτός εμπλακεί σε γωνία θ_{cr} με τους κυλίνδρους του σπαστήρα και δεχθεί τα πρώτα θλιπτικά φορτία. Αν θεωρήσουμε ότι στη διαδικασία αυτή εμπλέκονται ταυτόχρονα τόσα στερεά, όσα αρκούν για την πλήρωση του πλάτους της ζώνης κατεργασίας (W) των κυλίνδρων, τότε έχουμε ορίσει την έννοια της **γραμμής συμπίεσης**.

Συνεπώς, βάσει των παραπάνω θεωρήσεων, ορίζω ως **γραμμή συμπίεσης** το σύνολο των στερεών κόκκων υλικού, τα οποία εισέρχονται σχεδόν ταυτόχρονα στην ωφέλιμη ζώνη κατεργασίας της χοάνης και θλίβονται μέχρι το σχηματισμό πεπιεσμένης γκοφρέτας. Συμβολίζοντας το μήκος της γραμμής συμπίεσης ως (Li) τότε θα ισχύει ο περιορισμός:

$$Li \leq \sum_{j=1}^{n_i} D_{\delta(j)} \leq W \text{ (σε mm)} \quad (11.1)$$

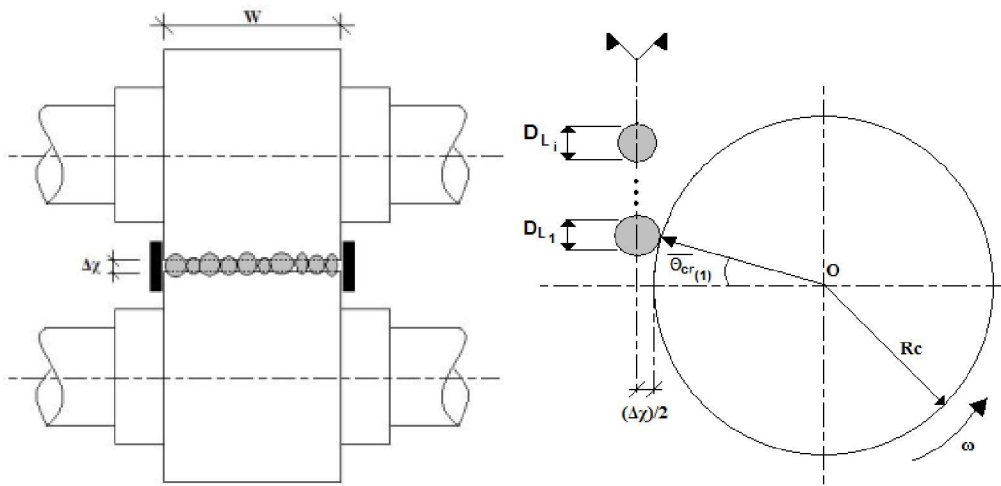
Όπου: $D_{\delta(j)}$ η διάμετρος του j στερεού κόκκου, ο οποίος εισέρχεται στη ζώνη κατεργασίας της χοάνης και αποτελεί τμήμα της γραμμής συμπίεσης i και n_i το πλήθος των στερεών που απαρτίζουν τη γραμμή συμπίεσης i .

11.3 Μέση κοκκομετρία γραμμής & μέσος χρόνος συμπίεσης

Ως μέση κοκκομετρία της γραμμής συμπίεσης, ορίζω το μέσο κοκκομετρικό μέγεθος των στερεών που πληρώνουν μια γραμμή συμπίεσης. Μαθηματικά εκφρασμένη η ανωτέρω πρόταση μπορεί να δοθεί ως:

$$\overline{D_{L(i)}} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} D_{\delta(j)} \quad (11.2)$$

Όπου: ως $\overline{D_{L(i)}}$ συμβολίζεται η μέση κοκκομετρία της i γραμμής συμπίεσης και n_i το πλήθος των στερεών κόκκων που πληρώνουν την i γραμμή συμπίεσης.



Εικόνα 11.2: Μέση κοκκομετρία γραμμών συμπίεσης και μέση γωνία εμπλοκής

Με δεδομένη τη μέση κοκκομετρία της γραμμής συμπίεσης, μπορούμε να εξάγουμε από τη Σχέση 8.1 και την αντίστοιχη **μέση γωνία εμπλοκής** της, η οποία θα προκύπτει από την:

$$\overline{\theta_{cr(i)}} = \cos^{-1} \left(\frac{D_c + \Delta\chi - D_{L(i)}}{D_c} \right) \quad (11.3)$$

Συνεπώς, αν γνωρίζουμε το μέγεθος της γωνιακής ταχύτητας των κυλίνδρων του σπαστήρα (ω), είναι δυνατόν να λάβουμε μια εκτίμηση για **το μέσο χρόνο συμπίεσης των στερεών μιας γραμμής συμπίεσης**, ο οποίος θα δίνεται συναρτήσει της γωνιακής μετατόπισης $[0, \overline{\theta_{cr(i)}}]$. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\overline{\theta_{cr(i)}}}{\overline{t_{cr(i)}}} \leftrightarrow \boxed{\overline{t_{cr(i)}} = \frac{\overline{\theta_{cr(i)}}}{\omega}} \quad (\text{σε } sec) \quad (11.4)$$

Όπου: ως $\overline{t_{cr(i)}}$ συμβολίζω το μέσο χρόνο συμπίεσης των στερεών της i γραμμής

11.4 Μοντέλο προσομοίωσης

Έχοντας δώσει τους ορισμούς και τις αντίστοιχες μαθηματικές εκφράσεις για κάποια από τα μεγέθη τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε στη διαδικασία της προσομοίωσης, προχωρούμε στην επεξήγηση του μοντέλου. Σημειώνουμε ότι η προσομοίωση της διαδικασίας γκοφρετοποίησης των στερεών κόκκων υλικού πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα office excel.

11.4.1 Δεδομένα προσομοίωσης

Τα τεχνικά δεδομένα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία της προσομοίωσης συνοψίζονται στον **Πίνακα 11.1** που ακολουθεί και αφορούν στα κύρια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του υποσυστήματος των κυλίνδρων του σπαστήρα, καθώς και τις ρυθμίσεις λειτουργίας τους:

Ονομασία χαρακτηριστικού	Συμβολισμός	Τιμή (μονάδα μέτρησης)
Διάμετρος κυλίνδρου	D_c	1000 (mm)
Διάκενο λειτουργίας	Δ_χ	10 (mm)
Πλάτος ζώνης κατεργασίας	W	900 (mm)
Γωνιακή ταχύτητα κυλίνδρου	ω	37 rpm ή 3.87rad/sec

Πίνακας 11.1: Τεχνικά δεδομένα

Άλλα στοιχεία τα οποία θα αποτελέσουν δεδομένα της παρούσας διαδικασίας είναι η μέση ενέργεια γκοφρετοποίησης ανά κοκκομετρική τάξη, μέγεθος οι τιμές του οποίου εκτιμήθηκαν πειραματικά μέσω μεθοδολογιών, οι οποίες αναφέρθηκαν αναλυτικά στο **Κεφάλαιο 10**. Συνοπτικά οι εκτιμήσεις αυτές σημειώνονται στον **Πίνακα 11.2** που ακολουθεί:

	Κοκκομετρικές Τάξεις (mm)							
	<40	[40-50)	[50-60)	[60-70)	[70-80)	[80-90)	[90-100)	>100
Μέση ενέργεια γκοφ/ποίησης (Joule)	49.1	263.37	359.78	508.17	607.02	646.02	798.36	847.87

Πίνακας 11.2: Πειραματικές εκτιμήσεις για τη μέση αναγκαία ενέργεια γκοφρετοποίησης στερεών κόκκων κλίνκερ γκρι τσιμέντου ανά κοκκομετρική τάξη

11.4.2 Δημιουργία μήτρας γραμμών συμπίεσης

Με την εφαρμογή της γεννήτριας του κοκκομετρικού μεγέθους των στερεών κόκκων κλίνκερ γκρι τσιμέντου:

$$x = 10 + 39.056 \times (-\ln(1-U))^{\frac{1}{1.449}},$$

την οποία αποδείξαμε στο **Κεφάλαιο 9**, δημιουργούμε τη μήτρα των γραμμών συμπίεσης. Η μήτρα αυτή περιλαμβάνει σειρές τυχαίων ακέραιων αριθμών (int),

καθένας από τους οποίους εκφράζει το κοκκομετρικό μέγεθος (σε mm) και πιο συγκεκριμένα την πειραματική διάμετρο των προς κατεργασία στερεών κόκκων που απαρτίζουν μια γραμμή. Ο περιορισμός που τίθεται στη φάση αυτή είναι ότι το άθροισμα των στοιχείων κάθε γραμμής της μήτρας θα πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του δεδομένου πλάτους κατεργασίας (W) των κυλίνδρων του σπαστήρα, ή πιο συγκεκριμένα, με την εφαρμογή της Σχέσης 11.1:

$$\sum_{i=1}^{n_i} D_{\delta/\pi(ij)} \leq 900mm$$

$\frac{j}{i}$	1	2	...	...	n_{i-11}	n_{i-10}	n_{i-9}	n_{i-8}	n_{i-7}	n_{i-6}	n_{i-5}	n_{i-4}	n_{i-3}	n_{i-2}	n_{i-1}	n_i
1	18	61	...	...	14	65	55	51	35	10	35	47	72	0	0	0
2	58	43	...	...	87	60	55	72	18	30	99	0	0	0	0	0
3	15	17	...	...	30	42	30	62	45	16	59	21	83	13	30	0
4	47	13	...	...	13	50	65	56	38	35	34	0	0	0	0	0
5	48	56	...	...	37	83	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	36	30	...	...	41	62	39	53	20	65	0	0	0	0	0	0
7	30	48	...	...	38	24	19	87	33	102	86	0	0	0	0	0
8	55	46	...	...	111	56	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	51	73	...	...	64	50	40	17	22	45	71	22	16	0	0	0
10	15	50	...	...	58	14	30	13	31	24	20	83	49	37	0	0
11	53	68	...	...	11	35	104	64	10	17	47	0	0	0	0	0
12	39	26	...	...	35	69	58	13	12	27	57	17	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
m	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Πίνακας 11.3: Ενδεικτική μήτρα γραμμών συμπίεσης

11.4.3 Κατασκευή μήτρας γωνιών εμπλοκής

Έχοντας δημιουργήσει τη μήτρα των γραμμών συμπίεσης, προχωρούμε στη δημιουργία της αντίστοιχης μήτρας των γωνιών εμπλοκής. Η μήτρα αυτή περιλαμβάνει τη γωνία εμπλοκής για κάθε ένα από τα τυχαία στερεά τεμάχια που απαρτίζουν τις γραμμές συμπίεσης του Πίνακα 11.3.

Η ανεύρεση των γωνιών αυτών (εκφρασμένες σε ακτίνια) επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της αποδεδειγμένης μαθηματικής έκφρασης 8.1 και πιο συγκεκριμένα από την:

$$\theta_{cr(ij)} = \cos^{-1} \left(\frac{D_c + \Delta_\chi - D_{\delta/\pi(ij)}}{D_c} \right) \quad (11.5)$$

Όπου: $\theta_{cr(ij)}$ η γωνία εμπλοκής του j στερεού κόκκου της i γραμμής συμπίεσης και $D_{\delta/\pi(ij)}$ η αντίστοιχη γεννημένη πειραματική διάμετρος του j στερεού της i γραμμής συμπίεσης.

Με την εφαρμογή της σχέσης 11.5 λαμβάνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

$\frac{j}{i}$	1	2	...	...	n_{i-11}	n_{i-10}	n_{i-9}	n_{i-8}	n_{i-7}	n_{i-6}	n_{i-5}	n_{i-4}	n_{i-3}	n_{i-2}	n_{i-1}	n_i
1	0,13	0,32	...	...	0,09	0,33	0,30	0,29	0,22	0,21	0,22	0,27	0,35	0,00	0,00	0,00
2	0,31	0,26	...	...	0,39	0,32	0,30	0,35	0,13	0,20	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,10	0,10	...	...	0,20	0,25	0,20	0,32	0,27	0,11	0,31	0,15	0,38	0,08	0,20	0,00
4	0,27	0,08	...	...	0,08	0,28	0,33	0,30	0,24	0,22	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,28	0,30	...	...	0,23	0,38	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,23	0,20	...	...	0,25	0,32	0,24	0,29	0,14	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,20	0,28	...	...	0,24	0,17	0,13	0,39	0,21	0,43	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,30	0,27	...	...	0,45	0,30	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,29	0,36	...	...	0,33	0,28	0,25	0,12	0,16	0,27	0,35	0,16	0,11	0,00	0,00	0,00
10	0,10	0,28	...	...	0,31	0,09	0,20	0,08	0,21	0,17	0,14	0,38	0,28	0,23	0,00	0,00
11	0,29	0,34	...	...	0,04	0,22	0,44	0,33	0,00	0,12	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,24	0,18	...	...	0,22	0,35	0,31	0,08	0,06	0,18	0,31	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
m	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Πίνακας 11.4: Μήτρα γωνιών εμπλοκής $\Theta_{cr(ij)}$ (σε ακτίνια) των στερεών κόκκων κλίνκερ ανά γραμμή συμπίεσης

11.4.4 Κατασκευή μήτρας μέσω ενεργειών γκοφρετοποίησης

Τέλος, από τη μήτρα των γραμμών συμπίεσης δημιουργούμε και τη μήτρα των μέσων ενεργειών γκοφρετοποίησης. Η μήτρα αυτή περιλαμβάνει τις εκτιμώμενες τιμές για τη μέση ενέργεια γκοφρετοποίησης κάθε στερεού κόκκου, ο οποίος αποτελεί τμήμα των αντίστοιχων γραμμών συμπίεσης του Πίνακα 11.3. Η προσάρτηση των αντίστοιχων εκτιμώμενων τιμών, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.2, βασίζεται στον έλεγχο της κοκκομετρικής τάξης στην οποία εντάσσεται το κάθε στερεό τεμάχιο της κάθε γραμμής συμπίεσης.

$\frac{j}{i}$	1	2	...	...	n_{i-11}	n_{i-10}	n_{i-9}	n_{i-8}	n_{i-7}	n_{i-6}	n_{i-5}	n_{i-4}	n_{i-3}	n_{i-2}	n_{i-1}	n_i
1	49.1	508.1	...	...	49.1	508.1	359.7	359.7	49.1	49.1	49.1	263.3	607.8	0,0	0,0	0,0
2	359.7	263.3	...	...	646.0	508.1	359.7	607.8	49.1	49.1	798.3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	49.1	49.1	...	...	49.1	263.3	49.1	508.1	263.3	49.1	359.7	49.1	646.0	49.1	49.1	0,0
4	263.3	49.1	...	...	49.1	359.7	508.1	359.7	49.1	49.1	49.1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	263.3	359.7	...	...	49.1	646.0	508.1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	49.1	49.1	...	...	263.3	508.1	49.1	359.7	49.1	508.1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	49.1	263.3	...	...	49.1	49.1	49.1	646.0	49.1	847.8	646.0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	359.7	263.3	...	...	847.8	359.7	49.1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	358.7	607.8	...	...	508.1	359.7	263.3	49.1	49.1	263.3	607.8	49.1	49.1	0,0	0,0	0,0
10	49.1	359.7	...	...	359.7	49.1	49.1	49.1	49.17	49.1	49.1	646.0	263.3	49.1	0,0	0,0
11	359.7	508.1	...	...	49.1	49.1	847.8	508.1	49.1	49.1	263.3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	49.1	49.1	...	...	49.1	508.1	359.7	49.1	49.1	49.1	359.7	49.1	0,0	0,0	0,0	0,0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
m	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Πίνακας 11.5: Μήτρα μέσω ενεργειών γκοφρετοποίησης $W_p(ij)$ των στερεών ανά γραμμή συμπίεσης

11.4.5 Πίνακας μέσων στρεπτικών ροπών γκοφρετοποίησης

Έχοντας δείξει σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας ότι, η μέση στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης για ένα στερεό κόκκο, ο οποίος τροφοδοτείται στη χοάνη των κυλίνδρων του σπαστήρα, δίνεται από τη γενική μαθηματική έκφραση (από Σχέση 10.1):

$$\overline{M_d} = \frac{W_p}{\theta_{cr}}$$

μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μέση αναγκαία στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης και για τα στερεά των γραμμών συμπίεσης που παρατίθενται στον **Πίνακα 11.3**.

Αυτό θα πραγματοποιηθεί διαιρώντας κατά μέλη τους **Πίνακες 11.4** και **11.5**, λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα τον αντίστοιχο πίνακα των μέσων στρεπτικών ροπών γκοφρετοποίησης ανά στερεό κόκκο κάθε γραμμής συμπίεσης. Ειδικότερα με την εφαρμογή της:

$$\overline{M_{d(ij)}} = \frac{W_{p(ij)}}{\theta_{cr(ij)}} \quad (11.6)$$

λαμβάνουμε τη μήτρα:

j i	1	2	...	...	n_{i-11}	n_{i-10}	n_{i-9}	n_{i-8}	n_{i-7}	n_{i-6}	n_{i-5}	n_{i-4}	n_{i-3}	n_{i-2}	n_{i-1}	n_i
1	377,7	1587,8	...	...	545,6	1539,7	1199,0	1240,3	223,2	233,8	223,2	975,2	1736,6	0,0	0,0	0,0
2	1160,3	1012,7	...	...	1656,4	1587,8	1199,0	1736,6	377,7	245,5	1856,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	491,0	491,0	...	...	245,5	1053,2	245,5	1587,8	975,2	446,4	1160,3	327,3	1700,0	613,8	245,5	0,0
4	975,2	613,8	...	...	613,8	1284,6	1539,7	1199,0	204,6	223,2	223,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	940,4	1199,0	...	...	213,5	1700,0	1494,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	213,5	245,5	...	...	1053,2	1587,8	204,6	1240,3	350,7	1539,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	245,5	940,4	...	...	204,6	288,8	377,7	1656,4	233,8	1971,6	1656,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	1199,0	975,2	...	...	1884,0	1199,0	223,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	1240,3	1688,3	...	...	1539,7	1284,6	1053,2	409,2	306,9	975,2	1736,6	306,9	446,4	0,0	0,0	0,0
10	491,0	1284,6	...	...	1160,3	545,6	245,5	613,8	233,8	288,8	350,7	1700	940,4	213,5	0,0	0,0
11	1240,3	1494,4	...	...	1227,5	223,2	1926,8	1539,7	233,8	409,2	975,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	204,6	272,8	...	...	223,2	1451,7	1160,3	613,8	818,3	272,8	1160,3	409,2	0,0	0,0	0,0	0,0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
m	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Πίνακας 11.6: Μήτρα μέσων στρεπτικών ροπών γκοφρετοποίησης $\overline{M_{d(ij)}}$ (σε Nm) των στερεών κόκκων ανά γραμμή συμπίεσης

Όπως γίνεται κατανοητό, η μέση ολική στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης που πρέπει να δράσει σε κάθε κύλινδρο του σπαστήρα για να αποδώσει την αναγκαία ενέργεια γκοφρετοποίησης του συνόλου των στερεών μιας γραμμής συμπίεσης, θα προκύπτει από το άθροισμα των τιμών κάθε γραμμής του Πίνακα 6, ή πιο συγκεκριμένα από την σχέση:

$$\overline{M_{d \text{ total } (i)}} = \sum_{j=1}^{n_i} \overline{M_{d (ij)}} \quad (11.7)$$

Με την εφαρμογή της ανωτέρω σχέσης, καθώς και της σχέσης 11.4 για την εύρεση του μέσου χρόνου κατεργασίας ανά γραμμή συμπίεσης, λαμβάνουμε τον **Πίνακα 11.7** που ακολουθεί, ο οποίος περιλαμβάνει τη μέση ολική δρώσα στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης, ανά γραμμή συμπίεσης, συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης.

Σειρές Συμπίεσης	$\overline{M_{d\ total\ (i)}}\ (Nm)$	$\overline{t_{cr(i)}}\ (sec)$
1	20226,24	0,058
2	21017,06	0,056
3	17263,30	0,055
4	22529,02	0,055
5	15730,87	0,055
6	24050,90	0,055
7	18897,06	0,056
8	20798,07	0,055
9	20242,94	0,056
10	21849,83	0,056
11	22096,70	0,056
12	22308,01	0,056
...		
m		

Πίνακας 11.7: Μέση ολική στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης ανά σειρά συμπίεσης, συναρτήσει του μέσου χρόνου κατεργασίας

11.5 Αποτελέσματα

11.5.1 Υπολογισμός της μέσης στρεπτικής ροπής

Προσομοιώνοντας για 15 λεπτά της ώρας, τη λειτουργία του σπαστήρα στην κατεργασία **στερεών κόκκων κλίνκερ γκρι τσιμέντου**, με βάση την διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- ✓ Για περίπου 16.000 διερχόμενες, από τη χοάνη των κυλίνδρων, γραμμές συμπίεσης, μέγεθος το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 320.000 στερεά, η μέση ολική αναπτυσσόμενη στρεπτική ροπή ανά κύλινδρο του μελετούμενου σπαστήρα βρέθηκε ίση με:

$$\overline{M_{d\ (total)}} = 20.578,03Nm$$

- ✓ Η ελάχιστη τιμή που μεγέθους αυτού, κατά το μελετούμενο χρονικό διάστημα των 15 λεπτών της ώρας, βρέθηκε ίση με $\overline{M_{d\ (total)}}\ (min) = 16.619,43Nm$ ενώ,
- ✓ Η μέγιστη τιμή βρέθηκε ίση με $\overline{M_{d\ (total)}}\ (max) = 24.898,76Nm$.

11.5.2 Υπολογισμός της μέσης αναγκαίας ισχύος

Εξετάζοντας το θέμα από τη σκοπιά της ισχύος λαμβάνουμε τα ακόλουθα:

Αν το ολικό έργο που παράγεται από μια θεωρούμενη σταθερή στρεπτική ροπή, κατά τη διάρκεια μιας γωνιακής μετατόπισης με αρχική γωνία θ_1 και τελική θ_2 , δίνεται από τη μαθηματική έκφραση:

$$\Delta W_{\text{total}} = M_d(\theta_2 - \theta_1) \text{ ή } \Delta W_{\text{total}} = M_d \Delta\theta \text{ τότε,}$$

διαιρώντας τη σχέση αυτή δια του στοιχειώδους χρονικού διαστήματος Δt , κατά τη διάρκεια του οποίου πραγματοποιείται η γωνιακή μετατόπιση $\Delta\theta$, βρίσκουμε:

$$\frac{\Delta W_{\text{total}}}{\Delta t} = M_d \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Όπου: ο λόγος $\frac{\Delta W_{\text{total}}}{\Delta t}$ είναι ο ρυθμός παραγωγής έργου (ή η ισχύς P) και ο λόγος $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ είναι η γωνιακή ταχύτητα ω των κυλίνδρων του σπαστήρα.

Άρα η ισχύς τελικά θα προκύπτει από τη σχέση:

$$P = M_d \omega$$

Συνεπώς από την ευρεθείσα τιμή για τη μέση ολική στρεπτική ροπή γκοφρετοποίησης που δρα σε κάθε κύλινδρο του σπαστήρα λαμβάνουμε:

$$\overline{P_{\text{total}/2}} = \overline{M_d(\text{total})} \times \omega = 20.578,03 \times 3.87 \text{ (Nm)} \left(\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right) = 79.636,98 \left(\frac{\text{J}}{\text{sec}} \right) \text{ ή τελικά}$$

$$\overline{P_{\text{total}/2}} \approx 80 \text{ kW}$$

Την ισχύ αυτή την ονομάζω **μέση αναγκαία ισχύ γκοφρετοποίησης** και εκφράζει τον απαιτούμενο μέσο ρυθμό παραγωγής έργου από τον κάθε κύλινδρο του σπαστήρα, για την θραύση και κατεργασία των στερεών κόκκων μιας σειράς συμπίεσης. Αναγάγοντας το αποτέλεσμα αυτό στη λειτουργία και των δύο κυλίνδρων, λαμβάνουμε την **ολική μέση ισχύ γκοφρετοποίησης** των στερεών μιας γραμμής συμπίεσης, η οποία δίνεται ως:

$$\overline{P_{\text{total}}} = \overline{P_{\text{total}/2}} \times 2 \leftrightarrow \overline{P_{\text{total}}} \approx 160 \text{ kW}$$

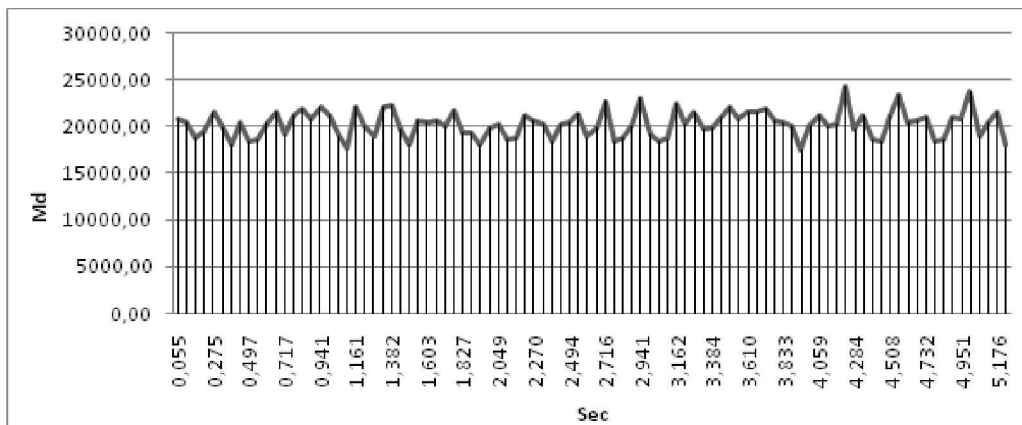
Η αντίστοιχη ελάχιστη και μέγιστη τιμή του μεγέθους της ολικής μέσης ισχύος γκοφρετοποίησης των στερεών κόκκων κλίνκερ, βρίσκονται ίσες με:

$$\checkmark \quad P_{\text{total}}(\text{min}) = \overline{M_d(\text{total})}(\text{min}) \times \omega \times 2 \approx 129 \text{ kW και}$$

$$\checkmark \quad P_{\text{total}}(\text{max}) = \overline{M_d(\text{total})}(\text{max}) \times \omega \times 2 \approx 193 \text{ kW}$$

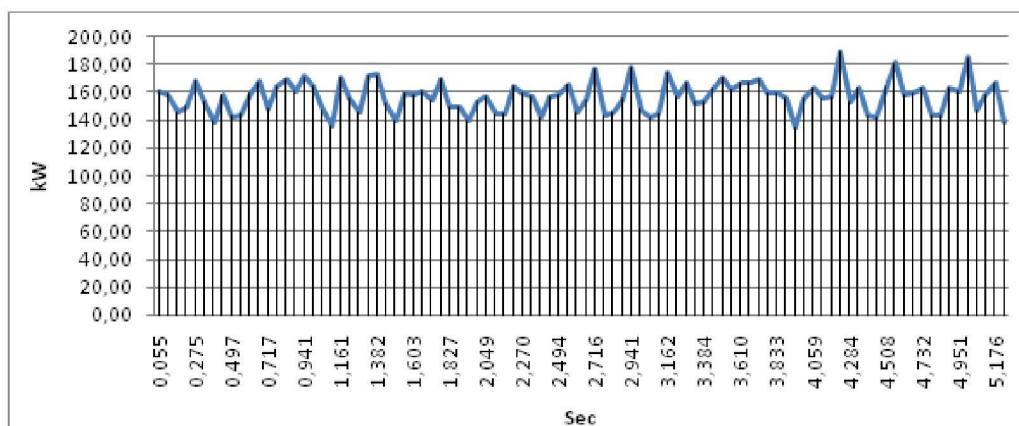
11.5.3 Γραφήματα

Στη συνέχεια παρατήθενται διαγράμματα στοχευμένα σε χρονικό διάστημα των 5 δευτερολέπτων αναφορικά με τις αναπτυσσόμενες στρεπτικές ροπές γκοφρετοποίησης ανά κύλινδρο του μελετούμενου σπαστήρα, καθώς και της ολικής αναγκαίας ισχύος γκοφρετοποίησης των στερεών κόκκων κλίνκερ γκρι τσιμέντου.

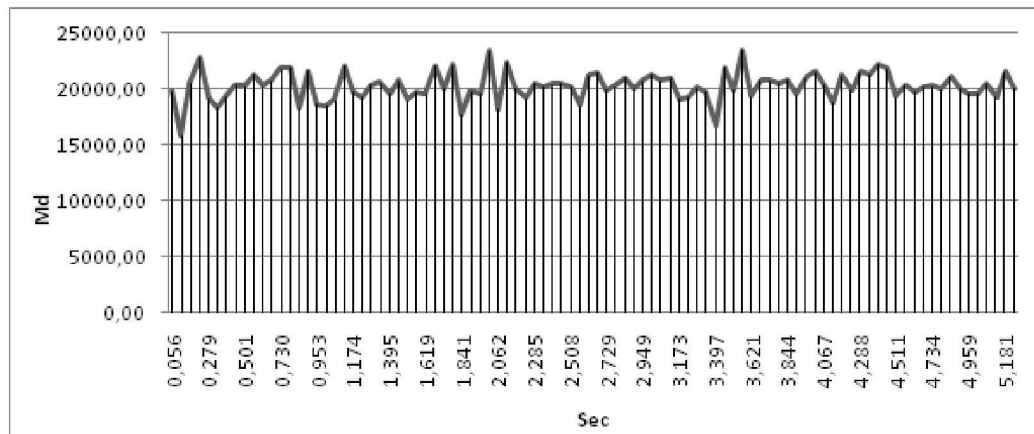


$\overline{M_{d(total)}} = 20290.99\text{Nm}$, $\overline{M_{d(total)}} (\text{min}) = 17451.39\text{Nm}$, $\overline{M_{d(total)}} (\text{max}) = 24389.60\text{Nm}$

Αντίστοιχη ολική αναμενόμενη και αναγκαία ισχύς γκοφρετοποίησης:

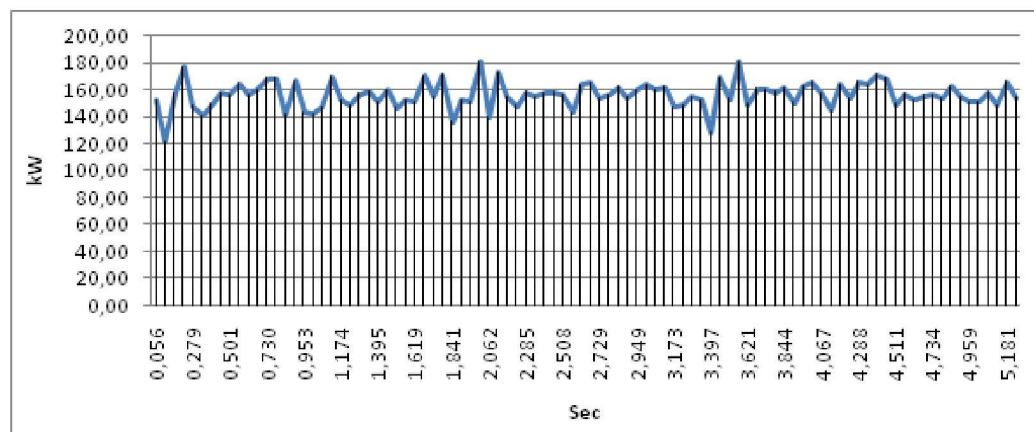


$\overline{P_{total}} = 157.05\text{kW}$, $\overline{P_{total}} (\text{min}) = 135.07\text{kW}$, $\overline{P_{total}} (\text{max}) = 188.78\text{kW}$

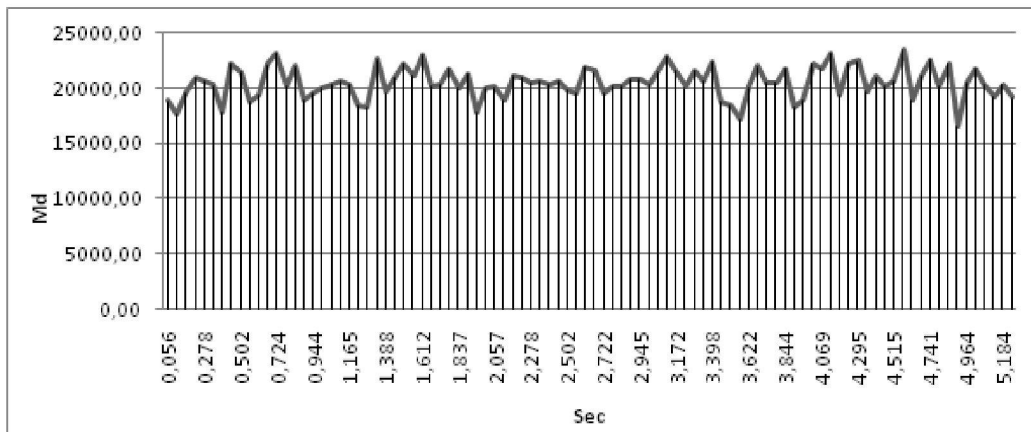


$\overline{M_{d \text{ (total)}}} = 20238.94 \text{ Nm}$, $\overline{M_{d \text{ (total)}}} \text{ (min)} = 15765.70 \text{ Nm}$, $\overline{M_{d \text{ (total)}}} \text{ (max)} = 23435.06 \text{ Nm}$

Αντίστοιχη ολική αναμενόμενη και αναγκαία ισχύς γκοφρετοποίησης:

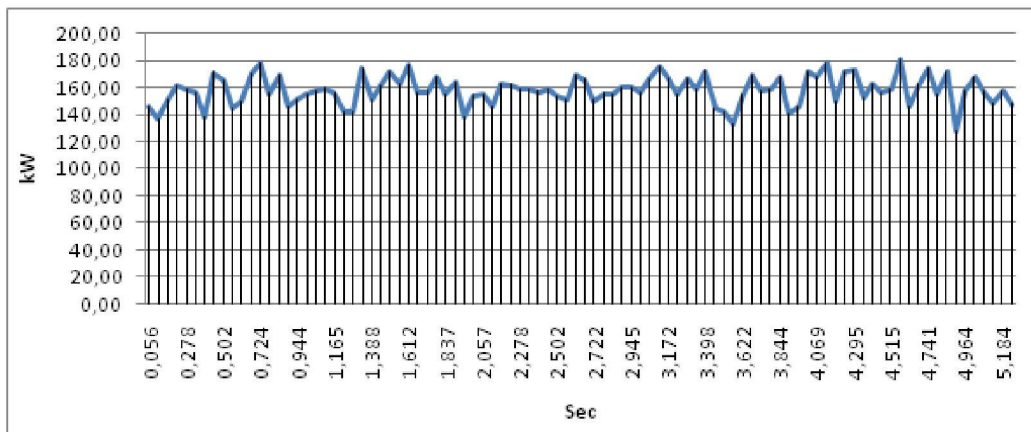


$\overline{P_{total}} = 156,65 \text{ kW}$ $P_{total} \text{ (min)} = 122,03 \text{ kW}$ $P_{total} \text{ (max)} = 181,39 \text{ kW}$



$\overline{M_{d \text{ (total)}}} = 20463.47\text{Nm}$, $\overline{M_{d \text{ (total)}} \text{ (min)}} = 16534.69\text{Nm}$, $\overline{M_{d \text{ (total)}} \text{ (max)}} = 23422.14\text{Nm}$

Αντίστοιχη ολική αναμενόμενη και αναγκαία ισχύς γκοφρετοποίησης:



$\overline{P_{total}} = 158,38\text{kW}$ $P_{total \text{ (min)}} = 127,98\text{kW}$ $P_{total \text{ (max)}} = 181,29\text{kW}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

12

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

12.1 Γενικά συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας

Από την ανωτέρω ανάλυση προκύπτουν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα:

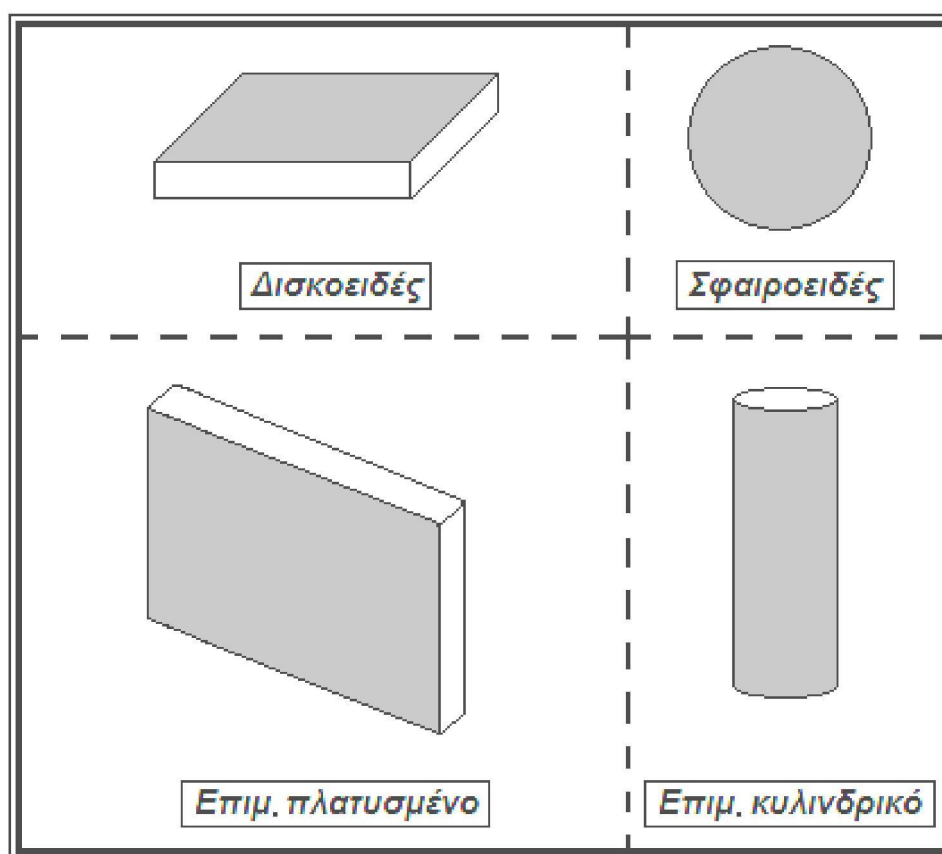
1. Η αντοχή των κόκκων κλίνκερ τσιμέντου σε μονοαξονική θλίψη είναι ανεξάρτητη από το μέγεθός τους και από τα γεωμετρικά μορφολογικά τους χαρακτηριστικά και παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις (~ 77% της μέσης τιμής)
2. Η απορρόφηση ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη θραύση σε συμπίεση ενός κόκκου κλίνκερ δεν είναι ομοιόμορφη αλλά συντελείται σε διακριτά στάδια: *Συμπίεση ολόκληρου του κόκκου* → *Ρηγματώσεις* → *Μικρο-ρηγματώσεις* → *Πουδροποίηση* → *Συμπίεση πούδρας* εκ των οποίων το τελευταίο στάδιο της συμπίεσης και μείωσης του πορώδους του κόκκου απορροφά το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας.
3. Όπως αναμένονταν η κοκκομετρία (μέγεθος κόκκου) , η αντοχή, το διάκενο μεταξύ των κυλίνδρων είναι παράγοντες που επηρεάζουν αποφασιστικά την απορροφούμενη ισχύ.
4. Η μέγιστη διακύμανση της ισχύος (στρεπτικής ροπής) βρέθηκε κατόπιν πολλών προσομοιώσεων ίση με ~17% της μέσης τιμής της ενώ η διακύμανση του μεγέθους και του απορροφούμενου πλαστικού έργου κατά τη συμπίεση των κόκκων κλίνκερ ήταν ίσα προς ~72% και ~63% των αντίστοιχων μέσω τιμών. Η παρατηρούμενη μικρότερη διακύμανση της ισχύος οφείλεται στον μεγάλο αριθμό των συμπιεζόμενων κόκκων διαφορετικών ιδιοτήτων κατά μήκος μιας γραμμής συμπίεσης.

12.2 Παρατηρήσεις

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι γενική και μπορεί ως εκ τούτου να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση των απαιτούμενων ενεργειακών μεγεθών στην περίπτωση διαφορετικών υλικών και γεωμετρικών – κινηματικών χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής είναι δυνατό να χρησιμεύσουν στην διαστασιολόγηση, έλεγχο και συνεπώς στον σχεδιασμό στοιχείων και συνιστωσών των μηχανολογικών συσκευών και εγκαταστάσεων που περιγράφονται (*κινητήρες, στοιχεία μετάδοσης κίνησης, μειωτήρες στροφών, σύνδεσμοι, έδρανα, πλαίσια μηχανής και εφέδρανα στήριξης*).

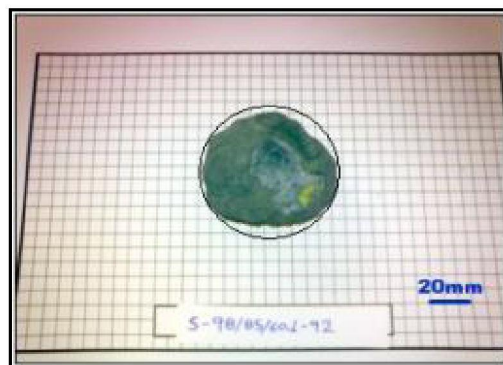
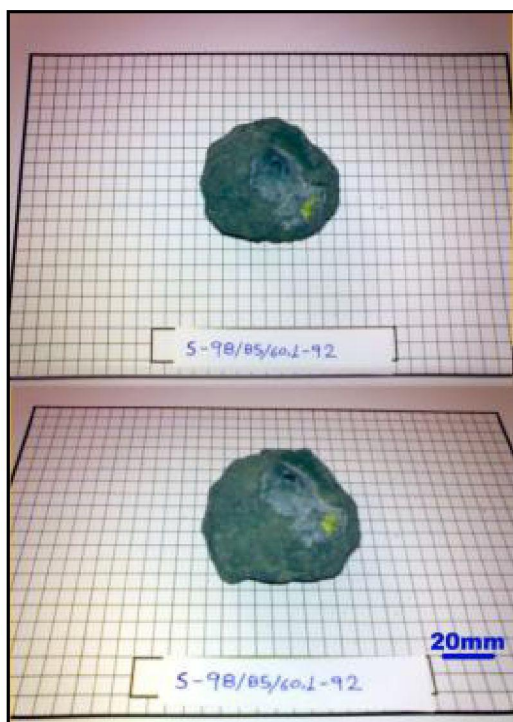
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΩΝ ΚΟΚΚΩΝ ΚΛΙΝΚΕΡ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ



Σφαιροειδείς κόκκοι

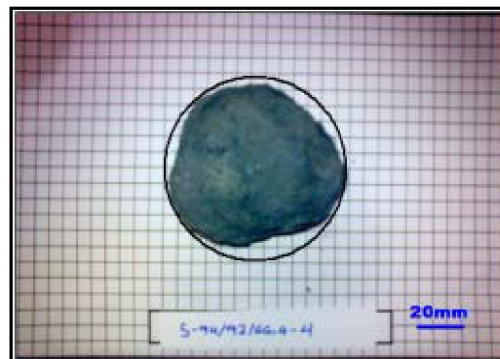
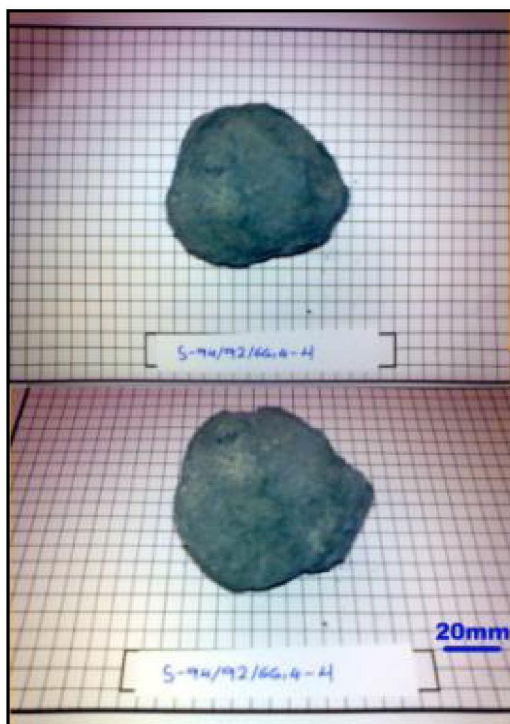
S-98/85/60.1-92



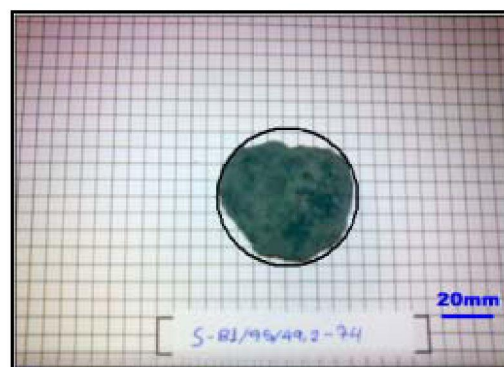
S-83/97/64.1-16



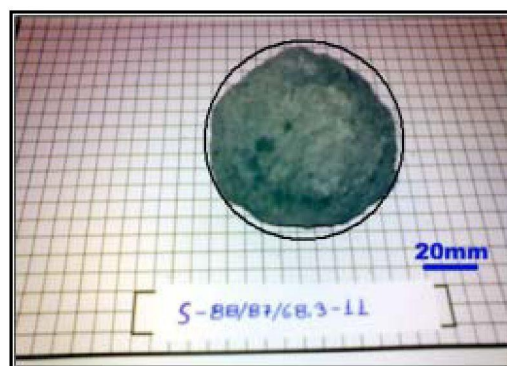
S-94/92/66.4-4



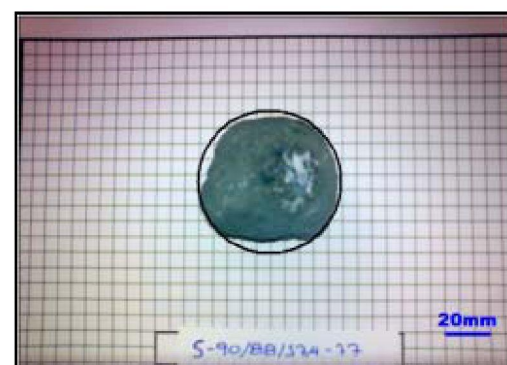
S-81/95/49.2-74



S-88/87/68.3-11



S-90/88/57.4-77



S-73/99/55.7-68

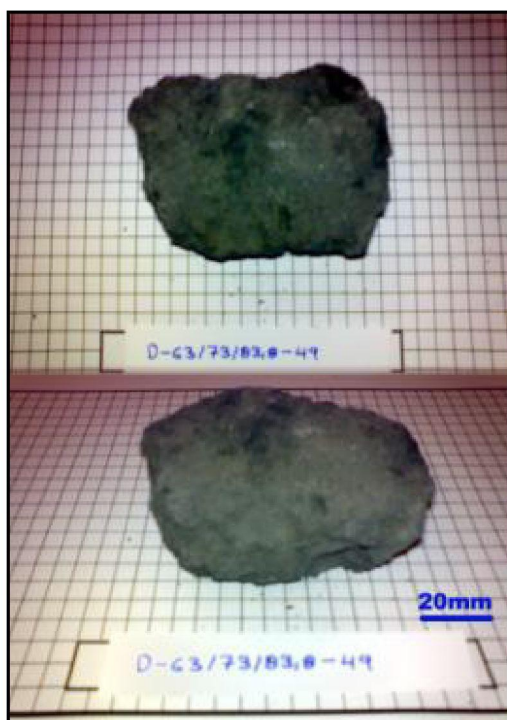


S-96/95/73.4-17



Δισκοειδείς κόκκοι

D-63/73/83.8-49



D-51/80/100.2-52



D-34/84/98.0-239



D-42/73/95.1-210

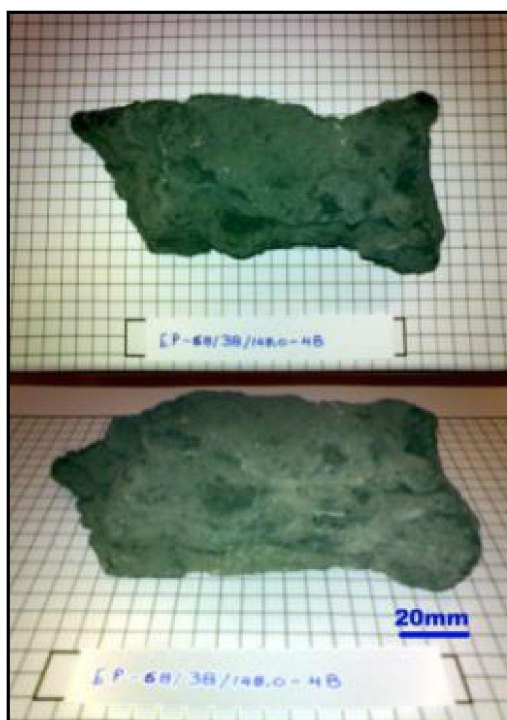


Επιμ. Πλατυσμένοι κόκκοι

EP-55/63/82.1-211



EP-68/38/148.0-48



Επιμ. Κυλινδρικοί κόκκοι:

EC-87/50/99.2-131



EC-71/53/153.5-43



Βιβλιογραφία:

- [1] Πιθανότητες τυχαίες μεταβλητές και στοχαστικές διαδικασίες, Αθ.Παππούλης
- [2] Σημειώσεις Προσομοίωση, Βασίλης Κουϊκόγλου
- [3] Σημειώσεις Στοχαστικών Διαδικασιών,, Ιωάννης Φύλης
- [4] Τεχνικά υλικά (τόμος 1), Αιμ. Γ. Κορωνάιος & Γ. Ι. Πουλάκος
- [5] Kiln Burning Systems, Con. G. Manias
- [6] Εφαρμοσμένη ορυκτολογία – Πετρολογία, Α.Κατερινόπουλος Μ.Σταματάκης
- [7] Κινητική ενυδάτωσης τσιμέντων παραγόμενων σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN-197, Δ. Χ. Τσαματσούλης, Χ. Α. Σταθόπουλος, Λ. Α. Πρελορέντζος
- [8] Φυσικά Χαρακτηριστικά των εδαφών, Ι.Βαρδουλάκης
- [9] Κοκκομετρικό μέγεθος και μορφομετρικά χαρακτηριστικά των κροκάλων της κοίτης του Βοιωτικού Κηφισού, Α.Π.Κορκάνας, Ν.Σ.Κοντόπουλος
- [10] Στοιχεία Μηχανών, G.Niemann (Τόμοι 1&2)

Τεχνικά εγχειρίδια:

- [11] The application of roller presses for high pressure comminution, *H.Gunter, M.Muller, P.Sonntag*
- [12] Economical comminution with high pressure roller presses, *Koppern*
- [13] Hexadur, a novel wear protection of high pressure roller presses for comminution, *M.Scumacher, W.Theisen*
- [14] Design of roller presses, *Hans-George Bergandahl*
- [15] Experience of the high pressure roller press installation at coplay cement's, *G.H.Conroy*
- [16] Study on moveable roller control of the roller press, *F.U.Hua, F.U.Choudong, W.U.Genmao*
- [17] Hydraulic roller press, *FLSmith*
- [18] State of the art in high compression comminution, *F.Feige, Wiesbaden*
- [19] Drive influence of the economy of roller presses, *H.Herchenbach*
- [20] Experience with roller press systems at southern province cement company, *K.Happ*
- [21] Compaction with roller presses, *Koppern*
- [22] Grinding plants, *KHD Humboldt Wedag*
- [23] Better grinding systems, *KHD Humboldt Wedag*
- [24] Trouble – free press, *Theodore Grosse*
- [25] Modernization and production increase with cement kilns, *Claus Bauer*
- [26] The Application of Roller Presses for High Pressure comminution, *H.Gunter, M.Muller, P.Sonntag*
- [27] Πρότυπα τσιμέντου Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος
- [28] *Rotary Kilns*, *KHD Humboldt Wedag*
- [30] *Τεχνικά εγχειρίδια THRAKON*

Ελληνικές και Διεθνείς Ιστοσελίδες:

- www.humboldt-wedag.com (KHD Humboldt Wedag AG)
- www.koeppern.com (Maschinenfabrik Kopperrn GmbH & Co.KC.)
- www.polysius.com (Krupp-Polysius AG)
- www.titan.gr (Ανώνυμος Εταιρεία Παραγωγής Τσιμέντου TITAN)
- www.aget.gr (Όμιλος Εταιρειών ΗΡΑΚΛΗΣ)

www.halyps.gr (Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε.)
www.penta.net (PENTA engineering and technologies for industry)
www.lehighnw.com (LEHIGH Heidelberg cement group)
www.structural.net (STRUCTURAL GROUP)
www.cementamericas.com (Americas Cement)

Τύπος:

Η Καθημερινή (2007), Ανησυχούν για το αύριο οι τσιμεντοβιομήχανοι, Ν.Ρουσάνογλου
Το Βήμα (28/05/2006), Έλλειψη τσιμέντου στην εγχώρια αγορά, Χρ. Κορφιάτης
Το Βήμα (25/06/2006), Τιτάν: Μερίδιο 10% στο έτοιμο σκυρόδεμα, Χρ.Κορφιάτης
Το Βήμα (15/10/2006), Αλβανικό βήμα του Τιτάνος, Χρ.Κορφιάτης
Τα Νέα (25/11/2006), Επόμενος σταθμός τα Τίρανα, Γ.Πουλερές
Το Βήμα (12/06/2005), Νέες εξαγορές προγραμματίζει ο Τιτάν, Β.Κώτσης
Το Βήμα (27/06/2004), Τσιμέντο και χάλυβας, οι μεγάλοι κερδισμένοι της Ολυμπιάδας, Α.Γ.Χριστοδουλάκης
Το Βήμα (16/03/2003), Η ζήτηση τσιμέντου οδηγεί σε αύξηση τιμών, Α.Γ.Χριστοδουλάκης
Το Βήμα (04/05/2002), Ανοιξιάτικες ημέρες στην τσιμεντοβιομηχανία, Α.Γ.Χριστοδουλάκης
Τα Νέα (03/04/1999), Μονάδες στο εξωτερικό αγόρασαν TITAN και AFET, Ν.Κωτσικόπουλος
Τα Νέα (17/07/1999), Τα σχέδια της Blue Circle για την AFET, Γ.Πουλερές