

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
Π.Μ.Σ. «ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ:
ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΑΙ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΑΝΘΡΑΚΑ**

ΙΩΑΝΝΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ

Υπεύθυνος καθηγητής:

ΚΟΥΓΚΟΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Χωρική Ανάλυση και Διαχείριση Περιβάλλοντος» του τμήματος Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Αθανάσιου Κούγκολο. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά ως αρωγό στην προσπάθειά μου για την επιστημονική καθοδήγηση, τη συνεργασία και τη βοήθειά του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη υποστήριξη και την αμέριστη κατανόηση που απλόχερα μου προσέφερε.

Με εκτίμηση,
Ιωάννου Χρυσούλα,
Πολιτικός Μηχανικός

Βόλος 2012

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1.1: Αναπαράσταση καταλύματος διαμέτρου 5,00m πρωτόγονων ανθρώπων (κυνηγοί – τροφοσυλλέκτες πριν από 15.000 χρόνια). Η δόμηση έγινε με οστά μαμούθ (άνω) που υπέστησαν ελαφρά κατεργασία. Ο σκελετός αυτός καλύφθηκε με χόρτα και δέρματα ζώων (κάτω) για να εμποδιστεί η είσοδος της βροχής και να διατηρηθεί η κατάλληλη θερμοκρασία στο εσωτερικό σελ. 11
- Εικόνα 1.2: Η είσοδος στην ακρόπολη των Μυκηνών. Τοίχος ηλικίας άνω των 3.500 ετών με ημικατεργασμένους ογκόλιθους σελ. 12
- Εικόνα 1.3: Λίθινα υδραγωγεία που γεφυρώνουν κοιλάδες και ποταμούς, που χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα. Ρωμαϊκό υδραγωγείο στη Γαλλία 2.000 ετών σελ. 12
- Εικόνα 1.4: Κατανομή των ελληνικών εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου σελ. 15
- Εικόνα 2.1: Συσκευή ποιοτικού ελέγχου αντοχής σε κάμψη δοκιμίων σελ. 31
- Εικόνα 2.2: Συσκευή ποιοτικού ελέγχου αντοχής σε θλίψης δοκιμίων σελ. 32
- Εικόνα 2.3: Συσκευή Vicat, προσδιορισμού του χρόνου πήξης του τσιμέντου σελ. 32
- Εικόνα 2.4: Συσκευή Le Chatellier για τον προσδιορισμό της ογκοσταθερότητας του τσιμέντου σελ. 33
- Εικόνα 2.5: Συσκευή Blaine για τον προσδιορισμό της λεπτότητας του τσιμέντου σελ. 33
- Εικόνα 2.6: Σφαιρίδια (pellets) μεγέθους 10,00–25,00mm του κλίνκερ τσιμέντου. Προϊόν της διεργασίας της έψησης στην περιστροφική κάμινο. σελ. 37
- Εικόνα 2.7: Απλοποιημένη απεικόνιση περιστροφικής καμίνου σελ. 39
- Εικόνα 2.8: Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη διάταξη της περιστροφικής καμίνου για την παραγωγή του κλίνκερ σελ. 40
- Εικόνα 2.9: Διάταξη ξηρής μεθόδου παραγωγής κλίνκερ με προθέρμανση της τροφοδοσίας και πύρωση του ασβεστολίθου (preheater / precalciner) σελ. 41
- Εικόνα 2.10: Διάταξη ψύξης κλίνκερ στην έξοδο καμίνου σελ. 42
- Εικόνα 2.11: Συμβατική διάταξη άλεσης κλίνκερ για παραγωγή τσιμέντου σελ. 42
- Εικόνα 2.12: Κόκκος τσιμέντου στον οποίο εμφανίζονται οι διάφορες φάσεις του κλίνκερ που ενυδατώνονται σελ. 44

Εικόνα 3.1: Είδη αδρανών υλικών για την παρασκευή σκυροδέματος (άμμος – γαρμπίλι - χαλίκι)	σελ. 48
Εικόνα 3.2: Αλληλουχία φάσεων διαδικασίας εξόρυξης και παραγωγής αδρανών υλικών.	σελ. 48
Εικόνα 3.3: Παράδειγμα λειτουργίας μηχανήματος επιφανειακής εξόρυξης για την παραγωγή αδρανών υλικών.	σελ. 49
Εικόνα 3.4: Συσκευή Los Angeles για τον προσδιορισμό των αντοχών σε τριβή και κρούση των αδρανών υλικών	σελ. 53
Εικόνα 3.5: Δοκιμή ισοδύναμου άμμου	σελ. 53
Εικόνα 3.6: Δειγματοληψία αδρανών υλικών με τη μέθοδο του τεταρτομερισμού (Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών υλικών).	σελ. 54
Εικόνα 3.7: Συσκευή κοσκινίσματος αδρανών υλικών	σελ. 55
Εικόνα 4.1: Αυτοτελείς διεργασίες (υγρή – ξηρή) παρασκευής σκυροδέματος	σελ. 64
Εικόνα 4.2: Εξαρτήματα δοκιμή κάθισης. Περιπτώσεις αποτελεσμάτων δοκιμής κάθισης νωπού σκυροδέματος	σελ. 69
Εικόνα 4.3: Διάταξη δοκιμής εξάπλωσης νωπού σκυροδέματος	σελ. 70
Εικόνα 4.4: Διάγραμμα συσκευής μέτρησης για τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης για τον προσδιορισμό του περιεχόμενου αέρα του νωπού σκυροδέματος	σελ. 71
Εικόνα 6.1: Ο κύκλος του άνθρακα	σελ. 85
Εικόνα 8.1: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας επεξεργασίας απορριμμάτων κατεδαφίσεων. Όπου, 1: τμήμα τροφοδοσίας, 2: παράκαμψη λεπτόκοκκων υλικών, 3: θραυστήρες, 4: προστατευτικό χώρισμα, 5: μεταφορική ταινία, 6: μαγνητικός διαχωριστής, 7: κινητήρας, 8: δεξαμενή καυσίμων	σελ. 124

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Ετήσια παραγωγική ικανότητα ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	σελ. 15
Σχήμα 1.2: Ετήσια ελληνική παραγωγή τσιμέντου, 2007: περίπου 15.331.000 τόνοι	σελ. 16
Σχήμα 1.3: Εξέλιξη πωλήσεων του παραγόμενου τσιμέντου στην Ελλάδα	σελ. 16
Σχήμα 1.4: Κύριες χώρες προορισμού του παραγόμενου ελληνικού τσιμέντου	σελ. 16
Σχήμα 2.1: Συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου	σελ. 23
Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής επιμέρους διεργασιών διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου	σελ. 35
Σχήμα 2.3: Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων στην παραγωγή 1 kg τσιμέντου	σελ. 36
Σχήμα 4.1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 31,50mm	σελ. 62
Σχήμα 5.1: Παρουσίαση συνόλου εκπομπών CO ₂ (kg) από κάθε ενέργεια για την παραγωγή 1kg	σελ. 79
Σχήμα 5.2: Παρουσίαση συνόλου εκπομπών CO ₂ (kg) από κάθε ενέργεια για την παραγωγή 1m ³	σελ. 79
Σχήμα 5.3: Παρουσίαση συνόλου μικτών άμεσων εκπομπών CO ₂ (εκατ. τόνοι CO ₂ /έτος), των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	σελ. 80
Σχήμα 5.4: Παρουσίαση ειδικών μικτών άμεσων εκπομπών CO ₂ (CO ₂ kg/τόνο προϊόντος), των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	σελ. 80
Σχήμα 5.5: Παρουσίαση ειδικών μικτών άμεσων εκπομπών CO ₂ (CO ₂ kg/τόνο κλίνκερ), των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	σελ. 81
Σχήμα 5.6: Παρουσίαση εκπομπών σκόνης (gr σκόνης/τόνο κλίνκερ), των εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	σελ. 82
Σχήμα 5.7: Παρουσίαση ειδικών εκπομπών NO _x (gr NO _x / τόνο κλίνκερ) των εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	σελ. 82
Σχήμα 5.8: Παρουσίαση των ειδικών εκπομπών SO _x , (gr SO _x / τόνο κλίνκερ) των εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	σελ. 83

- Σχήμα 6.1: Ενσωματωμένη ενέργεια υλικών κατασκευής τυπικού διώροφου κτιρίου
σελ. 84
- Σχήμα 6.2: Διαχρονική μείωση του Παράγοντα Εκπομπών (Emission Factor) σελ. 84
- Σχήμα 6.2: Κατανάλωση και ποσοστιαία κατανομή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην παραγωγή τσιμέντου
σελ. 90
- Σχήμα 6.3: Διάγραμμα ροής διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου
σελ. 93
- Σχήμα 6.4: Διάγραμμα ροής παραγωγής 1 m³ σκυροδέματος
σελ. 94
- Σχήμα 6.5: Συνολική κατανάλωση θερμικής ενέργειας (TJ) και ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας (MJ/t κλίνκερ) για την παραγωγή κλίνκερ και τσιμέντου, των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου και των λατομείων, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας
σελ. 96
- Σχήμα 6.6: Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (TJ) και ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (MJ/t κλίνκερ) για την παραγωγή κλίνκερ και τσιμέντου, των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου και των λατομείων, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας
σελ. 96
- Σχήμα 6.7: Συνολική κατανάλωση νερού (λίτρα νερού/t τσιμέντου) των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας
σελ. 97
- Σχήμα 7.1 Κύκλος Ζωής το Σκυροδέματος στην Κατασκευαστική Βιομηχανία
σελ. 100
- Σχήμα 7.2 Ενσωματωμένη Ενέργεια του Σκυροδέματος
σελ. 101
- Σχήμα 8.1: Διάγραμμα ροής υλικών, διεργασιών και παραγωγής απορριμμάτων στη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου
σελ. 104
- Σχήμα 8.1: Δραστηριότητες που συναντώνται σε εργοτάξια κατασκευών και ανακαινίσεων
σελ. 110
- Σχήμα 8.2: Διάγραμμα μέσης ποσοστιαίας σύστασης των απορριμμάτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων
σελ. 115
- Σχήμα 8.3: Διάγραμμα ροής διαχείρισης απορριμμάτων κατεδάφισης τεχνικών έργων.
σελ. 123
- Σχήμα 8.4: Διάγραμμα ροής για την παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών από μπάζα σκυροδέματος, το οποίο δεν περιέχει ξένες προσμίξεις. Κλειστό σύστημα σελ. 128
- Σχήμα 8.5: Διάγραμμα ροής για την παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών από μπάζα σκυροδέματος, το οποίο δεν περιέχει ξένες προσμίξεις. Ανοιχτό σύστημα. σελ. 128

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Τύποι τσιμέντου και σύνθεση τους σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN197 – 1	σελ. 21
Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές, οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές	σελ. 22
Πίνακας 2.3: Ενδεικτική σύνθεση (χημική σύσταση %) τριών πρώτων υλών, 1, 2, 3, για την παραγωγή τσιμέντου	σελ. 37
Πίνακας 2.4: Είδος και θερμογόνος δύναμη καυσίμων τσιμεντοβιομηχανίας	σελ. 43
Πίνακας 3.1: Ισχύς λατομικού εξοπλισμού για την παραγωγή αδρανών υλικών	σελ. 49
Πίνακας 4.1: Κατηγορίες σκυροδέματος σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ. '97	σελ. 64
Πίνακας 4.2: Κατηγορίες καθίσεως σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ. '97	σελ. 65
Πίνακας 4.3: Απαιτήσεις για τα σκυροδέματα σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ. '97	σελ. 66
Πίνακας 5.1: Ορισμοί του αποτυπώματος άνθρακα	σελ. 79
Πίνακας 6.1: Διαχρονική εξέλιξη εκπομπών CO ₂	σελ. 87
Πίνακας 6.2: Συντελεστές εκπομπών CO ₂ (kg/ kWh) ανά είδος καυσίμου	σελ. 87
Πίνακας 6.3: Κυριότερα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου	σελ. 89
Πίνακας 7.1. Συμβολή του Σκυροδέματος στη Αειφόρο Ανάπτυξη	σελ. 102
Πίνακας 8.1: Κυριότερα παραγόμενα απορρίμματα από τα τρία βασικά στάδια κατά τον κύκλο ζωής ενός κτιρίου	σελ. 105
Πίνακα 8.2: Ταξινόμηση των κατασκευαστικών αποβλήτων ανάλογα με την προέλευσή τους	σελ. 116
Πίνακας 8.3: Τυπικές δυνατότητες επεξεργασίας και ανακύκλωσης ΑΚΚ.	σελ. 121

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.

8. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Ιστορική αναδρομή των δομικών υλικών.....	10
1.2 Το σκυρόδεμα.....	12
1.3 Η ελληνική εμπορική αγορά του σκυροδέματος.....	13
2. ΤΣΙΜΕΝΤΟ.....	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Αναφορά στα πρότυπα τσιμέντου.....	18
2.3 Τύποι και κατηγορίες τσιμέντων.....	19
2.3.1 Βάσει του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197 – 1.....	19
2.3.2 Βάσει της θλιπτικής αντοχής.....	21
2.3.2.1 Κύρια συστατικά τσιμέντου.....	22
2.3.2.2 Δευτερεύοντα συστατικά τσιμέντου.....	25
2.3.3 Βάσει του αμερικανικού προτύπου ASTM.....	26
2.4 Ιδιότητες τσιμέντου.....	27
2.4.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες του τσιμέντου.....	27
2.4.2 Η αντοχή του τσιμέντου.....	28
2.5 Έλεγχος της ποιότητας του τσιμέντου.....	30
2.6 Διαδικασία παραγωγής τσιμέντου.....	33
2.6.1 Πρώτες ύλες τσιμέντου.....	35
2.6.2 Προσδιορισμός της σύνθεσης του φορτίου, ανάμιξη (ομογενοποίηση) και ελάττωση μεγέθους (θραύση, λειοτρίβηση των πρώτων υλών).....	36
2.6.3 Οι περιστροφικές κάμινι.....	38
2.6.4 Μέθοδος παραγωγής τσιμέντου.....	39
2.6.4.1 Η ψύξη του κλίνκερ.....	40
2.6.4.2 Η άλεση του κλίνκερ.....	41
2.6.5 Καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία.....	42
2.6.6 Η ενυδάτωση του τσιμέντου.....	43
2.6.7 Συντήρηση τσιμέντου.....	44
3. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ.....	45
3.1 Εισαγωγή.....	45
3.2 Είδη – τύποι αδρανών υλικών.....	45
3.3 Αδρανή σκυροδέματος.....	47
3.4 Διαδικασία παραγωγής των αδρανών υλικών.....	47
3.5 Ιδιότητες αδρανών υλικών.....	48
3.5.1 Μορφή κόκκων των αδρανών υλικών.....	49
3.5.2 Καθαρότητα – Περιεκτικότητα σε επιβλαβείς προσμίξεις.....	49
3.5.3 Περιεχόμενη υγρασία αδρανών υλικών.....	50
3.5.4 Χημική συμπεριφορά.....	50
3.6 Ποιοτικός έλεγχος αδρανών υλικών.....	51
4. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	56
4.1 Εισαγωγή.....	56
4.2 Παραγωγή σκυροδέματος.....	57
4.2.1 Το νερό ανάμιξης.....	57
4.2.2 Βελτιωτικά (χημικά) πρόσμικτα.....	58
4.2.3 Πρόσθετα συστατικά.....	60
4.3 Σύνθεση σκυροδέματος – Αναλογία ανάμιξης των υλικών.....	60
4.4 Διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος.....	62
4.5 Είδη – Κατηγορίες σκυροδέματος.....	63
4.6 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος – Ποιοτικός έλεγχος.....	66

4.6.1 Ο λόγος νερού/τσιμέντου.....	66
4.6.2 Η εργασιμότητα.....	66
4.6.3 Η φαινόμενη πυκνότητα.....	67
4.6.4 Η πυκνότητα.....	67
4.6.5 Ο περιεχόμενος αέρας.....	67
4.6.6 Η συνοχή.....	67
4.6.7 Έλεγχος ιδιοτήτων νωπού σκυροδέματος.....	67
4.7 Μεταφορά – Συμπύκνωση – Συντήρηση σκυροδέματος.....	70
5. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	72
5.1 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.....	75
5.2 Αποτύπωμα άνθρακα.....	77
5.3 Παράδειγμα εκπομπής ρύπων μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας.....	78
5.3.1 Εκπομπές CO ₂	78
5.3.2 Εκπομπές σκόνης.....	81
5.3.3 Εκπομπές NO _x	82
5.3.4 Εκπομπές SO _x	82
6. ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	84
6.1 Εισαγωγή.....	84
6.2 Προβλήματα που συνδέονται με την ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών.....	85
6.2.1 Το πρόβλημα του πλεονάσματος θερμότητας.....	85
6.2.2 Το πρόβλημα του CO ₂	85
6.2.3 Φαινόμενο του θερμοκηπίου και κλιματικές αλλαγές.....	89
6.3 Ενσωματωμένη ενέργεια στην παραγωγή τσιμέντου.....	90
6.4 Παράδειγμα ενεργειακών καταναλώσεων μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας.....	95
6.4.1 Κατανάλωση θερμικής ενέργειας.....	95
6.4.2 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.....	96
6.4.3 Κατανάλωση νερού.....	97
7. ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	98
7.1 Ανθεκτικότητα σκυροδέματος.....	98
7.2 Περιβάλλον έκθεσης σκυροδέματος.....	99
7.3 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κατασκευαστικής βιομηχανίας του σκυροδέματος.....	100
8. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	104
8.1 Εισαγωγή.....	104
8.2 Νομοθεσία για τα στερεά απόβλητα.....	106
8.3 Κατασκευή και κατεδάφιση.....	107
8.4 Διαχείριση απορριμμάτων κατεδάφισης.....	115
8.5 Μονάδες ανακύκλωσης σκυροδέματος.....	125
8.5.1 Αυτοφερόμενα συγκροτήματα ανακύκλωσης.....	126
8.5.2 Μόνιμα συγκροτήματα ανακύκλωσης.....	126
8.5.3 Εγκαταστάσεις παραγωγής ανακυκλωμένων αδρανών.....	127
8.5.4 Ταξινόμηση συσκευών στη διαδικασία της ανακύκλωσης.....	131
8.5.5 Διαδικασία παραγωγής.....	133
8.5.6 Οικονομική θεώρηση.....	135
8.6. Στόχοι για την βελτίωση του σκυροδέματος ως υλικού.....	135
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	138
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	140

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως δομικά υλικά χαρακτηρίζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση και απόδοση αισθητικών και μορφολογικών επιλογών πάσης φύσεως τεχνικών έργων (Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, 1999).

Στην ομάδα των δομικών υλικών περιλαμβάνονται υλικά που χρησιμοποιούνται από αρχαιοτάτων χρόνων, όπως η πέτρα, ο πηλός και το ξύλο, αλλά και νέα υλικά, όπως τα μέταλλα, το τσιμέντο και τα πλαστικά. Ως δομικά υλικά χαρακτηρίζονται επίσης και διάφορα βιομηχανοποιημένα δομικά στοιχεία, που αντί να κατασκευάζονται επί τόπου από συνεργεία εργατών και τεχνητών (εργοτάξιο) χρησιμοποιώντας τα βασικά δομικά υλικά, κατασκευάζονται αρχικά σε εργοστάσια και ενσωματώνονται στο έργο, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Τέτοια προκατασκευασμένα στοιχεία είναι τοίχοι διαφόρων ειδών, δοκοί και πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα, ξύλινες ή μεταλλικές πόρτες και παράθυρα κ.λ.π. (Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, 1999, Λεγάκης, 1997).

1.1 Ιστορική αναδρομή των δομικών υλικών

Οι πρώτοι άνθρωποι που οργανώθηκαν στις αρχικές μορφές κοινωνικών ομάδων, άρχισαν περίπου πριν από 10.000 χρόνια, να χρησιμοποιούν διάφορα υλικά με τα οποία κατασκεύαζαν υποτυπώδη καταφύγια για να προστατευτούν από φυσικά φαινόμενα, διάφορες εξωτερικές επιδράσεις, επιθέσεις άγριων ζώων και εχθρών τους. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των πρώτων τεχνικών έργων, ήταν αρχικά οστά και δέρματα των ζώων, ξύλα και ελαφρότερα φυτικά προϊόντα (Εικόνα 1.1) και μετέπειτα φυσικοί λίθοι όπως βρίσκονταν στη φύση. Με την κατασκευή εργαλείων από μέταλλο άρχισε και η επεξεργασία των πρώτων δομικών υλικών, με αποτέλεσμα την κατασκευή καλύτερων έργων (Λεγάκης, 1997).



Εικόνα 1.1: Αναπαράσταση καταλύματος διαμέτρου 5 m πρωτόγονων ανθρώπων (κυνηγοί – τροφосуλλέκτες πριν από 15.000 χρόνια). Η δόμηση έγινε με οστά μαμούθ (άνω) που υπέστησαν ελαφρά κατεργασία. Ο σκελετός αυτός καλύφθηκε με χόρτα και δέρματα ζώων (κάτω) για να εμποδιστεί η είσοδος της βροχής και να διατηρηθεί η κατάλληλη θερμοκρασία στο εσωτερικό (Λεγάκης, 1997).

Ο λίθος αποτέλεσε το κυριότερο δομικό υλικό για χιλιάδες χρόνια, λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων του και κυρίως λόγω της μεγάλης αντοχής του στο χρόνο. Μέχρι σήμερα σώζονται λίθινες κατασκευές μεγάλης τεχνικής τελειότητας, όπως γέφυρες, τείχη φρουρίων και ακροπόλεων, λίθινοι πύργοι, ναοί κ.α., ηλικίας χιλιάδων ετών προκαλώντας το θαυμασμό του σύγχρονου ανθρώπου (Εικόνα 1.2, 1.3) (Λεγάκης, 1997).



Εικόνα 1.2: Η είσοδος στην ακρόπολη των Μυκηνών. Τοίχος ηλικίας άνω των 3.500 ετών με ημικατεργασμένους ογκόλιθους (Λεγάκης, 1997).



Εικόνα 1.3: Λίθινα υδραγωγεία που γεφυρώνουν κοιλάδες και ποταμούς, που χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα. Ρωμαϊκό υδραγωγείο στη Γαλλία 2.000 ετών (Λεγάκης, 1997).

Το ξύλο αποτελεί επίσης ένα από τα πρώτα δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή καταλυμάτων, οχυρώσεων οικισμών και ακροπόλεων, στεγών, γεφυρών κ.ά.. Όμως ελάχιστες ξύλινες κατασκευές διατηρήθηκαν μέχρι και σήμερα, λόγω της μικρής αντοχής του ξύλου στις εξωτερικές επιδράσεις και κατά συνέπεια της μικρής διάρκειας της ζωής του.

Ως δομικό υλικό χρησιμοποιήθηκε επίσης από την αρχαιότητα και το χώμα που περιέχει άργιλο, ο πηλός δηλαδή. Η αρχική του χρήση ήταν υπό μορφή κονιάματος (λάσπη) για την πλήρωση των κενών που υπήρχαν σε κατασκευές από ακατέργαστους λίθους ή ξύλα. Αργότερα ο πηλός, με κατάλληλη επεξεργασία βελτιώθηκε ποιοτικά και υπό μορφή πρίσματος, ως ωμή πλίνθος (πλίθρα), αποτέλεσε για πολλούς αιώνες το σπουδαιότερο δομικό υλικό, ιδίως όπου σπάνιζαν οι λίθοι. Επίσης, με το ψήσιμο του πηλού κατέστη δυνατή η παρασκευή υλικών ανώτερης ποιότητας, τα οποία μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Τα υλικά αυτά ονομάζονται κεραμικά υλικά και χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών αποτελούν οι οπτόπλινθοι (τούβλα), τα κεραμίδια και οι κεραμικές πλάκες (Λεγάκης, 1997).

Ως τα μέσα του 19ου αιώνα, οι λίθοι, τα ξύλα και τα κεραμικά υλικά αποτέλεσαν τα βασικά δομικά υλικά. Η σύγχρονη εξέλιξη των δομικών υλικών άρχισε στις αρχές και τα μέσα του αιώνα αυτού, με χαρακτηριστικές ημερομηνίες τα έτη 1824 και 1867. Κατά το έτος 1824, ένας Βρετανός κτίστης, ο Joseph Aspdin, παρασκευάζει και κατοχυρώνει με ευρεσιτεχνία το πρώτο τσιμέντο Portland, με καμίνευση ασβεστόλιθου και αργίλου λεπτής άλεσης. Το τήγμα, το οποίο στη συνέχεια αλέθεται, ονομάστηκε τσιμέντο Portland λόγω της ομοιότητας του με τους υψηλής ποιότητας λίθους που εξορυσσόταν στην περιοχή Portland της Αγγλίας. Ενώ, κατά το έτος 1867, ένας Γάλλος κηπουρός, ο Z. Monier, εισάγει την ιδέα του οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς γέμιζε με πλέγμα από βέργες σιδήρου και μπετόν, μεγάλες γλάστρες με σκοπό να τις σταθεροποιήσει στους δυνατούς ανέμους.

Τα χρόνια που ακολουθούν, λόγω της ανακαλύψεως νέων πηγών ενέργειας (κάρβουνο – ατμός, ηλεκτρική ενέργεια, πετρέλαιο), εμφανίζονται νέα δομικά υλικά με σαφώς καλύτερες ιδιότητες, υλικά σύνθετα τα οποία έδιναν τη δυνατότητα

κατασκευής τεχνικών έργων, που με τα αρχικά υλικά ήταν αδύνατο να επιτευχθούν και εντελώς συνθετικά υλικά με ιδιότητες πρωτόγνωρες.

Στις μέρες μας, για την κατασκευή τεχνικών έργων εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται τόσο τα παλαιότερα δομικά υλικά, όσο και τα πιο σύγχρονα. Επίσης, η δυνατότητα συνδυασμού των υλικών αυτών, οδηγεί στη δημιουργία πλήθους νέων υλικών με πολλές δυνατότητες χρήσεων, ο αριθμός των οποίων συνεχώς πολλαπλασιάζεται.

Στην Ελλάδα, τα τελευταία έτη, οι βασικοί βιομηχανικοί κλάδοι δομικών υλικών με βάση το συνολικό κύκλο εργασιών τους, είναι αυτοί του χάλυβα – σιδήρου, του αλουμινίου, του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Εξίσου σημαντικοί βιομηχανικοί κλάδοι, με χαμηλότερο όμως κύκλο εργασιών, είναι αυτοί της κεραμοποιίας, των χρωμάτων, παραγωγής άσβεστου, έτοιμων κονιαμάτων, πυρίμαχων και μη πυρίμαχων κεραμικών προϊόντων, δομικών προϊόντων από σκυρόδεμα, δομικών προϊόντων από γύψο, θερμομονωτικών προϊόντων, κοπής και διαμόρφωσης λίθων, ξυλουργικών προϊόντων για οικοδομική χρήση, υαλοπινάκων και τέλος οι κλάδοι εξορυκτικών και λατομικών δραστηριοτήτων (δηλαδή, λατομεία μαρμάρων, λίθων, σκύρων, άμμου, ασβέστη, γύψου).

1.2 Το σκυρόδεμα

Στην Ελλάδα οι περισσότερες κτιριακές κατασκευές κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, καθώς πρόκειται για το πλέον διαδεδομένο υλικό κατασκευής στατικών φορέων, κτιρίων, γεφυρών, σηράγγων κ.λπ. του τελευταίου αιώνα. Το σκυρόδεμα είναι ένα δομικό υλικό, που προκύπτει από την απλή ανάμιξη τσιμέντου, νερού και αδρανών υλικών. Αν και όλες σχεδόν οι κατασκευές, στις οποίες χρησιμοποιείται το σκυρόδεμα, είναι δυνατόν να υλοποιηθούν και από κάποιο άλλο υλικό (όπως για παράδειγμα φυσικές ή τεχνητές πέτρες, ξύλο και μέταλλα) αποτελεί κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή τεχνικών έργων, γεγονός που οφείλεται κυρίως στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, όπως:

- Αποτελεί οικονομικό υλικό.
- Είναι δυνατόν να λάβει οποιοδήποτε σχήμα απαιτείται σε κάθε περίπτωση, με σχετικά μικρή δαπάνη σε εργατικά.
- Είναι δυνατόν να παρασκευασθεί στον τόπο όπου κατασκευάζεται το έργο.
- Μεταφέρεται και διαστρώνεται εύκολα.
- Συνδυάζει σε κάποιο βαθμό τις ιδιότητες της πέτρας με τις ιδιότητες του ξύλου και του μετάλλου.
- Δε φθείρεται εύκολα, ούτε γερνά και δεν χρειάζεται συντήρηση.
- Λόγω των μηχανικών αντοχών που αναπτύσσονται, μεταφέρονται τάσεις με χαμηλό κόστος.
- Συγκρατεί το νερό σε διαφράγματα μεγάλων παχών.
- Εξελίσσεται και μπορεί να ανταποκρίνεται στις αυξανόμενες τεχνολογικές απαιτήσεις των κατασκευών.

Το σκυρόδεμα όμως, παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το σχετικά μεγάλο βάρος του, την χαμηλή εφελκυστική αντοχή, την ψαθυρότητα και την

αδυναμία κατασκευής στοιχείων πολύ μικρών διαστάσεων, τα οποία όμως είναι ασήμαντα μπροστά στα πλεονεκτήματα που εμφανίζει.

1.3 Η ελληνική εμπορική αγορά του σκυροδέματος

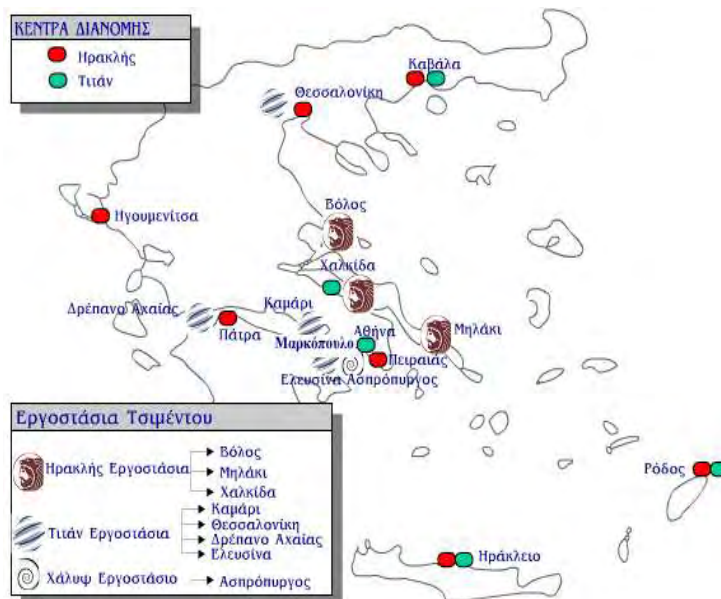
Η πρώτη βιομηχανική ανάπτυξη ξεκινά στην Ελλάδα τα μέσα του 19ου αιώνα, συγχρόνως με εντατικές έρευνες του υπεδάφους και συστηματικές προσπάθειες εκμετάλλευσης του ορυκτού πλούτου. Οι πρώτοι Έλληνες βιομήχανοι ήταν έμποροι, με εμπορικά κεφάλαια στήθηκε η ελληνική βιομηχανία.

Μία από τις μεγαλύτερες μορφές της ελληνικής βιομηχανίας, ο Νικόλαος Κανελλόπουλος, το κεντρικό πρόσωπο του «κύκλου της Ζυρίχης», επιστημόνων αποφοίτων του Πολυτεχνείου της Ζυρίχης, πρωτοστάτησε στην ίδρυση ή/και στην διεύθυνση πολλών εταιρειών. Μία από αυτές ήταν η «Χατζηκυριάκος, Ζαχαρίου & Σία» (1902), η οποία το 1911 εξελίχθηκε στην Α.Ε. Τσιμέντων 'ΤΙΤΑΝ', την πρώτη ελληνική βιομηχανία δομικών υλικών. Ο Ανδρέας Χατζηκυριάκος ήταν από τους γνώστες του τσιμέντου, έχοντας εργασθεί σε εργοστάσιο τσιμέντων στην Ελβετία και στην Ισπανία, πριν επιστρέψει στην Ελλάδα. Ο ίδιος ανέλαβε το 1917 τη διεύθυνση της δεύτερης τσιμεντοβιομηχανίας, η οποία ιδρύθηκε στην Ελλάδα το 1911, της Ανωνύμου Γενικής Εταιρίας Τσιμέντων 'ΗΡΑΚΛΗΣ'.

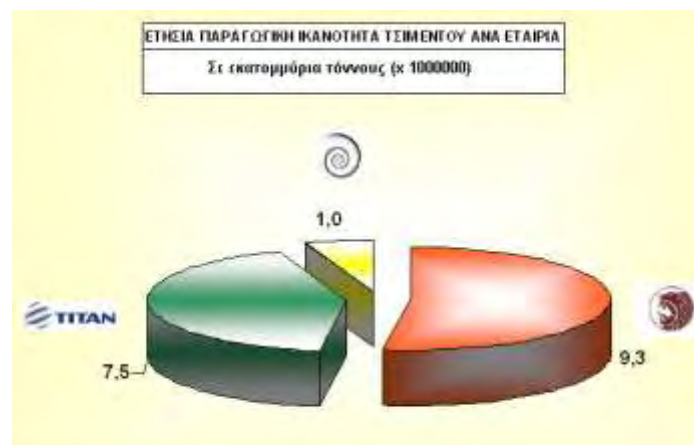
Στη συνέχεια, το 1926 ιδρύεται η εταιρία 'ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ Α.Ε.', ενώ το 1934, πραγματοποιείται η πρώτη ίδρυση της εταιρίας με την επωνυμία 'Σ. ΚΟΤΣΙΡΑΣ & ΣΙΑ Ε.Π.Ε.', η οποία επανιδρύεται το έτος 1943 με την επωνυμία 'ΕΤΑΙΡΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΧΑΛΥΨ Α.Ε.'. Τέλος, το 2001 πραγματοποιείται η συγχώνευση των εταιριών Α.Γ.Ε.Τ. 'ΗΡΑΚΛΗΣ' και 'ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ Α.Ε.' (<http://www.hcia.gr>).

Η παρούσα κατάσταση της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας απαρτίζεται από οκτώ εργοστάσια τσιμέντου στην Ελλάδα και ακόμη επτά εργοστάσια της εταιρίας Α.Ε. 'ΤΙΤΑΝ' σε χώρες του εξωτερικού. Η κατανομή των εργοστασίων έχει ως εξής:

- Α.Ε. 'ΤΙΤΑΝ': στην Ελλάδα, τέσσερα εργοστάσια στις περιοχές: Ελευσίνα, Καμάρι Βοιωτίας, Θεσσαλονίκη, Δρέπανο Αχαΐας. Στο εξωτερικό, δύο εργοστάσια στις Η.Π.Α., δύο εργοστάσια στην Αίγυπτο και από ένα εργοστάσιο σε Σκόπια, Βουλγαρία και Σερβία.
- Α.Γ.Ε.Τ. 'ΗΡΑΚΛΗΣ' (Lafarge Group): τρία εργοστάσια στην Ελλάδα, στις περιοχές Χαλκίδα, Βόλος και Μηλάκι Αλιβερίου.
- Τσιμέντα 'ΧΑΛΥΨ' (Italcementi Group): ένα εργοστάσιο στην Ελλάδα στην περιοχή του Ασπρόπυργου.

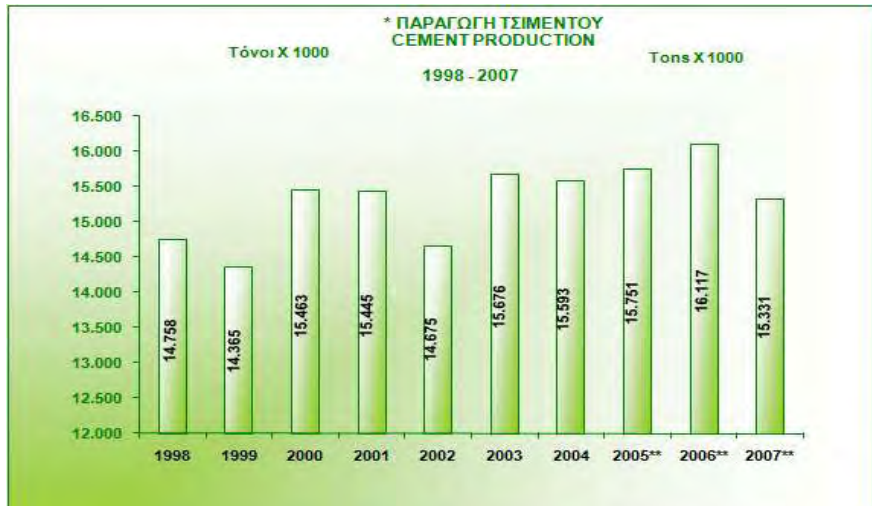


Εικόνα 1.4: Κατανομή των ελληνικών εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου (<http://www.hcia.gr>).

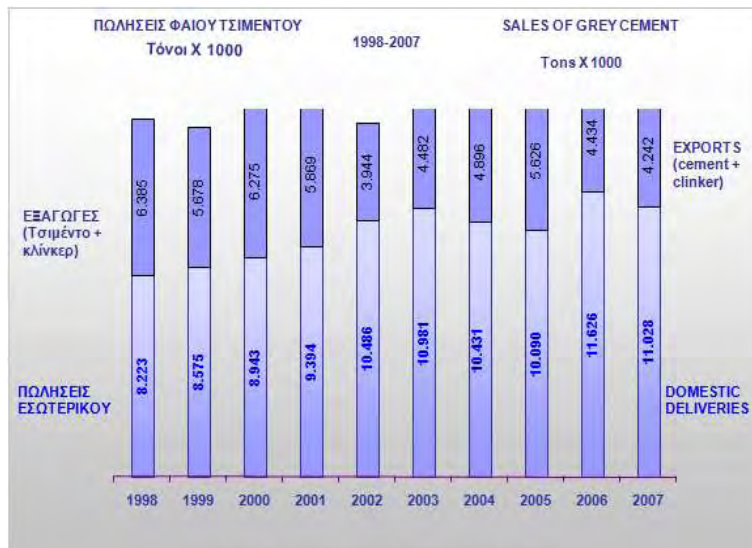


Σχήμα 1.1: Ετήσια παραγωγική ικανότητα ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας για το 2010 (<http://www.hcia.gr>, ίδια επεξεργασία).

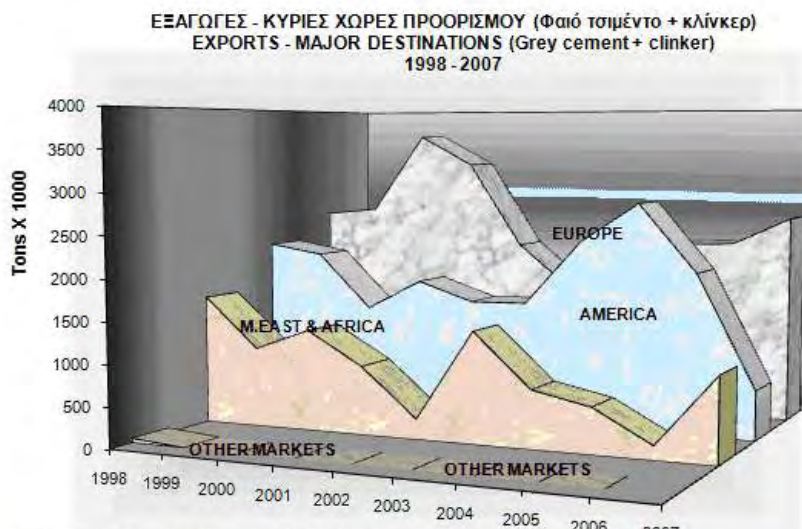
Η ετήσια παραγωγή της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας ανήλθε το 2006 σε 16,10 εκατ. τόνους τσιμέντου. Το 35,80 % της παραγωγής (5,77 εκατ. τόνοι) εξάγεται σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στις Η.Π.Α. και τις χώρες της Μέσης Ανατολής και της Αφρικής, ενώ το 64,20 % (10,35 εκατ. τόνοι) διατίθεται στην ελληνική αγορά. Από το διατιθέμενο τσιμέντο στην ελληνική αγορά (Ι.Ο.Β.Ε, Ινστιτούτο Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών), ποσοστό 70,00 % (7,25 εκατ. τόνοι περίπου) διατίθεται χύμα και 30,00 % (3,10 εκατ. τόνοι περίπου τσιμέντου στην ελληνική αγορά απορροφάται από τις εταιρείες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος) ενσакκισμένο. Το 80,00 % (5,80 εκατ. τόνοι περίπου) του διατιθέμενου «χύμα» και κονιαμάτων, το 12,00 – 15,00 % από τις κατασκευαστικές εταιρείες και το 5,00 – 8,0 0% από τις μονάδες παραγωγής προϊόντων τσιμέντου.



Σχήμα 1.2: Ετήσια ελληνική παραγωγή τσιμέντου, 2007: περίπου 15.331.000 τόνοι (<http://www.hcia.gr>, ίδια επεξεργασία).



Σχήμα 1.3: Εξέλιξη πωλήσεων του παραγόμενου τσιμέντου στην Ελλάδα (<http://www.hcia.gr>).



Σχήμα 1.4: Κύριες χώρες προορισμού του παραγόμενου ελληνικού τσιμέντου (<http://www.hcia.gr>).

2. ΤΣΙΜΕΝΤΟ.

2.1 Εισαγωγή.

Ο όρος τσιμέντο (cement) χρησιμοποιήθηκε αρχικά κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους και στις αρχές του Μεσαίωνα. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζονταν υλικά με συνδετικές ιδιότητες και κυρίως κονιάματα ή μίγματα ασβέστου, ποζολάνης, νερού κ.λπ., που χρησιμοποιούσαν οι τότε κατασκευαστές για να συνδέσουν τους λίθους στις κατασκευές τους. Η κονία που αποκτούσε συνδετικές ιδιότητες κάτω από την επίδραση του νερού, ονομαζόταν υδραυλικό τσιμέντο.

Το 1850 ιδρύεται το πρώτο εργοστάσιο τσιμέντου στη Γαλλία, στη Γερμανία το 1855, στην Αμερική το 1875 και στην Ελλάδα το 1902. Τον 20ο αιώνα ήταν ραγδαίες οι εξελίξεις τόσο στις μεθόδους παρασκευής του τσιμέντου, όσο και στη χρησιμοποίησή του για πρωτοποριακά έργα. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα σε θέματα τσιμέντου και σκυροδέματος προχωρά με ασύλληπτους ρυθμούς, ενώ μεγάλη προσοχή έχει δοθεί παγκοσμίως στην προσθήκη βιομηχανικών παραπροϊόντων σε διάφορους τύπους τσιμέντου, στην ταυτοποίηση και αποκατάσταση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε ιστορικά κτίσματα, καθώς και στην προτυποποίηση του τσιμέντου και του σκυροδέματος (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

Ο όρος τσιμέντο χρησιμοποιείται πλέον για να περιγράψει την τεχνητή λεπτόκοκκη κονία, η οποία παρασκευάζεται με λεπτή άλεση του κλίνκερ. Ως κλίνκερ ονομάζεται διεθνώς το προϊόν που προκύπτει από την όπτηση μίγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων. Το τσιμέντο όταν αναμιχθεί με νερό, πήζει και σκληραίνει τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Μετά την σκλήρυνση δεν διαλύεται στο νερό. Έχει ευρεία χρήση στις δομικές κατασκευές και στα υδραυλικά έργα, καθώς συνδυάζει μεγάλη υδραυλική ικανότητα και υψηλές αντοχές (Κορωναίος και Πουλάκος, 2006).

Η ευρύτατη χρήση του τσιμέντου ως βασικού δομικού υλικού στις διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές του σύγχρονου πολιτισμού (ανέγερση κτιρίων, κατασκευή γεφυρών και φραγμάτων κ.α.), έχει προκαλέσει αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον προκειμένου να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του. Το τσιμέντο χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα σύνθετο υλικό που προκύπτει από την ανάμιξη αδρανών συστατικών, μιας πλαστικής μάζας και νερού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ανθεκτικού υλικού που είναι δυνατόν να λάβει οποιοδήποτε σχήμα και μέγεθος.

Η διαδεδομένη χρήση του τσιμέντου στις κατασκευαστικές εφαρμογές, αποδίδεται κυρίως στις καλύτερες ιδιότητες για δομικές εργασίες που παρουσιάζει το τσιμέντο σε σχέση με άλλα δομικά υλικά, όπως είναι οι φυσικοί λίθοι και τα κεραμικά υλικά. Αποτελεί τη δραστική συγκολλητική ουσία, που με τη μορφή πάστας γεμίζει τα κενά των αδρανών υλικών του σκυροδέματος, διαμορφώνοντας ένα ισχυρό δομικό υλικό και παρουσιάζει την ιδιότητα να σκληραίνει μέσα στο νερό. Το τσιμέντο παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή σε θλίψη, σε σύγκριση με άλλες κονίες, όπως είναι ο γύψος και ο ασβέστης και αποτελεί ένα δομικό υλικό με αρκετά χαμηλό κόστος.

Το τσιμέντο αποτελεί επίσης, ένα ασφαλές και αποτελεσματικό μέσο για την αδρανοποίηση και τη σταθεροποίηση πολλών τύπων επικίνδυνων ανόργανων αποβλήτων (όπως είναι ο αμιάντος και βαρέα μέταλλα, όπως για παράδειγμα το βηρύλλιο, το κάδμιο, ο υδράργυρος κ.α.), προσφέροντας έτσι μία επιτυχημένη και πρακτική μέθοδο για την ασφαλή διάθεση των αποβλήτων αυτών. Η επιτυχία της μεθόδου αυτής πέρα από το σχετικά φθηνό κόστος του τσιμέντου, οφείλεται κυρίως σε δύο χημικές ιδιότητες των συστατικών του τσιμέντου, στις υψηλές τιμές του pH και στις πολύπλοκες στερεοχημικές δομές των ένυδρων πυριτικών ασβεστίων ζελατινώδους υφής (C – S – H gel), που αποτελούν το κύριο προϊόν ενυδάτωσης του τσιμέντου και έχουν την δυνατότητα να εγκλωβίσουν πολλά είδη βαρέων μετάλλων στο πλέγμα τους, καθιστώντας τα έτσι ανενεργά (Νταφαλιάς, 2009).

Το τσιμέντο εντάσσεται στην κατηγορία των υδραυλικών υλικών. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα ανόργανα υλικά που με απλή ανάμιξη με το νερό αναπτύσσουν μη αντιστρέψιμες αντοχές. Η διεργασία αυτή ονομάζεται φαινόμενο υδραυλικής σκλήρυνσης. Ο φορέας της υδραυλικής σκλήρυνσης στα υλικά αυτά (χρησιμοποιούνται με την μορφή κονιών) είναι οι ασβεστοπυριτικές ενώσεις που περιέχουν, οι οποίες με προσθήκη νερού ενυδατώνονται σχηματίζοντας ένυδρα πυριτικά άλατα C – S – H ($x\text{CaO}\cdot y\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$), δίνουν δηλαδή ενυδατωμένες ασβεστοπυριτικές ενώσεις. Οι αντιδράσεις αυτές είναι εξώθερμες και ο ρυθμός τους καθώς και η ποσότητα της εκλυόμενης θερμότητας ενυδάτωσης εξαρτώνται από τον λόγο των αντιδρώντων συστατικών CaO/SiO_2 .

Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άσβεστο (CaO) και πυριτικά (SiO_2), τα επιμέρους συστατικά των υδραυλικών συνδετικών υλικών είναι δυνατόν να διαχωριστούν στις εξής τέσσερις κατηγορίες:

i. Υδραυλικά συστατικά, με λόγο $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} > 2$.

Χαρακτηριστικός εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι το κλίνκερ του τσιμέντου τύπου Portland, με λόγο $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 3$.

ii. Συστατικά με έμμεσες υδραυλικές ιδιότητες, με λόγο $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1 - 1,5$.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι σκωρίες υψικαμίνων και οι βασικές ιπτάμενες τέφρες.

iii. Ποζολανικά συστατικά, με λόγο $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 0,1 - 0,3$.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι φυσικές ποζολάνες και οι όξινης ιπτάμενες τέφρες. Τα υλικά αυτά δεν περιέχουν ενεργή άσβεστο (CaO) παρά μόνο ενεργό SiO_2 και δεν σκληρύνονται αυτοτελώς. Είναι δυνατόν όμως να σχηματίσουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις, εφόσον ιόντα Ca^{2+} τους προσφερθούν από τα άλλα συστατικά του συνδετικού υλικού.

iv. Αδρανή συστατικά τα οποία δεν συμβάλλουν στην ανάπτυξη των αντοχών.

Αυτά προστίθενται στο υδραυλικό συνδετικό υλικό σαν πληρωτικά (filler) σε κατάλληλη κοκκομετρία, διότι δεν μειώνουν τις αντοχές, έχουν καλή συνάφεια με

τα προϊόντα ενυδάτωσης και έχουν χαμηλό κόστος. Στην κατηγορία αυτή ανήκει ο ασβεστόλιθος (CaCO_3) (Νταφαλιάς, 2009).

2.2 Αναφορά στα πρότυπα τσιμέντου.

1.) ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN 197 – 1.

Τα τελευταία χρόνια και στα πλαίσια της έκδοσης κοινών ευρωπαϊκών κανονισμών για όλες τις χώρες της Committee Europeenne de Normalisation (CEN) στην οποία μετέχει και η Ελλάδα, έχουν διαμορφωθεί σειρές προτύπων που αφορούν το τσιμέντο και το σκυρόδεμα. Στο σχετικό πρότυπο EN197 – 1, το οποίο αναφέρεται στην ενοποίηση των επιμέρους τύπων τσιμέντου που παράγονται στις διάφορες χώρες της Ευρώπης, προβλέπονται οι πέντε τύποι και οι πολλές υποδιαίρεσεις, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Το πρότυπο αυτό έχει τεθεί σε ισχύ στην Ελλάδα από το 2001 (ΕΛΟΤ EN197 – 1).

Στο πρότυπο αυτό κάθε χώρα έχει συμπεριλάβει, εκτός του κλίνκερ, τα δικά της κύρια συστατικά, τα οποία είναι παραπροϊόντα βασικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων της, ή αποτελούν μέρος του ορυκτού της πλούτου και τα οποία «συνεργάζονται» με το τσιμέντο βελτιώνοντας κατά περίπτωση ορισμένες από τις ιδιότητες του.

Αν και στο πρότυπο αυτό δεν καθορίζεται σαφώς το σημείο όπου θα γίνει η προσθήκη των επιμέρους συστατικών που απαρτίζουν τα τσιμέντα και τα διαφοροποιούν μεταξύ τους, εν τούτοις τόσο λόγω της καλύτερης ομοιογένειας που επιτυγχάνεται κατά τη συνάλεσή τους, όσο και για ενεργειακούς λόγους, προτιμάται η προσθήκη να γίνεται κατά τη φάση της τελικής άλεσης, με συνάλεση όλων των συστατικών.

Ο ορισμός του τσιμέντου βάσει του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197 – 1, έχει ως εξής: τσιμέντο είναι μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμιχθεί με νερό σχηματίζει μία πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληρύνεται, έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητά της ακόμα και κάτω από το νερό.

Το τσιμέντο που καλύπτεται από ευρωπαϊκό το πρότυπο EN 197 – 1 και ονομάζεται CEM, είναι δυνατόν όταν αναμιχθεί με κατάλληλη αναλογία νερού και αδρανών, να δώσει σκυρόδεμα ή κονίαμα που διατηρεί την εργασιμότητά του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια αποκτά συγκεκριμένα επίπεδα αντοχών σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ παράλληλα εμφανίζει αενάως σταθερότητα όγκου.

Ο υδραυλικός χαρακτήρας των τσιμέντων CEM οφείλεται κυρίως στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών ενώσεων, αλλά παράλληλα και άλλες χημικές ενώσεις συμμετέχουν στην ανάπτυξη των αντοχών, όπως αυτές του αργιλίου. Το άθροισμα του δραστικού CaO και του δραστικού SiO_2 πρέπει να είναι τουλάχιστον 50,00%, όταν προσδιορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 196 – 2.

Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια συστατικά του, τα δευτερεύοντα συστατικά του, το θειικό ασβέστιο και τα πρόσθετα. Ως κύρια συστατικά, εκτός του κλίνκερ του τσιμέντου Portland (K) το οποίο έχει και τον δεσπόζοντα ρόλο, χρησιμοποιούνται η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), διάφορα ποζολανικά

υλικά (P) ή φυσικά ψημένα (Q), διάφορες τέφρες πυριτικές (V) ή ασβεστούχες (W), ψημένος σχιστόλιθος (T), ασβεστόλιθος (L ή LL) και πυριτική παιπάλη (D).

2.) Ο ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ.

Ο ελληνικός κανονισμός τσιμέντου ίσχυε από το 1980 έως 30/04/2002 με βάση το σχετικό Προεδρικό Διάταγμα (ΠΔ). Οι κύριοι τύποι τσιμέντου που προβλέπονταν είναι :

- Τσιμέντο τύπου I (Τσιμέντο Portland).
- Τσιμέντο τύπου II (Τσιμέντο Portland με έως 20,00 % τεχνητή ή φυσική ποζολάνη).
- Τσιμέντο τύπου III (Ποζολανικό τσιμέντο Portland, με ποσοστό ποζολάνης που κυμαίνεται από 20,00 – 40,00 %).
- Τσιμέντο τύπου IV (Τσιμέντα ανθεκτικά στην επίδραση των θεικών αλάτων).

Μετά την αποκλειστική εφαρμογή του EN 197 – 1 από 01/05/2002, ο κανονισμός αυτός ισχύει μόνο για την τελευταία κατηγορία τσιμέντων, δηλαδή αυτών που είναι ανθεκτικά στην επίδραση των θεικών αλάτων, για τα οποία δεν ολοκληρωθεί οι ευρωπαϊκές προδιαγραφές.

3.) ΤΑ ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ASTM.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες η προτυποποίηση των τσιμέντων κινείται περίπου στα ίδια πλαίσια με το EN. Διακρίνονται οι κύριοι τύποι τσιμέντων Portland στους οποίους περιλαμβάνονται διάφορες συνθέσεις τσιμέντων χωρίς κανένα άλλο κύριο συστατικό ή πρόσθετο, εκτός βέβαια από το κλίνκερ, που καλύπτονται από το πρότυπο ASTM C150, και οι ειδικοί υδραυλικοί τύποι τσιμέντων που περιλαμβάνουν όλους τους υπόλοιπους τύπους τσιμέντων και οι οποίοι καλύπτονται από πολλά επιμέρους πρότυπα. Σε αυτά υπάρχει η διάκριση μεταξύ i) των αναμιγμένων τσιμέντων Portland (blended Portland cements) που περιλαμβάνουν τους τύπους που προέρχονται από ανάμιξη τσιμέντου Portland με α) ταχέως ψυχθείσα σκωρία (τύπος IS) ή β) ποζολανικό υλικό (τύπος IP), όπως είναι οι ιπτάμενες τέφρες και ii) των τροποποιημένων τσιμέντων Portland (modified Portland cements) που προέρχονται από τροποποίηση στη σύσταση των ορυκτολογικών συστατικών και τα οποία εξακολουθούν να έχουν ως κύρια υδραυλικά συστατικά τα C_3S και βC_2S , αλλά έχουν κατάλληλες αυξημένες αναλογίες των αργλικών και φεριτικών φάσεων, οι οποίες τους προσδίδουν τις επιθυμητές ιδιότητες.

Η διαφορά με το EN είναι ότι αυτό στην ουσία έχει ενσωματωμένα τα blended cements, που αντιμετωπίζονται χωριστά στα ASTM και σε αντίθεση με τα Αμερικανικά Πρότυπα δεν περιλαμβάνει σε χωριστή κατηγορία τα ανθεκτικά τσιμέντα στην επίδραση των θεικών, παρ' ότι μερικοί από τους τύπους που προτείνει πληρούν τις απαιτήσεις ενός τέτοιου τσιμέντου.

2.3 Τύποι και κατηγορίες τσιμέντων.

2.3.1 Βάσει του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197 – 1.

Κατά το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197 – 1 τα κοινά τσιμέντα υποδιαιρούνται σε πέντε κύριους τύπους, ως εξής:

- CEM I, Τσιμέντα Portland.
- CEM II, Σύνθετα Τσιμέντα Portland.
- CEM III, Σκωριοτσιμέντα.
- CEM IV, Ποζολανικά Τσιμέντα.
- CEM V, Σύνθετα Τσιμέντα.

Οι περαιτέρω υποδιαίρεσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1, όπου τα ποσοστά αναφέρονται στο άθροισμα των κύριων και δευτερευόντων συστατικών. Στο τσιμέντο συμμετέχουν επίσης το απαραίτητο θειικό ασβέστιο και τα ενδεχόμενα πρόσθετα.

Πίνακας 2.1: Τύποι τσιμέντου και σύνθεση τους σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 197 – 1 (www.sika.gr).

Τύποι τσιμέντου και σύνθεσή τους σύμφωνα με το Πρότυπο EN 197-1

Κυριότεροι Τύποι Τσιμέντου	Σύνθεση (% μέρη κατά βάρους) ¹												
	-Ονομασία	Τύπος Τσιμέντου	Κύρια συστατικά									Δευτερεύοντα συστατικά	
			Κλίβερ τσιμέντου Portland	Σκωρία	Πυριτική Παυάλη	Ποζολάνη		Ιπτάμενη Τέφρα		Ψημένο σχιστόλιθο	Ασβεστόλιθος		
						Φυσική	Τεχνητή	Πυριτική	Ασβετούχος				
K	S	D ²	P	Q	V	W	T	L ⁴	LL ⁵				
CEM I	Τσιμέντο Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Τσιμέντο Portland με σκωρία υφικαμίνων	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Portland με πυριτική παυάλη	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ποζολάνη	Τσιμέντο Portland με ποζολάνη	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ιπτάμενη τέφρα	Τσιμέντο Portland με ιπτάμενη τέφρα	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ψημένο σχιστόλιθο	Τσιμέντο Portland με ψημένο σχιστόλιθο	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ασβεστόλιθο	Τσιμέντο Portland με ασβεστόλιθο	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
Τσιμέντο Portland - σύνθετο ³	Τσιμέντο Portland - σύνθετο ³	CEM II/A-M	80-94	6-20								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	21-35								0-5	
CEM III	Σκωριοτσιμέντο	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο ³	CEM IV/A	65-89	—	11-35				—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	36-55				—	—	—	0-5	
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο	CEM V/A	40-64	18-30	—	18-30		—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-39	31-50	—	31-50		—	—	—	—	0-5	

Σημειώσεις:

- Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο % σύνολο των κυριότερων και δευτερευόντων συστατικών.

- ο Το ποσοστό της πυριτικής παιπάλης περιορίζεται στο 10,00 %.
- ο Στα σύνθετα τσιμέντα Portland CEM II/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, ο τύπος του κύριου συστατικού πρέπει να δηλώνεται στην ονομασία του τσιμέντου.
- ο Ο ολικός οργανικός άνθρακας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,20 % κ.β.
- ο Ο ολικός οργανικός άνθρακας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,50 % κ.β.

Από τους πέντε τύπους το χαρακτηρισμό του Portland έχουν οι δύο πρώτοι, όπου το κλίνκερ, που είναι και το βασικό συστατικό του τσιμέντου, συμμετέχει τουλάχιστον κατά 65,00 %. Στις κατηγορίες τσιμέντων του τύπου II, εκτός από τα τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, διακρίνονται δύο ομάδες Α και Β, ανάλογα με το ποσοστό προσθήκης του κύριου συστατικού μετά του κλίνκερ, από το οποίο έχει πάρει και την ονομασία της η κατηγορία αυτή. Στην Α κατηγορία το ποσοστό του κλίνκερ δεν μπορεί να είναι μικρότερο του 80,00 %, ενώ στη Β κατηγορία το ποσοστό αυτό κατεβαίνει στο 65,00 %. Τα ποσοστά αυτά διαφοροποιούνται στους τρεις τελευταίους τύπους τσιμέντου, όπου το κλίνκερ δεν αποτελεί απαραίτητα το κύριο συστατικό.

2.3.2 Βάσει της θλιπτικής αντοχής.

Επίσης, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196 – 1, προδιαγράφονται και έξι κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την θλιπτική αντοχή κονιάματος πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής.

Οι πρώιμες αντοχές μετρώνται στις 2 ημέρες εκτός από την κατηγορία 32,5 όπου οι πρώιμες αντοχές μετρώνται στις 7 ημέρες. Για κάθε κατηγορία προβλέπονται δύο τάξεις πρώιμων αντοχών: η πρώτη αναφέρεται στις κανονικές πρώιμες αντοχές (συμβολισμός με το γράμμα N) και η δεύτερη αναφέρεται στις μεγάλες πρώιμες αντοχές ή διαφορετικά αντιστοιχεί σε τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχών (συμβολισμός με το γράμμα R). Όλα τα όρια παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 που ακολουθεί.

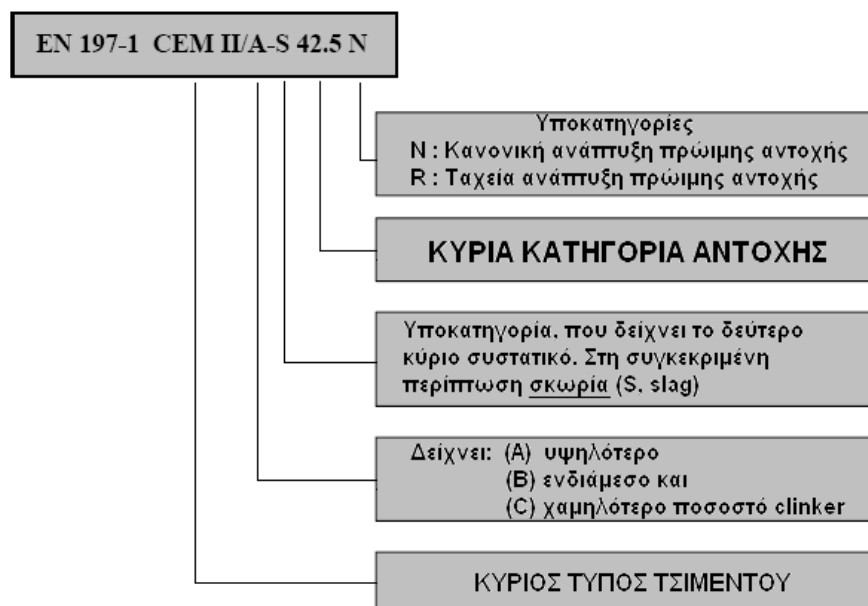
Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές, οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές (ΕΛΟΤ EN196-1, ίδια επεξεργασία).

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή σε θλίψη, MPa (N/mm ²)			Αρχικός χρόνος πήξης	Διόγκωση (Διαστολή)
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή (όρια)		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5 ≤ 52.5	≥ 75	≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-			
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5 ≤ 62.5	≥ 60	
42.5 R	≥ 20.0	-			
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5 -	≥ 45	
52.5 R	≥ 30.0	-			

Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες, προβλέπεται ο έλεγχος μόνο της αρχής χρόνου πήξης και της σταθερότητας του όγκου. Και τα δύο αυτά μεγέθη πρέπει να καλύπτουν τις απαιτήσεις του Πίνακα 2.2.

Ο συμβολισμός διαφόρων τσιμεντών, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197 – 1, επομένως και με το ΕΛΟΤ EN 197 – 1, καθορίζεται από (Σχήμα 2.1):

- Τον κύριο τύπο τσιμέντου.
- Το ποσοστό κλίνκερ που περιέχεται στο τσιμέντο.
- Τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού.
- Την κατηγορία αντοχής.
- Το επίπεδο της πρώιμης αντοχής.



Σχήμα 2.1: Συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου (Τσακαλάκης, 2010, ίδια επεξεργασία).

2.3.2.1 Κύρια συστατικά τσιμέντου.

Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων τσιμεντών είναι τα εξής:

1. Κλίνκερ Τσιμέντου Portland, (K).

Το κλίνκερ του τσιμέντου Portland (K) είναι ένα υδραυλικό υλικό που συνίσταται τουλάχιστον κατά τα 2/3 κ.β. από C_3S και C_2S , ενώ το υπόλοιπο κατά κύριο λόγο συνίσταται από τις αργλικές και σιδηραργλικές φάσεις του κλίνκερ. Η αναλογία CaO/SiO_2 δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 2,00 και το περιεχόμενο MgO δεν πρέπει να ξεπερνά το 5,00 % κ.β.. Το κλίνκερ του τσιμέντου Portland παρασκευάζεται με έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380 – 1420 °C) ενός σωστά επιλεγμένου, πλήρως ομογενοποιημένου και κατάλληλα αλεσμένου μίγματος (σε ξηρή, ημιυγρή ή υγρή μορφή) πρώτων υλών που περιέχει CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 και μικρές ποσότητες από άλλα στοιχεία.

2. Σκωρία Υψικαμίνων, (S).

Η σκωρία υψικαμίνων είναι ένα υλικό με λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες, ενώ παράλληλα παρουσιάζει ποζολανικές ιδιότητες όταν ενεργοποιείται κατάλληλα. Οι απαιτήσεις για την χρησιμοποίησή της ως συστατικού του τσιμέντου, είναι να περιέχει τουλάχιστον κατά τα 2/3 κ.β. υαλώδη σκωρία και το άθροισμα $CaO + MgO + SiO_2$ να αποτελεί τουλάχιστον τα 2/3 κ.β. της μάζας της. Επίσης, πρέπει να ικανοποιείται η σχέση $(CaO + MgO)/SiO_2 > 1$. Το υλικό που απομένει είναι κυρίως

Al₂O₃, με μικρά ποσοστά άλλων οξειδίων. Η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων παράγεται με ταχεία ψύξη ενός τήγματος σκωρίας κατάλληλης σύστασης, που προκύπτει από την παραγωγή σιδήρου στις υψικαμίνους. Το μη σιδηρούχο περιεχόμενο της σκωρίας οριοθετείται στο 15,00 % κ.β. και σε αυτή την περίπτωση πρέπει να ελέγχεται η ύπαρξη τοξικών μετάλλων.

3. Ποζολανικά Υλικά, (P,Q).

Ποζολανικά υλικά είναι φυσικά ή βιομηχανικά υλικά, πυριτικής, αργιλοπυριτικής ή συνδυασμού των προηγούμενων, σύστασης. Αν και οι ιπτάμενες τέφρες και η πυριτική παιπάλη έχουν ποζολανικές ιδιότητες, ταξινομούνται σε διαφορετικές κατηγορίες στο πρότυπο EN 197 – 1.

Τα ποζολανικά υλικά δεν σκληρύνονται μόνα τους όταν αναμιγνύονται με το νερό, αλλά όταν είναι λεπτοαλεσμένα, τότε παρουσία νερού αντιδρούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με το Ca(OH)₂ που προκύπτει από την ενυδάτωση των συστατικών του κλίνκερ και σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοαργλικές ενώσεις που αναπτύσσουν αντοχές. Οι ενώσεις αυτές είναι όμοιες με εκείνες που σχηματίζονται κατά την σκλήρυνση των υδραυλικών υλικών. Οι ποζολάνες συνίστανται κυρίως από δραστικό SiO₂, που πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 25,00 % κ.β. και από Al₂O₃. Το υπόλοιπο περιέχει Fe₂O₃ και άλλα οξείδια με μικρή συμμετοχή δραστικού CaO.

Οι Φυσικές Ποζολάνες (P), είναι υλικά συνήθως ηφαιστειογενούς προέλευσης ή ιζηματογενή πετρώματα με κατάλληλη χημική και ορυκτολογική σύσταση. Αλεθόμενες συμπεριφέρονται ως επί το πλείστον όπως οι ιπτάμενες τέφρες. Περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως τόφρους, ζεόλιθους, θηραϊκή γη και oil shales. Οι επιμέρους απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 197 – 1 για τα υλικά αυτά είναι αντίστοιχες με αυτές για τις ιπτάμενες τέφρες.

Οι φυσικές ψημένες ποζολάνες (Q), είναι υλικά ηφαιστειογενούς προέλευσης, άργιλοι, σχιστόλιθοι ή ιζηματογενή πετρώματα που έχουν ενεργοποιηθεί με θερμική κατεργασία.

4. Ιπτάμενες Τέφρες, (V, W).

Το πρότυπο EN 197 – 1 προβλέπει τη χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών τύπων ιπτάμενων τεφρών: α.) των πυριτικών, που προέρχονται από την καύση ανθρακιδίων ή γαιανθράκων πλούσιων σε οργανικό μέρος και οι οποίες έχουν ποζολανικές ιδιότητες και β.) των ασβεστούχων, που προέρχονται από την καύση ανθράκων και λιγνιτών κατώτερες γεωλογικής περιόδου και οι οποίες έχουν και υδραυλικές ιδιότητες που αποδίδονται στο ελεύθερο CaO που περιέχουν. Όλες οι τέφρες που θα χρησιμοποιηθούν ως συστατικά του τσιμέντου, πρέπει να ληφθούν με ηλεκτροστατικά ή μηχανικά φίλτρα που θα συλλέξουν την παρασυρόμενη από τα καυσάερια σκόνη που προέρχεται από τις διατάξεις καύσης του κονιοποιημένου καυσίμου. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται τέφρα, η οποία λαμβάνεται με οποιονδήποτε άλλο τρόπο. Οι κανονισμοί EN450 για την τέφρα στο σκυρόδεμα προδιαγράφουν τη μέγιστη απώλεια πύρωσης στο 5,00 % και επιτρέπουν τη χρήση τεφρών με υπόλοιπο στο κόσκινο των 45,00 μm, έως 40,00 %. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις (έλεγχος ανθεκτικότητας και ιδίως αντίσταση σε παγετό), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να γίνει αποδεκτή τέφρα με απώλεια πύρωσης έως 7,00 %.

Ειδικότερα για την πυριτική ιπτάμενη τέφρα (Siliceous fly ash, V), το πρότυπο EN 197 ορίζει ότι πρέπει να αποτελείται κυρίως από δραστικό SiO_2 και Al_2O_3 καθώς και μικρότερα ποσοστά από Fe_2O_3 και άλλα οξειδία. Η αναλογία του δραστικού CaO πρέπει να είναι μικρότερη από 10,00 % κ.β. και θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το ελεύθερο CaO δεν θα υπερβαίνει το 2,50 % όταν ελέγχεται κατά EN 451 – 1, ενώ η διόγκωση, όταν ελέγχεται σε μίγμα 30,00 % της τέφρας και 70,00 % του τσιμέντου αναφοράς με τη μέθοδο Le Chatellier, θα πρέπει να είναι μικρότερη των 10,00 mm. Τέλος, το δραστικό SiO_2 δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 25,00 % κ.β..

Ως ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα (Calcareous fly ash, W), ορίζεται το λεπτόκοκκο υλικό που έχει αξιοσημείωτες υδραυλικές ιδιότητες (για παράδειγμα πήζει μόνη της) καθώς και ποζολανικές ιδιότητες και που συνίστανται κυρίως από δραστικό CaO , SiO_2 , Al_2O_3 και σε μικρότερα ποσοστά Fe_2O_3 και άλλα οξειδία. Η αναλογία του δραστικού CaO πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 10,00 % κ.β.. Ασβεστούχες τέφρες που περιέχουν δραστικό CaO μεταξύ 10,00 % και 15,00 % δεν πρέπει να περιέχουν λιγότερο από 25,00 % κ.β. δραστικό SiO_2 . Λεπτομερώς αλεσμένη ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα που περιέχει περισσότερο από 15,00 % δραστικό CaO πρέπει να έχει αντοχές τουλάχιστον 10,00 MPa στις 28 ημέρες, όταν εξετάζεται σύμφωνα με το EN 196 – 1. Η διόγκωση της ασβεστούχου τέφρας πρέπει να είναι μικρότερη των 10,00 mm, όταν χρησιμοποιείται ένα μίγμα που αποτελείται από 30,00 % κ.β. αλεσμένη τέφρα και 70,00 % κ.β. τσιμέντο αναφοράς (CEM I). Πριν από τη δοκιμή, η τέφρα αλέθεται ώστε το υπόλειμμα στο κόσκινο των 40,00 μm , με υγρή κοσκίνιση, να είναι μεταξύ 10,00 % και 30,00 %.

5. Ψημένος Σχιστόλιθος (T).

Ο ψημένος σχιστόλιθος (burnt shale) παράγεται με πύρωση του oil shale σε θερμοκρασία 800 °C σε ειδικές καμίνους και μπορεί να θεωρηθεί παρόμοιο στη φύση του με τη σκωρία των υψικαμίνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζει ήπιες υδραυλικές ιδιότητες, καθώς παράγονται φάσεις όπως CA , C_2S , που μοιάζουν με αυτές του κλίνκερ. Περιέχει επίσης, μικρά ποσοστά ελεύθερου CaO και CaSO_4 και μεγαλύτερες αναλογίες από οξειδία, ειδικότερα SiO_2 , που εμφανίζουν ποζολανική συμπεριφορά. Το πρόβλημά του είναι το πολύ υψηλό ποσοστό SO_3 , το οποίο όταν ξεπερνά τα ανώτερα επιτρεπτά όρια, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για αντίστοιχη μείωση των συστατικών του τσιμέντου (κυρίως του γύψου) που περιέχουν θεικό ασβέστιο. Ο ψημένος σχιστόλιθος αλέθεται σε μεγάλη λεπτότητα και πρέπει να έχει αντοχές τουλάχιστον 25,00 MPa στις 28 ημέρες, όταν ελέγχεται σύμφωνα με το πρότυπο EN196 – 1. Τα δοκίμια ξεκαλουπώνονται 48 ώρες μετά την παρασκευή τους και διατηρούνται σε υγρή ατμόσφαιρα με σχετική υγρασία τουλάχιστον 90,00 %. Η διόγκωση του ψημένου σχιστόλιθου πρέπει να είναι μικρότερη των 10,00 mm, όταν ελέγχεται σύμφωνα με το πρότυπο EN196, με τη χρησιμοποίηση ενός μίγματος που αποτελείται από 30,00 % κ.β. αλεσμένο ψημένο σχιστόλιθο και 70,00 % κ.β. τσιμέντο Portland αναφοράς (CEM I).

6. Ασβεστόλιθος (L,LL).

Επιπροσθέτως των βασικών απαιτήσεων για τη χρησιμοποίηση του ασβεστόλιθου ως filler, όπου το ποσοστό προσθήκης δεν πρέπει να υπερβαίνει το

5,00 %, όταν αυτός χρησιμοποιείται ως κύριο συστατικό, πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Το περιεχόμενο CaCO_3 , υπολογιζόμενο μέσω του αναλυτικού προσδιορισμού του Ca, πρέπει να είναι τουλάχιστον 75,00 % κ.β.
- Η περιεχόμενη άργιλος, προσδιοριζόμενη με το τεστ του κυανού του μεθυλενίου, πρέπει να είναι μικρότερη του 1,20 g /100,00 g, όταν ο ασβεστόλιθος είναι αλεσμένος στα 5.000 cm^2/g .
- Ο περιεχόμενος ολικός άνθρακας (TOC) δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0,50% για τους ασβεστόλιθους με την κωδικοποίηση L και το 0,20 % για τους ασβεστόλιθους LL.

7. Πυριτική Παιπάλη, (D).

Η πυριτική παιπάλη (silica fume) παράγεται ως υποπροϊόν κατά την αναγωγή υψηλής καθαρότητας χαλαζία με άνθρακα σε καμίους ηλεκτρικού τόξου, για την παραγωγή κραμάτων πυριτίου και σιδηροπυριτίου. Αποτελείται από πολύ μικρά σφαιρικά σωματίδια με υψηλό ποσοστό περιεχόμενου άμορφου πυριτίου. Για τη συμμετοχή της ως κύριο συστατικό του τσιμέντου, θα πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Το άμορφο διοξείδιο του πυριτίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 85,00 % κ.β..
- Η απώλεια πύρωσης πρέπει να είναι μικρότερη του 4,00 % κ.β..
- Η ειδική επιφάνεια (BET) πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 15,00 m^2/g .

Για την συνάλεσή της με κλίνκερ και γύψο, η πυριτική παιπάλη μπορεί να είναι στη φυσική της κατάσταση, να είναι συμπιεσμένη ή να έχει μορφοποιηθεί σε κουφέτα (pellets) με χρήση νερού.

2.3.2.2 Δευτερεύοντα συστατικά τσιμέντου.

Τα δευτερεύοντα συστατικά (minor additional constituents - MAC) δεν πρέπει να συγχέονται με τα κύρια συστατικά. Τα δευτερεύοντα συστατικά επιτρέπεται να προστεθούν σε μικρά ποσοστά και σε αυτά περιλαμβάνονται και τα υλικά που είναι γνωστά και ως λεπτομερή ή γεμιστικά (fillers). Επιτρέπεται η ενσωμάτωσή τους έως 5,00 % κ.β. στο τσιμέντο, ενώ πολλές χώρες κρατούν το ποσοστό αυτό στο 3,00 %. Ως δευτερεύον συστατικό κυρίως χρησιμοποιείται ένα από τα συστατικά, η προσθήκη των οποίων γίνεται σε υψηλότερο ποσοστό στους αντίστοιχους τύπους τσιμέντου, όπως σκωρία υψικαμίνων, φυσική ποζολάνη ηφαιστειογενούς προέλευσης, βιομηχανική ποζολάνη, ιπτάμενες τέφρες, ψημένος σχιστόλιθος, ασβεστόλιθοι, πυριτική παιπάλη και λεπτομερή. Ως δευτερεύον συστατικό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κύριο συστατικό που θα προσδιορίσει και τον τύπο του τσιμέντου.

Λεπτομερή (fillers) είναι ειδικά επιλεγμένα φυσικά ή τεχνητά ανόργανα ορυκτά υλικά, τα οποία μετά από κατάλληλη προετοιμασία που στοχεύει κυρίως στη διαμόρφωση της κοκκομετρικής κατανομής τους, βελτιώνουν φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου, όπως είναι για παράδειγμα η εργασιμότητα, ενώ παράλληλα δεν αυξάνουν την απαίτηση σε νερό του τσιμέντου και δεν επηρεάζουν αρνητικά την ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων. Είναι αδρανή ή έχουν ασθενείς υδραυλικές

ή λανθάνουσες υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες, χωρίς όμως να πρέπει να υπακούν σε συγκεκριμένες απαιτήσεις. (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

Το θεικό ασβέστιο προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελικά άλεση του κλίνκερ, με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το ακριβές ποσοστό προσθήκης εξαρτάται από την περιεκτικότητα των κύριων συστατικών σε SO_3 καθώς και από τα θειικά του καυσίμου, συνήθως όμως κυμαίνεται μεταξύ 4,00 % και 5,00 % του βάρους του κλίνκερ. Το θεικό ασβέστιο μπορεί να προστεθεί κυρίως ως γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), που είναι και η περισσότερη συνηθισμένη μορφή, καθώς επίσης και ως ημιυδρική ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) ή ως ανυδρίτης (CaSO_4) που πολλές φορές υπάρχει ως παραπροϊόν διαφόρων βιομηχανικών διαδικασιών (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

Ως πρόσθετα νοούνται συστατικά που δεν καλύπτονται από τα υλικά που έχουν ήδη περιγραφεί και τα οποία έχουν σκοπό να βελτιώσουν είτε την παραγωγική διαδικασία, όπως για παράδειγμα η τριαιθανολαμίνη χρησιμοποιείται ως βελτιωτικό άλεσης, είτε τις ιδιότητες του τσιμέντου. Η ποσότητα των πρόσθετων δεν πρέπει να υπερβαίνει σε ξηρή βάση το 1,00 % κ.β. του τσιμέντου για ανόργανα πρόσθετα (εκτός από πιγμέντα) ή το 0,50 % για οργανικά πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά δεν πρέπει να προκαλούν διάβρωση του οπλισμού ή να επιβαρύνουν τις ιδιότητες του τσιμέντου, καθώς και των σκυροδεμάτων ή των κονιαμάτων που προκύπτουν από αυτό

2.3.3 Βάσει του αμερικανικού προτύπου ASTM.

Τα τσιμέντα αμερικανικού τύπου κατατάσσονται από το ASTM σε πέντε κατηγορίες I, II, III, IV, V. Οι κύριες κατηγορίες χωρίζονται επίσης σε υποκατηγορίες, ανάλογα με τις προσθήκες ανόργανων υλικών (ιπτάμενη τέφρα, σκωρίες υψικαμίνων, ιπτάμενη τέφρα, ποζολανικά υλικά κ.λπ.) που περιέχουν. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Τα τσιμέντα Τύπου I, χαρακτηρίζονται ως κοινά ή τσιμέντα γενικής χρήσης (OPC, Ordinary Portland Cement). Η τυπική σύσταση των τσιμέντων αυτού του τύπου είναι: 55,00 % (C_3S), 19,00 % (C_2S), 10,00 % (C_3A), 7,00 % (C_4AF), 2,80 % MgO , 2,90 % (SO_3), 1,00 % απώλεια πύρωσης και 1,00 % ελεύθερη άσβεστο (CaO_{free}).
- Τα τσιμέντα Τύπου II, είναι μέσης αρχικής αντοχής (μέσης αρχικής θερμότητας ενυδάτωσης) και μέσης αντοχής σε θεικές ενώσεις με μέγιστο ποσοστό περιεχόμενου C_3A 8,00 %. Έχουν ευρύτατη χρήση σήμερα, επειδή έχουν ίδια συμπεριφορά με αυτά του Τύπου I. Η τυπική τους σύσταση είναι: 51,00 % (C_3S), 24,00 % (C_2S), 6,00 % (C_3A), 11,00 % (C_4AF), 2,90 % MgO , 2,50 % (SO_3), 0,80 % απώλεια πύρωσης και 1,00 % ελεύθερη άσβεστο (CaO_{free}).
- Τα τσιμέντα Τύπου III, χαρακτηρίζονται ως τσιμέντα υψηλής αρχικής αντοχής και έχουν περιεκτικότητα σε C_3S παρεμφερή με αυτή των κοινών τσιμέντων (Τύπου I) ή και λίγο μεγαλύτερη και επίσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη λεπτότητα (Blaine Fineness), μέσω της άλεσης από ότι τα κοινά τσιμέντα, γεγονός που εξασφαλίζει μεγαλύτερη

αρχική ταχύτητα ενυδάτωσης και ως εκ τούτου και αρχική αντοχή, αλλά ελάχιστα μικρότερη αντοχή σε βάθος χρόνου. Η τυπική τους σύσταση είναι: 57,00 % (C₃S), 19,00 % (C₂S), 10,00 % (C₃A), 7,00 % (C₄AF), 3,00 % MgO, 3,10 % (SO₃), 0,90 % απώλεια πύρωσης και 1,30 % ελεύθερη άσβεστο (CaO_{free}). Τα τσιμέντα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος, σε επισκευαστικά κονιάματα, σε βάσεις έδρασης μηχανών κ.λπ..

- Τα τσιμέντα Τύπου IV, χαρακτηρίζονται ως τσιμέντα χαμηλής αρχικής θερμότητας ενυδάτωσης (μικρό ή ενδιάμεσο ποσοστό % C₃S) και μικρό ποσοστό C₃A. Το ποσοστό σε C₃A δεν μπορεί να υπερβαίνει το 7,00 % και το 35,00 % σε C₃S, αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά αυτά τα καθιστούν κατάλληλα για ογκώδεις κατασκευές με μεγάλο λόγο όγκου προς εξωτερική επιφάνεια, όπου η απότομη αύξηση της εκλυόμενης θερμότητας ενυδάτωσης πρέπει να αποφεύγεται για λόγους προστασίας των έργων από ρηγματώσεις. Έχουν το χαρακτηριστικό ότι μετά την πάροδο δύο ετών η αντοχή των κατασκευών είναι μεγαλύτερη, εφόσον βέβαια έχουν συντηρηθεί σωστά. Η τυπική τους σύσταση είναι: 28,00 % (C₃S), 49,00 % (C₂S), 4,00 % (C₃A), 12,00 % (C₄AF), 1,80 % MgO, 1,90 % (SO₃), 0,90 % απώλεια πύρωσης και 0,80 % ελεύθερη άσβεστο (CaO_{free}). Τα τσιμέντα αυτού του τύπου δεν παρασκευάζονται τα τελευταία χρόνια, επειδή έχουν αντικατασταθεί από σύνθετα τσιμέντα με ποζολάνη και αλεσμένη σκωρία, τα οποία είναι φθηνότερα και αποτελούν μία πολύ καλή εναλλακτική λύση.
- Τα τσιμέντα Τύπου V, παρουσιάζουν χαμηλό ποσοστό ($\leq 5,00$ %) σε C₃A και επίσης πρέπει να ικανοποιούν τον περιορισμό (C₄AF %) + (2C₃A %) $\leq 20,00$ %. Είναι ανθεκτικά σε θεικές ενώσεις (κατάλληλα για έργα σκυροδέματος σε θαλάσσιο περιβάλλον) και η τυπική τους σύσταση είναι: 38,00 % (C₃S), 43,00 % (C₂S), 4,00 % (C₃A), 9,00 % (C₄AF), 1,90 % MgO, 1,80 % (SO₃), 0,90 % απώλεια πύρωσης και 0,80 % ελεύθερη άσβεστο (CaO_{free}). Τα τσιμέντα και αυτού του τύπου δεν παρασκευάζονται συχνά σήμερα και τείνουν να αντικατασταθούν από διμερή σύνθετα τσιμέντα (κοινό τσιμέντο + αλεσμένη σκωρία υψικαμίνων) ή από τριμερή (κοινό τσιμέντο + αλεσμένη σκωρία + ιπτάμενη τέφρα).

2.4 Ιδιότητες τσιμέντου.

2.4.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες του τσιμέντου.

Το τσιμέντο είναι κονία με έντονη υδραυλική συμπεριφορά και με υψηλές αντοχές. Έχει χαρακτηριστικό πρασινότεφο χρώμα, το οποίο οφείλεται στα οξειδία του Fe₂O₃ και του MnO. Η πυκνότητά του κυμαίνεται μεταξύ 3,00 και 3,22 kg/dm³. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του είναι ίδιος με τον αντίστοιχο συντελεστή του χάλυβα (Κορωνάιος και Πουλάκος, 2006). Παρουσιάζει μικρή διαλυτότητα στο νερό μεταξύ των τιμών (0,10 – 1,00) %, αυξημένη αντοχή στον παγετό λόγω της μη υδατοπερατότητάς του, ενώ το pH του στο νερό είναι 12,00 – 13,00.

Η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε MgO δεν πρέπει να ξεπερνά το 6,00 % και του SO₃ το 3,50 %, όταν όμως η ειδική επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από 4.000,00 cm²/g, τότε το SO₃ επιτρέπεται να φτάνει μέχρι 4,00 %. Η απώλεια πύρωσης του τσιμέντου δεν πρέπει να ξεπερνά το 5,00 %. Η ειδική επιφάνεια του τσιμέντου πρέπει να είναι τουλάχιστον 2.600,00 cm²/g.

Η πήξη του τσιμέντου δεν πρέπει να αρχίζει νωρίτερα από 1 ώρα και δεν πρέπει να λήγει αργότερα από 8 ώρες, από την προσθήκη νερού στο τσιμέντο κατά την παρασκευή της πάστας τσιμέντου. Το τσιμέντο πρέπει να παρουσιάζει σταθερότητα όγκου και η διάγκωσή του πρέπει να είναι μικρότερη από 10,00 mm (Κορωνάιος και Πουλάκος, 2006).

Σημαντική ιδιότητα αποτελεί επίσης και η εργασιμότητα του τσιμέντου, δηλαδή η ικανότητά του να χυτεύεται σε τύπους (καλούπια), η οποία μετράται με το βαθμό εξάπλωσης (ακτίνα σε cm) μιγμάτων με νερό σε βαθμονομημένο δίσκο, μετά από σταθερό αριθμό κτυπημάτων.

Το συγκρατούμενο νερό, δηλαδή οι απαιτήσεις σε νερό ώστε να έχει η ενυδατωμένη πάστα συγκεκριμένα ρεολογικά χαρακτηριστικά, και ο περιεχόμενος αέρας, δηλαδή το ποσοστό του όγκου αέρα που περικλείεται στον όγκο του σκυροδέματος.

2.4.2 Η αντοχή του τσιμέντου.

Η αντοχή του τσιμέντου χαρακτηρίζεται κυρίως από την αντοχή σε θλίψη, η οποία είναι αρκετά υψηλή. Η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι δέκα φορές περίπου μικρότερη από την αντοχή του σε θλίψη και δεν λαμβάνεται υπόψη για τους υπολογισμούς στις κατασκευές. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 196 – 1, οι αντοχές θλίψης του τσιμέντου μετριοούνται σε κονίαμα που παρασκευάζεται με 3 μέρη άμμου και 1 μέρος τσιμέντου (S:C=3:1) και λόγο νερού / τσιμέντου ίσο με 0,50. Χρησιμοποιείται πρότυπη πυριτική άμμος (μέγιστο μέγεθος κόκκων 2,00 mm), 0,00 – 2,00 % της άμμου με μέγεθος μικρότερο από 80,00 μm και παρασκευάζονται με αυστηρά προτυποποιημένη διαδικασία, δοκίμια μεγέθους 40x40x160 mm. Τα δοκίμια συντηρούνται αρχικά για 24 ώρες σε περιβάλλον με σχετική υγρασία μεγαλύτερη από 90,00 % και ακολούθως σε νερό θερμοκρασίας 20±1 °C. Η μέτρηση των αντοχών πραγματοποιείται σε ηλικίες 1, 2, 7 και 28 ημέρες σε πρισματικά δοκίμια (ενδεικτικές διαστάσεις 40x40x80 mm), τα οποία προκύπτουν από τη διαίρεση, συνήθως μέσω της δοκιμής της αντοχής σε κάμψη, των αρχικών δοκιμίων σε δύο τμήματα. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 109 – 93 οι αντοχές σε θλίψη μετρούνται σε κυβικά δοκίμια 50 mm, που παρασκευάζονται με αναλογίες S:C=2,75:1 και λόγο νερού / τσιμέντου ίσο με 0,485.

Η αντοχή του τσιμέντου επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Τον Συντελεστή Νερού / Τσιμέντου (w).

Ο συντελεστής νερού / τσιμέντου πρέπει να έχει την κατάλληλη τιμή, ώστε να εξασφαλίζεται η πλήρης ενυδάτωση του τσιμέντου. Η τιμή αυτή ισούται με $w = 0,50$. Για τιμές του συντελεστή νερού / τσιμέντου μικρότερες από την τιμή αυτή, παραμένει ποσότητα τσιμέντου η οποία δεν έχει ενυδατωθεί, ενώ για μεγαλύτερες τιμές

σχηματίζονται τριχοειδείς πόροι γεμάτοι νερό. Και οι δύο αυτές περιπτώσεις έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής.

Η αύξηση της τιμής του συντελεστή νερού / τσιμέντου προκαλεί αύξηση του πορώδους και ταυτόχρονη μείωση της αντοχής σε θλίψη.

- Την Θερμότητα Ενυδάτωσης.

Οι περισσότερες από τις αντιδράσεις ενυδάτωσης είναι εξώθερμες, παράγουν δηλαδή θερμότητα (θερμότητα ενυδάτωσης). Η θερμότητα αυτή ορίζεται ως το ποσό της θερμότητας που εκλύεται κατά τη διάρκεια της πήξης και της σκλήρυνσης του τσιμέντου σε μια δεδομένη θερμοκρασία και εκφράζεται σε kJ/kg (ή cal/gr) του μη ενυδατωμένου τσιμέντου. Η θερμότητα ενυδάτωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση του τσιμέντου και τα συστατικά $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ και $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ είναι υπεύθυνα για τα μεγάλα ποσά εκλυόμενης θερμότητας.

Κατά τις αντιδράσεις ενυδάτωσης των συστατικών του τσιμέντου εκλύεται σημαντικό ποσό θερμότητας, το σκυρόδεμα όμως έχει πολύ μικρή αγωγιμότητα και δρα σαν μονωτής. Επομένως, η έκλυση θερμότητας κατά την ενυδάτωση είναι πιθανόν να έχει ανεπιθύμητες επιδράσεις στο σκυρόδεμα, με μικρορωγμές που σχηματίζονται στο εσωτερικό του, ειδικά όταν η μάζα του είναι μεγάλη. Η έκλυση θερμότητας είναι πιθανόν να έχει και ευεργετικά αποτελέσματα, όταν η σκυροδέτηση πραγματοποιείται σε συνθήκες ψύχους, καθώς ανεβάζει την θερμοκρασία και δεν επιτρέπει στο νερό που βρίσκεται εσωτερικά στους πόρους της πάστας του τσιμέντου να παγώσει (Καλκάνης κ.α., 2004).

- Την Θερμοκρασία Κατά Τη Διάρκεια Της Σκλήρυνσης.

Η χημική αντίδραση της σκλήρυνσης επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και επιταχύνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται. Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος εξαρτάται από την ωρίμανση, η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας και δίνεται από τη σχέση:

$$R = \sum \Delta t_i (T_i + 10)$$

όπου: R η ωρίμανση, Δt_i τα χρονικά διαστήματα σκλήρυνσης, όπου επικρατεί σταθερή θερμοκρασία και T_i η θερμοκρασία του αντίστοιχου διαστήματος.

- Την Επίδραση Της Υγρασίας.

Η παρουσία της υγρασίας κατά την σκλήρυνση είναι απαραίτητη για να ολοκληρωθεί η ενυδάτωση του τσιμέντου. Όταν εξατμιστεί το νερό των πόρων, η ενυδάτωση διακόπτεται, καθώς δεν είναι δυνατόν να σχηματιστούν οι ένυδρες φάσεις. Επομένως, ο τρόπος συντήρησης μετά την πήξη επηρεάζει την αντοχή του.

- Τον Χρόνο.

Η αντοχή σε θλίψη του τσιμέντου αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.

- Τον Τρόπο Αποθήκευσης.

Ο τρόπος και ο χρόνος αποθήκευσης του τσιμέντου επηρεάζουν την αντοχή του. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, το τσιμέντο λόγω της υγρασίας του αέρα αρχίζει να ενυδατώνεται, με αποτέλεσμα να σβολιάζει και να μειώνεται σημαντικά η αντοχή του. Η αντοχή σε θλίψη μετά από αποθήκευση 3 μηνών μειώνεται κατά 10,00 % - 20,00 %, ενώ μετά από αποθήκευση 6 μηνών μειώνεται κατά 20,00 % - 30,00 %. Όσο πιο υψηλή είναι η αντοχή του τσιμέντου, τόσο περισσότερο επηρεάζεται από το χρόνο αποθήκευσης. Έτσι, προκύπτει ότι τα τσιμέντα με αντοχή 25,00 MPa–45,00

MPa, δεν πρέπει να αποθηκεύονται πριν από τη χρήση τους πάνω από 2 μήνες, ενώ τα τσιμέντα με αντοχή 55,00 MPa πρέπει να αποθηκεύονται πριν από τη χρήση τους το πολύ 1 μήνα.

2.5 Έλεγχος της ποιότητας του τσιμέντου.

Η παραγωγή του τσιμέντου απαιτεί αυστηρούς ελέγχους και μία σειρά δοκιμασιών πραγματοποιούνται στο εργαστήριο, ώστε το παραγόμενο τσιμέντο να εκπληρώνει τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Οι έλεγχοι αυτοί αφορούν τις χημικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου.

Για τον έλεγχο της ποιότητας του τσιμέντου λαμβάνεται με κατάλληλη δειγματοληψία μία ποσότητα από το τσιμέντο που πρόκειται να ελεγχθεί, όχι μικρότερη από 8,00 Kg. Το δείγμα παρασκευάζεται σε θερμοκρασία 20 °C και σχετική υγρασία όχι μικρότερη από 65,00 % και συντηρείται σε θερμοκρασία 20°C και σχετική υγρασία όχι μικρότερη από 90,00 %. Ο έλεγχος της ποιότητας των δειγμάτων του τσιμέντου πραγματοποιείται με τις ακόλουθες μετρήσεις (<http://www.eds.gr>):

- Προσδιορισμός Της Αντοχής Σε Κάμψη.

Παρασκευάζονται 3 δοκίμια διαστάσεων 40x40x160 mm, από 1 μέρος τσιμέντου, 3 μέρη τελείως στεγνής πρότυπης άμμου και 0,50 μέρος νερού. Τα υλικά αναμιγνύονται με ειδικό αναμικτήρα. Το μίγμα τοποθετείται σε καλούπια από σκληρό χάλυβα και συμπυκνώνεται με κρούση. Τα δοκίμια ελέγχονται σε ειδική συσκευή για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κάμψη.

Η συσκευή αυτή είναι σχεδιασμένη για την πραγματοποίηση δοκιμών σε κάμψη σύμφωνα με τα πρότυπα DIN 51220, EN ISO 7500 – 1 και EN 12390 – 5. Το μέγιστο φορτίο είναι δυνατόν να είναι 100,00 kN, 200,00 kN ή 300,00 kN.



Εικόνα 2.1: Συσκευή ποιοτικού ελέγχου αντοχής σε κάμψη δοκιμίων (<http://www.eds.gr>).

- Προσδιορισμός Της Αντοχής Σε Θλίψη.

Τα μισά πρίσματα που προκύπτουν από τη δοκιμασία σε κάμψη και τα οποία συντηρούνται σε υγρό περιβάλλον, ελέγχονται σε ειδική συσκευή για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη. Η συσκευή προσδιορισμού αντοχής σε θλίψη δομικών υλικών πραγματοποιεί τους ποιοτικούς ελέγχους των δοκιμίων σύμφωνα με τα πρότυπα DIN 51220 και προαιρετικά EN 12390 – 4, και ακριβείας κλάσης 1 DIN

EN ISO 7500 – 1. Το μέγιστο φορτίο είναι δυνατόν να είναι 2.000,00 kN ή 3.000,00 kN.



Εικόνα 2.2: Συσκευή ποιοτικού ελέγχου αντοχής σε θλίψης δοκιμίων (<http://www.eds.gr>).

- Προσδιορισμός Του Χρόνου Πήξης Του Τσιμέντου.

Ο χρόνος πήξης του τσιμέντου προσδιορίζεται με τη συσκευή Vicat σε δοκίμια από κανονική πάστα τσιμέντου. Η συσκευή Vicat αποτελείται από ένα πλαίσιο που φέρει δύο δακτυλίους, μέσα στους οποίους κινείται χωρίς τριβή ένας χαλύβδινος κύλινδρος. Στο κάτω άκρο του κυλίνδρου είναι δυνατόν να προσαρμίζονται έμβολα και βελόνες διαφόρων μεγεθών. Στο κάτω μέρος η συσκευή φέρει γυάλινη πλάκα, στην οποία τοποθετείται κολουροκωνικός δακτύλιος με το δείγμα που πρόκειται να ελεγχθεί.

Κανονική πάστα τσιμέντου ή τσιμεντόπαστα ονομάζεται η πάστα του τσιμέντου που παρασκευάζεται με τέτοια αναλογία νερού / τσιμέντου, ώστε κατά τον έλεγχο του δοκιμίου με τη συσκευή Vicat το έμβολο κανονικής συνεκτικότητας, που εισέρχεται στη μάζα του μετά από κατάλληλη διαδικασία, να απέχει από την πλάκα στήριξης 6,00 mm (<http://www.ele.com>).

Το έμβολο κανονικής συνεκτικότητας είναι μεταλλικός κύλινδρος με μήκος 50,00 mm και διάμετρο 10,00 mm. Κατά τη δοκιμασία αυτή το κινητό μέρος της συσκευής Vicat πρέπει να έχει ολικό βάρος 300,00 gr. Η λειτουργία της συσκευής Vicat υπακούει στα πρότυπα EN 196 – 3, ASTM C187 και C191.



Εικόνα 2.3: Συσκευή Vicat, προσδιορισμού του χρόνου πήξης του τσιμέντου (<http://www.ele.com>).

Χρόνος αρχής της πήξης είναι ο χρόνος που πέρασε από την παρασκευή της πάστας του τσιμέντου μέχρι τη στιγμή που το άκρο της ειδικής βελόνας στη συσκευή

Vicat απέχει 5,00 mm από την πλάκα στήριξης. Η βελόνα που χρησιμοποιείται είναι χαλύβδινος κύλινδρος μήκους 50,00 mm και διατομής 1,00 mm².

Μετά τη δοκιμή για την αρχή της πήξης αναποδογυρίζεται ο κολουροκωνικός δακτύλιος με την πάστα του τσιμέντου πάνω στην πλάκα στήριξής του και οι δοκιμές για το τέλος της πήξης γίνονται στη νέα άνω επιφάνεια της πάστας του τσιμέντου.

Χρόνος τέλους της πήξης είναι ο χρόνος που πέρασε από την παρασκευή της πάστας του τσιμέντου μέχρι τη στιγμή όπου το άκρο της ειδικής βελόνας βυθίζεται στην πάστα κατά 0,50 mm. Η βελόνα που χρησιμοποιείται, είναι όπως η αντίστοιχη βελόνα που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αρχής της πήξης, με τη διαφορά ότι στο κάτω τμήμα της είναι προσαρμοσμένος δακτύλιος για την εύκολη και σωστή παρατήρηση μικρών βυθίσεων της βελόνας.

- Προσδιορισμός Της Ογκοσταθερότητας Του Τσιμέντου.

Ο προσδιορισμός της ογκοσταθερότητας του τσιμέντου γίνεται με την τοποθέτηση δείγματος από κανονική πάστα τσιμέντου σε ειδική συσκευή (δακτύλιος Le Chatellier). Τα δοκίμια τοποθετούνται σε νερό θερμοκρασίας 20 °C για 24 ώρες και λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση. Έπειτα διατηρούνται για 30 ώρες σε θερμοκρασία βρασμού, στην συνέχεια αφήνονται να ψηχθούν στον αέρα στους 20 °C, οπότε λαμβάνεται η δεύτερη μέτρηση. Από τη σύγκριση των δύο μετρήσεων προσδιορίζεται η ογκοσταθερότητα του τσιμέντου. Η λειτουργία του δακτυλίου Le Chatellier συμφωνεί με τα πρότυπα EN 196 – 3 και EN ISO 9597.



Εικόνα 2.4: Συσκευή Le Chatellier για τον προσδιορισμό της ογκοσταθερότητας του τσιμέντου (<http://www.controls.it>).

- Προσδιορισμός Της Λεπτότητας Του Τσιμέντου.

Η λεπτότητα του τσιμέντου προσδιορίζεται με τη βοήθεια της συσκευής Blaine, η οποία δίνει ουσιαστικά τη δυνατότητα διέλευσης καθορισμένης ποσότητας αέρα από στρώμα τσιμέντου με καθορισμένο πορώδες. Ο αριθμός και το μέγεθος των πόρων σε στρώμα τσιμέντου με ορισμένο πορώδες είναι συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων και καθορίζει την ταχύτητα ροής μέσα από το στρώμα αυτό. Η συσκευή Blaine συμφωνεί με τα πρότυπα EN 196 – 6, ASTM C204, UNE 80 – 122 και BS 4359.



Εικόνα 2.5: Συσκευή Blaine για τον προσδιορισμό της λεπτότητας του τσιμέντου (<http://www.nl-test.com>).

- Προσδιορισμός Των Ξένων Υλών.

Προσδιορίζεται το είδος των ξένων υλών με χημική ανάλυση και μικροσκοπική εξέταση, καθώς και το ποσοστό περιεκτικότητας της καθεμιάς από αυτές στο τσιμέντο.

- Προσδιορισμός Της Απώλειας Πύρωσης Του Τσιμέντου.

Μέσα σε χωνευτήριο πλατίνας τοποθετείται 1 gr δείγματος και πυρώνεται μέσα σε ηλεκτρικό φούρνο στους 925 °C περίπου. Στη συνέχεια, ψύχεται μέσα σε ξηραντήρα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ζυγίζεται κάθε 5 λεπτά, έως ότου σταθεροποιηθεί το βάρος του. Η απώλεια πύρωσης εκφράζεται % του αρχικού δείγματος.

- Προσδιορισμός Της Περιεκτικότητας Σε SiO_2 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SO_3 και Άλλα Οξειδία Του Τύπου R_2O_3 .

Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε κάθε ένα από τα οξειδία αυτά γίνεται στο εργαστήριο με ειδική διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια για κάθε οξείδιο και το αποτέλεσμα εκφράζεται % του αρχικού δείγματος σε κάθε περίπτωση.

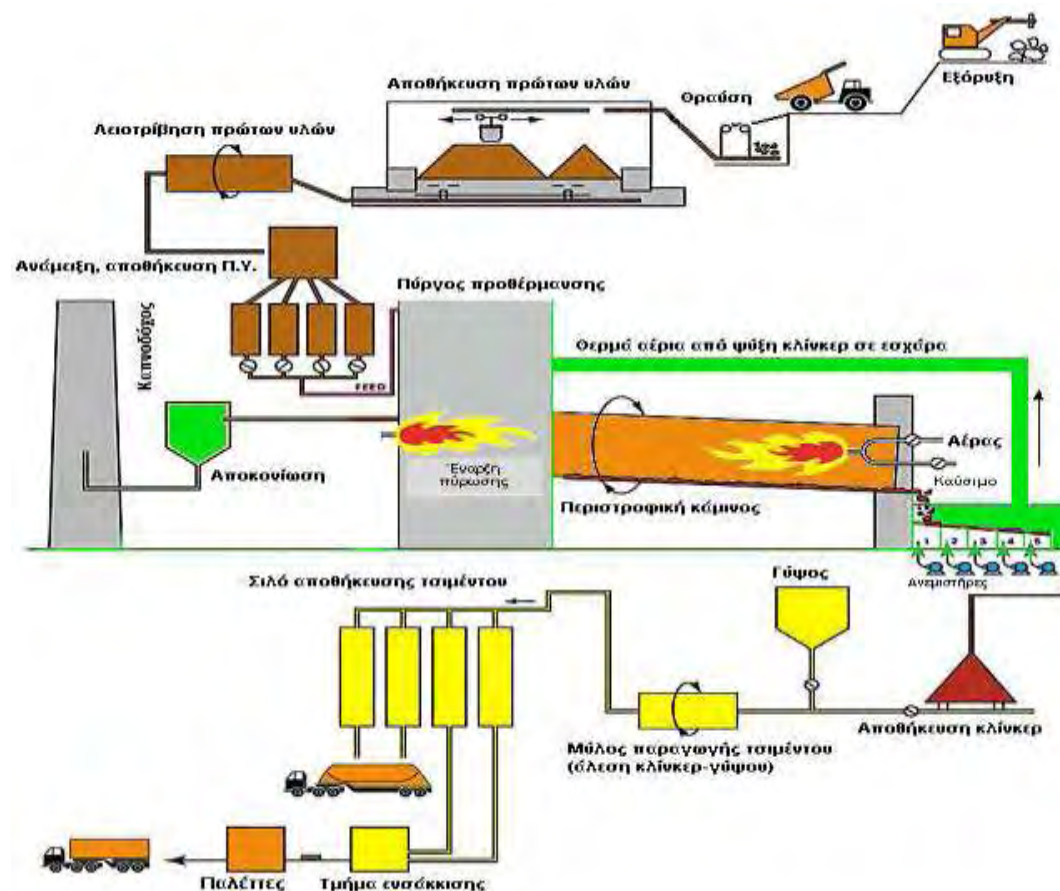
2.6 Διαδικασία παραγωγής τσιμέντου.

Το τσιμέντο αποτελείται από διάφορα ασβεστολιθικά πετρώματα (όπως αργιλικά πετρώματα, ασβεστόλιθος, χαλαζιακά πετρώματα, βωξίτης, σιδηρομετάλλευμα) και γύψο και σε κάποιες περιπτώσεις είναι πιθανό να περιέχει και διάφορα πρόσθετα. Η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου αποτελείται από τις εξής κύριες διεργασίες:

- Προετοιμασία του μίγματος των πρώτων υλών (θραύση, λειοτρίβηση, ομογενοποίηση).
- Πύρωση (έψηση) και μεταλλουργική κατεργασία (πυροσυσσωμάτωση ή κλινκεροποίηση) του μίγματος των πρώτων υλών στην περιστροφική κάμινο.
- Τελική λειοτρίβηση (άλεση) του κλίνκερ – Παραγωγή του τσιμέντου (Νουσιοπούλου, 2010).

Η κατηγοριοποίηση αυτή διακρίνει την παραγωγική διαδικασία στις διεργασίες που προηγούνται της κυρίως διεργασίας μετασχηματισμού των πρώτων υλών σε προϊόν (στάδιο έψησης) και στις διεργασίες που έπονται και προσδίδουν στο προϊόν επιμέρους ιδιότητες. Όσο τα μηχανήματα με τα οποία γίνεται η έψηση (περιστροφικές κάμινοι) αποτελούν την καρδιά της τσιμεντοβιομηχανίας,

καθορίζοντας και τη δυναμικότητά της, τα μηχανήματα των άλλων δύο σταδίων είναι εξίσου σημαντικά για την ορθολογική λειτουργία της βιομηχανικής μονάδας.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής επιμέρους διεργασιών διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010).

Υπάρχουν τέσσερις βασικές μέθοδοι για την παρασκευή τσιμέντου: η ξηρή, η ημι-ξηρή, η υγρή και η ημι-υγρή.

- Στην ξηρή μέθοδο, οι πρώτες ύλες αλέθονται και ξηραίνονται σχηματίζοντας μία λεπτόρρευστη σκόνη, την φαρίνα. Η φαρίνα οδηγείται στην συνέχεια σε προθερμαντή, ή σε κλίβανο προ – ασβεστοποίησης, ή πιο σπάνια, σε επιμήκη κλίβανο ξήρανσης.
- Στην ημι-ξηρή μέθοδο, η φαρίνα διαβρέχεται με νερό και σε μορφή σβόλων οδηγείται σε προθερμαντή, πριν τον κλίβανο.
- Στην υγρή μέθοδο, η αλεσμένη πρώτη ύλη, που συνήθως έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό, διαλύεται σε νερό για να σχηματίσει έναν αντλήσιμο πολτό, ο οποίος οδηγείται στον κλίβανο.
- Στην ημι-υγρή μέθοδο, ο πολτός πρώτα αφυδατώνεται σε φιλτρόπρεσσες. Το στερεό υπόλοιπο οδηγείται σε προθερμαντήρα ή σε ξηραντήρα για την παραγωγή της φαρίνας.

Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται σε ένα μεγάλο βαθμό από την κατάσταση των πρώτων υλών (υγρές ή ξηρές). Ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής κλίνκερ βασίζεται στην υγρή μέθοδο, αν και στην Ευρώπη περισσότερο από 75,00 % της παραγωγής χρησιμοποιεί την ξηρά μέθοδο, εξαιτίας της διαθεσιμότητας σε ξηρές

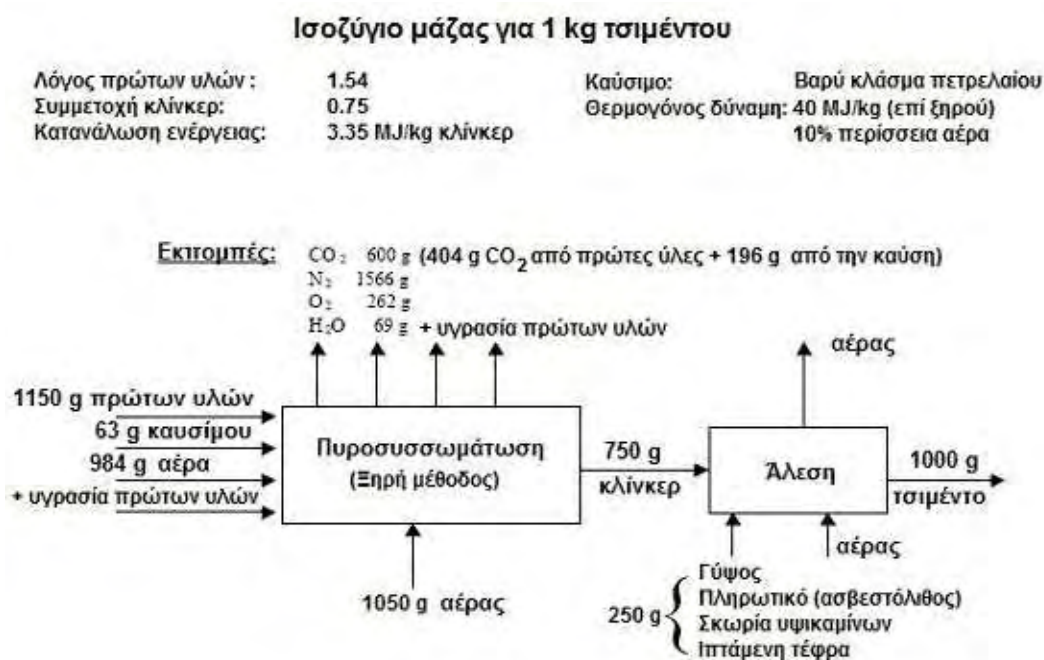
πρώτες ύλες. Οι υγρές μέθοδοι είναι περισσότερο ενεργοβόρες, άρα και πιο ακριβές (Νουσιοπούλου, 2010).

2.6.1 Πρώτες ύλες τσιμέντου.

Η συνηθισμένη σειρά εργασιών που λαμβάνουν χώρα για την εξόρυξη των πρώτων υλών από τα λατομεία, έχει ως εξής: απομάκρυνση του υπερκείμενου στρώματος, διάτρηση και ανατίναξη, μεταφορά του υλικού που εξορύχτηκε στα μέσα μεταφοράς και έπειτα μεταφορά του υλικού στην εγκατάσταση θραύσης.

Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή του κλίνκερ του τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα (φορείς CaO), τα οποία εξορύσσονται επιφανειακά κοντά στη μονάδα παραγωγής τσιμέντου. Χρησιμοποιούνται επίσης και διάφορα άλλα αργιλικά πετρώματα και γαίες, όπως πυριτική άμμος, σιδηρομεταλλεύματα, (φορείς SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃). Τα υλικά αυτά πρέπει να αναμιχθούν σε ποσότητες που εξαρτώνται από τη χημική τους σύσταση, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή σύνθεση του μίγματος.

Η αναγκαιότητα γεινίασης της θέσης εξόρυξης των ασβεστολιθικών πετρωμάτων και της μονάδας παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου είναι προφανής, καθώς για την παραγωγή 1 τόνου κλίνκερ ποσοστό περίπου 80,00 % από τους 1,50 – 1,65 τόνους πρώτων υλών, είναι ασβεστολιθικό υλικό. Ενδεικτικό ισοζύγιο πρώτων υλών και οι πρώτες ύλες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3 και στον Πίνακα 2.3 που ακολουθούν.



Σχήμα 2.3: Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων στην παραγωγή 1 kg τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010, ίδια επεξεργασία).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: Ενδεικτική σύνθεση (χημική σύσταση %) τριών πρώτων υλών, 1, 2, 3, για την παραγωγή τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010, ίδια επεξεργασία).

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

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

Το μίγμα των πρώτων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα κ.α.) αναμιγνύονται σε κατάλληλη αναλογία και λειοτριβούνται. Το αλεσμένο μίγμα, που ονομάζεται φαρίνα, υφίσταται στη συνέχεια πυρομεταλλουργική κατεργασία μέσα στην περιστροφική κάμινο. Στην περιστροφική κάμινο οι λειοτριβημένες πρώτες ύλες, με χρήση καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή και εναλλακτικά καύσιμα), θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, με φυσικοχημικές διεργασίες, μετατρέπονται σε ένα υλικό γκριζοπράσινου χρώματος μορφής σφαιριδίων διαμέτρου 10,00–25,00 mm, το οποίο ονομάζεται κλίνκερ του τσιμέντου (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Σφαιρίδια (pellets) μεγέθους 10,00–25,00 mm του κλίνκερ τσιμέντου. Προϊόν της διεργασίας της ένησης στην περιστροφική κάμινο.

2.6.2 Προσδιορισμός της σύνθεσης του φορτίου, ανάμιξη (ομογενοποίηση) και ελάττωση μεγέθους (θραύση, λειοτρίβηση των πρώτων υλών). (Οι δείκτες και η σημασία τους).

Οι ποσότητες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτώνται από τις χημικές και ορυκτολογικές τους ιδιότητες και από τις ιδιότητες – απαιτήσεις του κλίνκερ που θα παραχθεί. Μετά τον προσδιορισμό της κατάλληλης σύνθεσης του φορτίου, οι πρώτες ύλες (για ξηρή μέθοδο παραγωγής τσιμέντου) αναμειγνύονται κατάλληλα και ομογενοποιούνται για την παραγωγή ενός ομοιόμορφου μίγματος

(φαρίνα) που θα υποστεί ελάττωση μεγέθους (λειοτριβήση). Η καλή ανάμιξη εξασφαλίζει ομοιόμορφη κατανομή των πρώτων υλών στην τροφοδοσία του κυκλώματος θραύσης και λειοτριβήσης και οδηγεί στην παραγωγή κλίνκερ ομοιόμορφης ποιότητας.

Το μίγμα των πρώτων υλών συνίσταται από τα κύρια οξείδια CaO , Al_2O_3 , SiO_2 και Fe_2O_3 που συνιστούν το 90,00 % του μίγματος. Κάθε συστατικό του μίγματος των πρώτων υλών έχει τη δική του ανεξάρτητη επίδραση στην παραγωγική διαδικασία και στην ποιότητα του κλίνκερ και κατ' επέκταση του τσιμέντου που προκύπτει από αυτό. Η αναλογία όμως στην οποία υπάρχουν τα τέσσερα κύρια οξείδια, κινείται μέσα σε συγκεκριμένες τιμές που οριοθετούν τους κύριους δείκτες, οι οποίοι έχουν ιδιαίτερη σημασία για την παραγωγή του τσιμέντου, καθώς επηρεάζουν άμεσα τόσο την ποιότητα του κλίνκερ όσο και τη λειτουργική κατάσταση της περιστροφικής καμίνου. Επίσης, μέσω των τιμών των δεικτών πραγματοποιείται η αυτόματη διόρθωση της σύστασης του μίγματος και ελέγχεται με αυτόν τον τρόπο όλο το κύκλωμα της παραγωγής μιας τσιμεντοβιομηχανίας (<http://www.ele.com>). Οι δείκτες αυτοί είναι:

- Ο πυριτικός δείκτης (S_M : silica modulus ή SR : silica ratio).

$$SR = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Δίνεται από τη σχέση: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, βάσει της % κ.β. περιεκτικότητας των αντίστοιχων οξειδίων στο κλίνκερ.

Η τιμή του πυριτικού δείκτη πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,90–3,40 ενώ οι επιθυμητές τιμές του είναι 2,30–2,70. Για τον δείκτη αυτό αναφέρονται υψηλές τιμές που μπορούν να φθάσουν και το 5,00 κυρίως για τα λευκά Portland τσιμέντα και τα τσιμέντα υψηλής πυριτίας. Από την άλλη μεριά υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο δείκτης αυτός μειώνεται έως το 1,50. Αύξησή του χειροτερεύει την εψησιμότητα του κλίνκερ, καθώς ελαττώνει το ποσοστό της υγρής φάσης, ενώ παράλληλα μειώνεται η τάση επικάλυψης μέσα στην περιστροφική κάμινο για την προστασία της. Συνεπάγεται επίσης, βραδύτερη πήξη και σκλήρυνση του τσιμέντου. Η ελάττωση του πυριτικού δείκτη αυξάνει το ποσοστό υγρής φάσης με τις αντίστροφες επιδράσεις.

- Ο αργιλικός δείκτης (A_M : alumina modulus ή AR : alumina ratio).

$$AR = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Δίνεται από τη σχέση:

Χαρακτηρίζεται ως το πηλίκιο του οξειδίου του αργίλου προς το οξείδιο του σιδήρου και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,30–2,50. Η τιμή του προσδιορίζει το ποσοστό της υγρής φάσης στο κλίνκερ. Τα υψηλού αργίλου τσιμέντα παρουσιάζουν λόγο μεγαλύτερο του 2,50 ενώ τα χαμηλού μικρότερο του 1,50. Όταν ο αργιλικός δείκτης μειωθεί στο 0,637, τα δύο οξείδια είναι στις μοριακές τους αναλογίες και στην περίπτωση αυτή ευνοείται ο σχηματισμός μόνο $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, ενώ δεν παράγεται καθόλου $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Τα ειδικά αυτά τσιμέντα χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης, αργή πήξη και μικρή συστολή. Στα τσιμέντα με μεγάλο αργιλικό δείκτη και μικρό πυριτικό δείκτη, επέρχεται γρήγορη πήξη που απαιτεί ιδιαίτερο έλεγχο με προσθήκη γύψου.

- Ο υδραυλικός δείκτης (H_M : hydraulic modulus).

$$H_M = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Δίνεται από τη σχέση:

Ο υδραυλικός δείκτης συσχετίζει το CaO με το άθροισμα των τριών υπολοίπων κύριων οξειδίων και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,70–2,30. Από τσιμέντα με $H_M < 1,70$ δεν αναμένονται ιδιαίτερα μεγάλες αντοχές, ενώ τσιμέντα με $H_M > 2,30$ παρουσιάζουν μικρή σταθερότητα όγκου. Η αύξησή του συνεπάγεται μεγαλύτερη θερμότητα για την έψηση του κλίνκερ, μεγαλύτερη θερμότητα ενυδάτωσης και μεγαλύτερες αντοχές, κυρίως των πρώτων ηλικιών, ενώ την ίδια στιγμή μειώνεται και η αντίσταση στη χημική προσβολή.

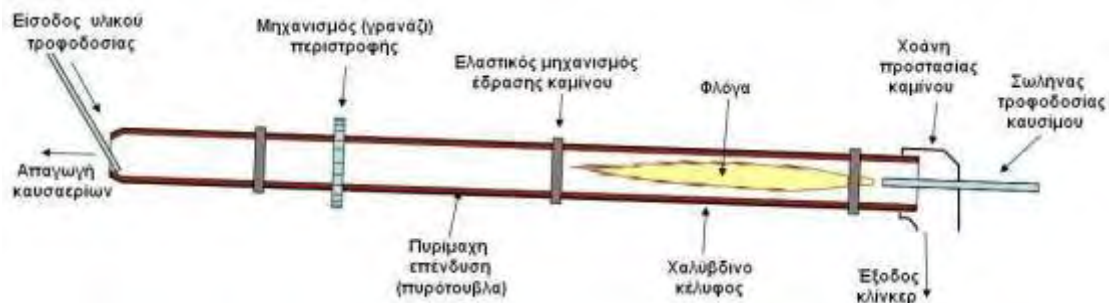
- Ο βαθμός κορεσμού σε άσβεστο (LSF: lime saturation factor).

$$LSF = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$$

Δίνεται από τη σχέση:

Ο βαθμός κορεσμού σε άσβεστο ελέγχει το λόγο αλίτη προς βελίτη στο κλίνκερ, ενώ ακόμη δείχνει κατά πόσον είναι πιθανόν στο κλίνκερ να περιέχεται μία ανεπιθύμητη ποσότητα ελευθέρως άσβεστο. Τιμές του δείκτη μεγαλύτερες του 1,00 πιστοποιούν ότι υπάρχει ελεύθερο CaO στη θερμοκρασία κλινκεροποίησης (σε ισορροπία με την υγρή φάση) και επομένως είναι πολύ πιθανή η συμμετοχή του και στο τελικό προϊόν. Στην πράξη είναι αποδεκτές τιμές αυτού του δείκτη έως 1,02 συνήθως όμως κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,92 – 0,96.

2.6.3 Οι περιστροφικές κάμινοι.



Εικόνα 2.7: Απλοποιημένη απεικόνιση περιστροφικής καμίνου (Τσακαλάκης, 2010).

Οι περιστροφικές κάμινοι είναι ογκώδεις, κυλινδρικού σχήματος, κεκλιμένες κατασκευές, διαμέτρου 3,50 – 4,50 m και μήκους έως 200,00 m, επενδυμένες εσωτερικά με πυρίμαχη επένδυση, μέσα στις οποίες τροφοδοτείται η φαρίνα. Οι διάφοροι τύποι περιστροφικών καμίνων βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Το μήκος τους εξαρτάται από τη μέθοδο κατεργασίας (ξηρή, υγρή, ημι-ξηρή, ημί-υγρή) της φαρίνας και από τις πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις, όσον αφορά στην προθέρμανση της φαρίνας και στις διεργασίες πύρωσης του ασβεστολίθου, και κυμαίνεται κατά περίπτωση από 50,00 – 200,00 m.

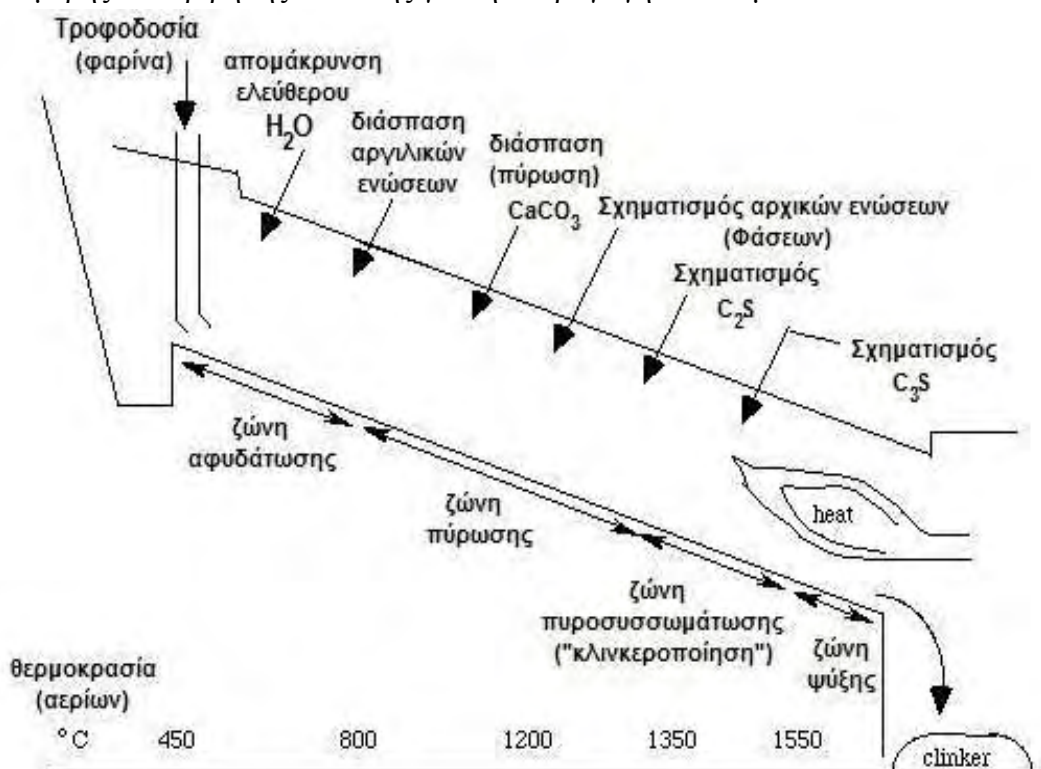
Η ταχύτητα περιστροφής της καμίνου κυμαίνεται από 1 – 4 στροφές το λεπτό (rpm). Η περιστροφική κάμινος είναι ελαφρώς κεκλιμένη προς την έξοδό της (άκρο αποκένωσης του κλίνκερ), για να ρέει το υλικό και να αποκενώνεται από το κατώτερο άκρο το προϊόν της.

Ο χρόνος παραμονής του υλικού μέσα στην κάμινο μπορεί να φτάσει από περίπου 20 λεπτά για καμίνους του τύπου προθέρμανσης – προπύρωσης της φαρίνας, μέχρι 2 ώρες για καμίνους κατεργασίας υγρής φαρίνας.

Οι διάφορες φάσεις κατεργασίας για την παραγωγή κλίνκερ στη διάταξη της καμίνου είναι οι εξής:

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

Στη συνέχεια, για την παραγωγή του κοινού τσιμέντου Portland ακολουθούν οι διεργασίες της ανάμιξης του κλίνκερ (95,00 %) με γύψο (περίπου 5,00 %) και της λεπτομερής λειοτρίβησης – άλεσης για την παραγωγή του τσιμέντου.



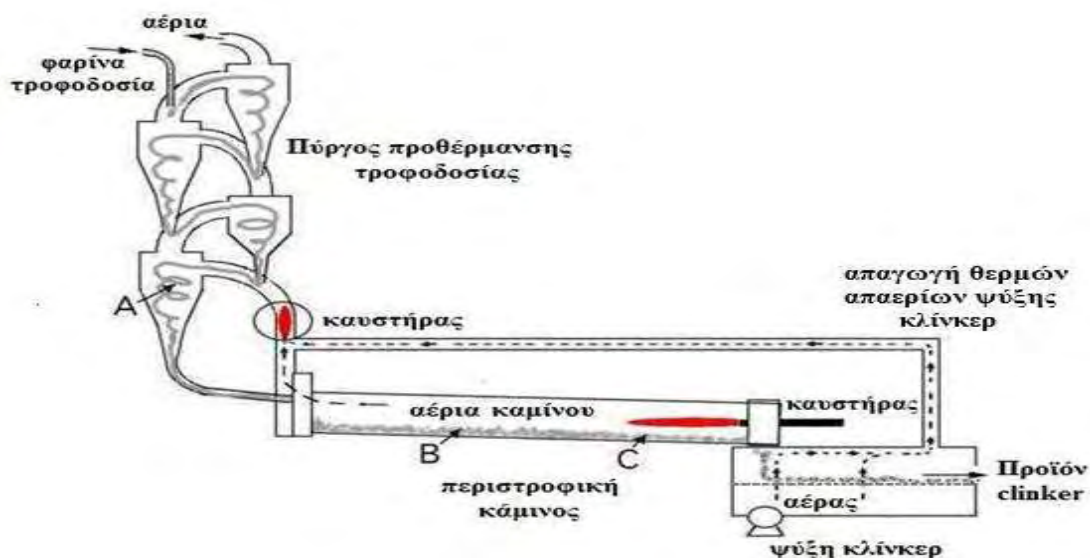
Εικόνα 2.8: Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη διάταξη της περιστροφικής καμίνου για την παραγωγή του κλίνκερ (Τσακαλάκης, 2010).

2.6.4 Μέθοδος παραγωγής τσιμέντου.

Με την πάροδο του χρόνου χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι και διατάξεις για την παραγωγή του κλίνκερ, η κύρια μέθοδος όμως που επικρατεί σήμερα για λόγους μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας και του χρόνου παραμονής του υλικού, είναι η ξηρή μέθοδος, με προθέρμανση της φαρίνας και μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου (preheater / precalciner).

Στα διάφορα στάδια της ξηρής κατεργασίας πραγματοποιούνται οι παρακάτω διεργασίες:

- i. Προθέρμανση της τροφοδοσίας (φαρίνα) και μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου στον πύργο προθέρμανσης και πύρωσης από τα ανερχόμενα θερμά αέρια της καμίνου και από τα αέρια ψύξης του κλίνκερ (θερμοκρασίες 900–1.000 °C).
- ii. Σχηματισμός ενδιάμεσων φάσεων από την αντίδραση των πρώτων υλών μεταξύ τους μέσα στην κάμινο (θερμοκρασίες 1.000–1.200 °C).
- iii. Πυροσυσσωμάτωση και σχηματισμός σφαιριδίων κλίνκερ (θερμοκρασίες 1.200–1.450 °C) μέσα στην κάμινο και κατόπιν ψύξη του κλίνκερ.



Εικόνα 2.9: Διάταξη ξηρής μεθόδου παραγωγής κλίνκερ με προθέρμανση της τροφοδοσίας και πύρωση του ασβεστολίθου (preheater / precalciner) (Τσακαλάκης, 2010).

Στις καμίνους αυτού του τύπου (preheater / precalciner), η ξήρανση, η απομάκρυνση του συνδεδεμένου νερού στις πρώτες ύλες, η προθέρμανση στη θερμοκρασία πύρωσης και η μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου, γίνονται εκτός της περιστροφικής καμίνου, στον πύργο προθέρμανσης και προ – πύρωσης (preheater / precalciner). Εξαρτάται από τον τύπο αυτών των καμίνων (preheater ή precalciner) το ποσοστό % της διεργασίας πύρωσης του ασβεστολίθου που ολοκληρώνεται εκτός της καμίνου. Στις καμίνους τύπου preheater 30,00 – 40,00 % της πύρωσης γίνεται εκτός της καμίνου, ενώ στις καμίνους τύπου precalciner 90,00 – 95,00 %, αντιστοίχως. Αυτό τελικά καθορίζει και το μήκος που καταλαμβάνει η ζώνη πύρωσης και η ζώνη πυροσυσσωμάτωσης εντός της καμίνου.

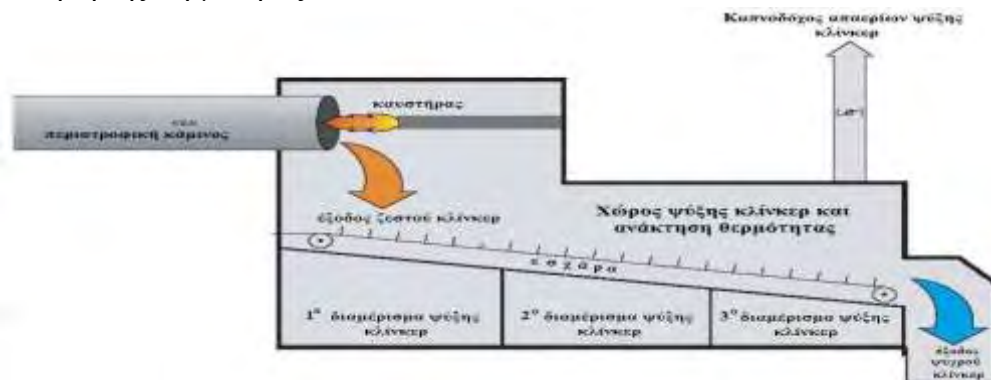
2.6.4.1 Η ψύξη του κλίνκερ.

Έχει διαπιστωθεί ότι ουσιαστικό ρόλο στην ποιότητα του κλίνκερ και στις ιδιότητες του παραγόμενου τσιμέντου παίζουν οι διεργασίες ψύξης του εξερχόμενου από την κάμινο κλίνκερ. Σημαντικό επίσης, οικονομικό όφελος προσφέρει η αξιοποίηση ποσοστού 35,00 % περίπου, της απαγομένης από το κλίνκερ θερμότητας, μέσω του αέρα ψύξης. Η θερμότητα που ανακτάται αξιοποιείται για την προθέρμανση της τροφοδοσίας των πρώτων υλών και για την έναυση του καυσίμου

στον ασβεστοποιητή, συμβάλλοντας στην ενεργειακή βελτιστοποίηση της διεργασίας παραγωγής κλίνκερ.

Οι κύριοι τύποι ψυκτών κλίνκερ είναι τύπου κινούμενης εσχάρας, περιστροφικού ή πλανητικού τύπου.

Το κλίνκερ που εξέρχεται από την περιστροφική κάμινο, διέρχεται με τη βοήθεια της κινούμενης διάτρητης εσχάρας, από θάλαμο και ψύχεται με τη βοήθεια αέρα που εμφυσάται από ανεμιστήρες (Εικόνα 2.10). Με τη βοήθεια του αέρα ψύξης, μέρος της θερμότητας που περιέχει απάγεται από το κλίνκερ και θερμαίνει τον αέρα ψύξης, του οποίου μέρος ανακυκλώνεται και οδηγείται στον πύργο προθέρμανσης για αξιοποίηση της θερμότητάς του.

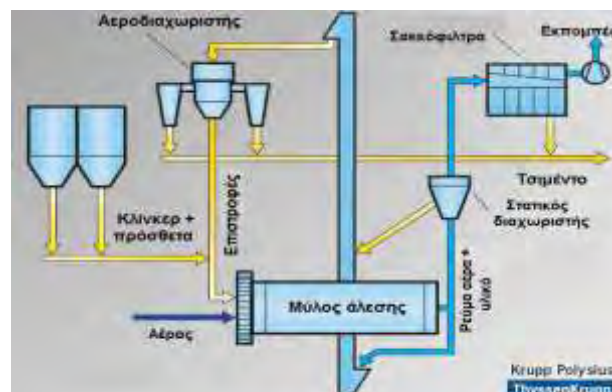


Εικόνα 2.10: Διάταξη ψύξης κλίνκερ στην έξοδο καμίνου (Τσακαλάκης, 2010).

2.6.4.2 Η άλεση του κλίνκερ.

Οι ιδιότητες του τσιμέντου, όσο και η συμπεριφορά κατά τη χρήση του στην παραγωγή σκυροδέματος, εξαρτώνται εκτός των άλλων σημαντικά και από τη λεπτότητά του, δηλαδή από την κοκκομετρική του ανάλυση. Η λεπτότητα του τσιμέντου εκφράζεται από την τιμή του δείκτη Blaine, που δίνεται σε μονάδες cm^2/gr ή m^2/kg και κυμαίνεται από 2.800 – 6.000 cm^2/gr , ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται.

Για την άλεση των πρώτων υλών, του κλίνκερ και των πρόσθετων (γύψου, σκωρίας υψικαμίνων, ποζολάνης, ιπτάμενης τέφρας κ.λπ.) χρησιμοποιούνται σφαιρόμυλοι άλεσης, κατακόρυφοι μύλοι κυλίνδρων μεγάλης απόδοσης ή συνδυασμοί κυλινδρόπρεσσας και σφαιρόμυλων για τη μείωση του κόστους, την αύξηση της δυναμικότητας της διάταξης και την αύξηση της λεπτότητας του προϊόντος.



Εικόνα 2.11: Συμβατική διάταξη άλεσης κλίνκερ για παραγωγή τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010).

Η συμπεριφορά του κλίνκερ κατά την άλεση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημική, την ορυκτολογική, την κοκκομετρική ανάλυση (λεπτότητα) των συστατικών της φαρίνας, την ποιότητα ομογενοποίησης των πρώτων υλών, τις συνθήκες πυροσυσσωμάτωσης (χρόνος παραμονής, θερμοκρασία) εντός της καμίνου και από την ταχύτητα ψύξης του κλίνκερ.

Προφανώς όλα τα παραπάνω επιδρούν σημαντικά, τόσο στη συμπεριφορά του κλίνκερ κατά την άλεση (κατανάλωση ενέργειας, λεπτότητα του παραγόμενου τσιμέντου), αλλά και στη συμπεριφορά του τσιμέντου κατά την ενυδάτωσή του, αφού είναι γνωστό ότι λεπτότερο τσιμέντο ενυδατώνεται πολύ γρήγορα, εκλύει μεγάλη ποσότητα θερμότητας και επιδρά σημαντικά στην πρώιμη ανάπτυξη αντοχών. Επίσης, μεγάλα ποσοστά ελεύθερης ασβέστου αλλά και περίκλαστου, κατά την ενυδάτωση μετατρέπονται σε υδροξείδια $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και $\text{Mg}(\text{OH})_2$, τα οποία ευθύνονται για τις καταστροφικές για το σκυρόδεμα διογκώσεις και διαρρήξεις μετά την πήξη του, προκαλούν δηλαδή προβλήματα σταθερότητας όγκου (Τσακαλάκης, 2010).

2.6.5 Καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία.

Τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις περιστροφικές καμίνους είναι τριών ειδών. Αέρια, υγρά ή στερεά ή συνδυασμός τουλάχιστον δύο ειδών. Τα αέρια καύσιμα, κυρίως φυσικό αέριο, επειδή είναι το φθηνότερο από τα υπόλοιπα αέρια και έχει μεγάλη θερμογόνο δύναμη λόγω και του περιεχόμενου υδρογόνου, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην τσιμεντοβιομηχανία και παρουσιάζει ουσιαστικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων ορυκτών καυσίμων.

Τα τελευταία χρόνια, για προφανείς περιβαλλοντικούς (ανεξέλεγκτη απόθεση απορριμμάτων, εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων, μείωση εκπομπών CO_2 κ.λπ.), αλλά και οικονομικούς λόγους, γίνεται ευρεία χρήση εναλλακτικών (μη συμβατικών) καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία για την παραγωγή μέρους της απαιτούμενης ποσότητας θερμότητας. Τα καύσιμα αυτά παρουσιάζουν πολλές φορές υπέρτερες ιδιότητες έναντι των συμβατικών καυσίμων, όσον αφορά στη θερμογόνο δύναμή τους (Πίνακας 2.4).

Πίνακας 2.4: Είδος και θερμογόνος δύναμη καυσίμων τσιμεντοβιομηχανίας (Τσακαλάκης, 2010).

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

2.6.6 Η ενυδάτωση του τσιμέντου.

Στα κοινά τσιμέντα οι ενώσεις του κλίνκερ τσιμέντου είναι κατά προσέγγιση:

- Πυριτικό τριασβέστιο, C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$), σε ποσοστό 50,00 %.
- Πυριτικό διασβέστιο, C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$), σε ποσοστό 25,00 %.
- Αργιλικό τριασβέστιο, C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$), σε ποσοστό 10,00 %.
- Αργιλοσιδηρούχο τετρασβέστιο, C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$), σε ποσοστό 10,00 %.
- Γύψος ($CaSO_4$), σε ποσοστό 5,00 %.



Εικόνα 2.12: Κόκκος τσιμέντου στον οποίο εμφανίζονται οι διάφορες φάσεις του κλίνκερ που ενυδατώνονται (Τσακαλάκης, 2010).

Ο όρος ενυδάτωση υποδηλώνει το σύνολο των αλλαγών που πραγματοποιούνται όταν άνυδρο τσιμέντο ή κάποιο από τα συστατικά του, αναμιγνύεται με νερό. Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μία διαδικασία περισσότερο πολύπλοκη από την απλή μετατροπή άνυδρων ενώσεων στις αντίστοιχες ενυδατωμένες και περιλαμβάνει ένα σύνολο χημικών και φυσικομηχανικών μεταβολών, που έχουν ως αποτέλεσμα την πήξη και την ανάπτυξη αντοχών (σκλήρυνση) της πάστας του τσιμέντου, με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας.

Η πήξη δηλώνει τη σταδιακή απώλεια της πλαστικότητας της πάστας του τσιμέντου, χωρίς την ανάπτυξη αξιόλογων αντοχών και ολοκληρώνεται τις πρώτες ώρες μετά την ανάμιξη τσιμέντου – νερού. Η σκλήρυνση είναι το επόμενο στάδιο και περιλαμβάνει την αύξηση της σκληρότητας και την ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

Μόνο οι ασβεστοπυριτικές ενώσεις ($3CaO \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot SiO_2$) ευθύνονται – συμμετέχουν στην αύξηση της αντοχής. Και οι φάσεις $3CaO \cdot Al_2O_3$ και $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ ενυδατώνονται, αλλά δεν συμβάλλουν στην αντοχή της πάστας του τσιμέντου. Η θερμότητα που εκλύεται κατά την ενυδάτωση, οφείλεται στη δημιουργία και καταστροφή χημικών δεσμών που λαμβάνουν χώρα με την επίδραση του νερού (Τσακαλάκης, 2010).

Η πορεία της ενυδάτωσης επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, με κυριότερους τους εξής:

- Σύσταση των φάσεων του τσιμέντου και η παρουσία ξένων ιόντων στο πλέγμα των φάσεων.
- Λεπτότητα του τσιμέντου.
- Λόγος νερού / τσιμέντου.
- Θερμοκρασία συντήρησης.

- Παρουσία πρόσθετων.
- Παρουσία άλλων κύριων συστατικών στο τσιμέντο.

2.6.7 Συντήρηση τσιμέντου.

Η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου ολοκληρώνεται είτε με την αποθήκευσή του σε ειδικά σιλό, είτε με την συσκευασία του σε ειδικούς ανθεκτικούς χάρτινους σάκους, σφραγισμένους στο εργοστάσιο παραγωγής. Είναι απαραίτητη η σωστή αποθήκευση και συντήρηση του τσιμέντου για την διατήρηση της ποιότητάς του.

Το τσιμέντο τύπου χύδην πρέπει να αποθηκεύεται σε σιλό, που θα εξασφαλίζουν πλήρως την προστασία του από τις καιρικές συνθήκες και θα είναι επαρκώς αεριζόμενα. Το συσκευασμένο σε σάκους τσιμέντο πρέπει να φυλάσσεται σε κλειστές αποθήκες, το πάτωμα των οποίων να έχει ξύλινη εσχάρα, υπερυψωμένη κατά 30,00πάνω από το έδαφος και σκεπασμένη υδατοστεγή μεμβράνη. Εάν κριθεί απαραίτητο, το τσιμέντο θα πρέπει να καλύπτεται με αδιάβροχα καλύμματα, έτσι ώστε να προστατεύεται από τις βροχές και την υγρασία. Τσιμέντα διαφορετικού τύπου ή διαφορετικής κατηγορίας αντοχής, πρέπει να αποθηκεύονται σε διαφορετικά σιλό ή σε χωριστά τμήματα της αποθήκης.

Επίσης, πρέπει να αποφεύγεται η υπερβολική παλαίωση του ενσакισμένου τσιμέντου, ενδείκνυται επομένως να χρησιμοποιείται κατά χρονολογική σειρά παράδοσης. Το τσιμέντο που αποθηκεύεται στην ύπαιθρο απορροφά υγρασία και διοξείδιο του άνθρακα, από τον αέρα, με αποτέλεσμα να σχηματίζει σβόλους και να ελαττώνεται η ικανότητά του για σκλήρυνση. Τσιμέντο με λεπτή άλεση ή τσιμέντο με ταχεία ανάπτυξη αντοχής είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο από την άποψη αυτή (www.titan.gr).

3. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ.

3.1 Εισαγωγή.

Αδρανή ονομάζονται τα διαβαθμισμένα, ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης υλικά, που χρησιμοποιούνται είτε με συγκολλητικό μέσο (για την παρασκευή κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, ασφαλτομιγμάτων κ.λπ.) είτε αυτούσια (ως έρμα σιδηροδρομικών γραμμών, στραγγιστηρίων, φίλτρων διηθήσεως ή καθαρισμού, βράχοι θωράκισης, κ.λπ.) σε πάσης φύσεως τεχνικά έργα.

Τα αδρανή υλικά δεν παρουσιάζουν χημικές συνδετικές ιδιότητες μεταξύ τους, παρά μόνο φυσική συνοχή, λόγω της γεωμετρικής ταξινόμησης των κόκκων τους και του βάρους τους. Επίσης, δεν αντιδρούν χημικά με το συγκολλητικό μέσο, παρά μόνο συγκρατούνται από αυτό.

Τα αδρανή υλικά προέρχονται από τη φυσική αποσάθρωση ή την τεχνητή θραύση των πετρωμάτων, αλλά και από διάφορα υλικά, όπως σκουριές από υψικαμίλους και βιομηχανικά παραπροϊόντα. Αποτελούνται από συμπαγείς κόκκους του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους.

Τα αδρανή στην Ελλάδα είναι χημικώς αδρανή τεμάχια ασβεστολιθικών κυρίως πετρωμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σκυροδέματος και ως υλικά οδοστρωσίας, ενώ τα τεμάχια μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιούνται ως έρμα σιδηροδρομικών γραμμών.

Η κύρια χρήση των αδρανών υλικών είναι στην παραγωγή σκυροδέματος. Λόγω του γωνιώδους και ακανόνιστου σχήματός τους, συνδέονται μεταξύ τους και συγκρατούνται στο σκυρόδεμα με τη βοήθεια της πάστας του τσιμέντου. Το τσιμέντο όμως, αποτελεί ένα υλικό με μεγάλο κόστος παραγωγής, για αυτό και πρέπει η περιεχόμενη ποσότητά του στο σκυρόδεμα να ελαχιστοποιείται, υπό την προϋπόθεση βέβαια διατήρησης της αντοχής του σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Το 70,00-80,00 % κ.β. του σκυροδέματος αποτελείται από αδρανή, γεγονός που συμβάλλει στο να διατηρείται χαμηλό το κόστος του σκυροδέματος, καθώς τα αδρανή είναι σχετικά φθηνά υλικά, τόσο ως πρώτη ύλη όσο και ως διαδικασία παραγωγής. Δρουν δηλαδή, ως πληρωτικά στο σκυρόδεμα. Τα αδρανή, προσφέρουν επίσης αξιολογικά πλεονεκτήματα και από τεχνικής άποψης στο σκυρόδεμα, καθώς επηρεάζουν θετικά τη στατική συμπεριφορά των κατασκευών από σκυρόδεμα, εξασφαλίζουν μεγάλη σταθερότητα όγκου και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κατασκευών σε σχέση με την περίπτωση χρήσης μόνο τσιμεντοκονιάματος.

Ο έλεγχος της καταλληλότητας των αδρανών του σκυροδέματος θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ) 1997 (ΦΕΚ 315B/17/4/97) άρθρο 4 §3 και του Σχεδίου Ελληνικού Προτύπου ΕΛΟΤ 408 (Θραυστά Αδρανή Για Συνήθη Σκυρόδεμα).

Πρέπει επίσης να αναφερθεί, ότι ο νέος ΚΤΣ ΕΛΟΤ EN – 206, αναφέρει ότι τα αδρανή σκυροδέματος θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού Προτύπου ΕΛΟΤ EN12620:2002 (Αδρανή Για Σκυρόδεμα).

3.2 Είδη – τύποι αδρανών υλικών.

Τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες βάσει:

- ο Της προέλευσής τους.
- ο Την πηγή λήψης τους.
- ο Του ειδικού τους βάρους.
- ο Του μεγέθους των κόκκων τους.

Βάσει της προέλευσής τους τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε: α) φυσικής προέλευσης, τα οποία έχουν ληφθεί από το φυσικό περιβάλλον και δεν έχουν υποστεί τίποτε περισσότερο από μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος και διαλογής (θραυστά πετρώματα, αλλουβιακοί σχηματισμοί, ποταμίσιες, λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις, αποθέσεις άμμων ή χαλίκων, λάβα, ηφαιστειακοί τάφοι, κ.α.), β) τεχνητά ή βιομηχανικά, τα οποία έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας, από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα καύσεων, άργιλοι, βερμικουλίτης, περλίτης, υλικά στίλβωσης κ. α.) και γ) ανακυκλωμένα αδρανή, τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (υλικά κατεδαφίσεως σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ασφαλτικών έργων κ.α.) (Κ.Τ.Σ., 1997).

Βάσει της πηγής λήψης τους τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε: α) φυσικά ή συλλεκτά αδρανή, τα οποία λαμβάνονται από φυσικές αποθέσεις (δημιουργούνται λόγω φυσικής αποσάθρωσης) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν ή να επεξεργαστούν περαιτέρω, ανάλογα με τις απαιτήσεις και β) αδρανή λατομείων ή θραυστά, τα οποία προκύπτουν από εξόρυξη και θραύση όγκων πετρώματος.

Βάσει του ειδικού τους βάρους τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε: α) κανονικού ειδικού βάρους (από $\geq 2,00$ έως $< 3,00 \text{ mg/m}^3$), τα οποία χρησιμοποιούνται για τεχνικά έργα, β) ελαφροβαρύ ($< 2,00 \text{ mg/m}^3$), που χρησιμοποιούνται για ελαφροβαρή θερμομονωτικά σκυροδέματα ή κονιάματα και γ) βαρέα ($\geq 3,00 \text{ mg/m}^3$), τα οποία έχουν ειδικές χρήσεις, όπως οι κατασκευές από σκυρόδεμα για προστασία από την ακτινοβολία.

Βάσει του μεγέθους των κόκκων τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε: α) χονδρόκοκκα, με μέγιστο μέγεθος κόκκου $\leq 4,00 \text{ mm}$ (διάφορα είδη άμμων), β) λεπτόκοκκα, με μέγιστο μέγεθος κόκκου $> 4,00 \text{ mm}$ και ελάχιστο μέγεθος $> 2,00 \text{ mm}$ (ογκόλιθοι, κροκάλες, έρμα, χαλίκι, γαρμπίλι, ρυζάκι) και γ) λεπτομερή ή filler, που είναι το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο μέγεθος κόκκου $2,00 \text{ mm}$ και το οποίο διέρχεται σε ποσοστό $70,00 - 100,00 \%$ από το κόσκινο $0,063 \text{ mm}$ και προσδίδει συγκεκριμένες ιδιότητες.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση των αδρανών υλικών είναι αυτή με βάση τις χρήσεις τους, η οποία έχει ως εξής:

- ο Αδρανή υλικά για παρασκευή σκυροδέματος.
- ο Αδρανή υλικά για παρασκευή ασφαλτομιγμάτων.
- ο Αδρανή υλικά κονιαμάτων.
- ο Αδρανή υλικά για ογκόλιθους για υδραυλικά και λιμενική έργα.
- ο Αδρανή υλικά για έρμα σιδηροδρομικών γραμμών.
- ο Αδρανή υλικά για βάσεις και υποβάσεις σταθεροποιημένες ή όχι για χρήση σε οδοστρώματα και για έργα πολιτικού μηχανικού. (ACI Committee, 2007, Κορωναίος και Πουλάκος, 2006).

3.3 Αδρανή σκυροδέματος.

Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σκυροδέματος είναι η άμμος, το χαλίκι / σκύρα και το γαρμπίλι. Το αδρανές υλικό που περιλαμβάνει κόκκους όλων των μεγεθών ονομάζεται αμμοχάλικο.

Ο όρος άμμος περιλαμβάνει τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους είναι μεταξύ 0,20 mm και 8,00 mm.

Ο όρος γαρμπίλι περιλαμβάνει τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους είναι μεταξύ 8,00 mm και 15,00 mm.

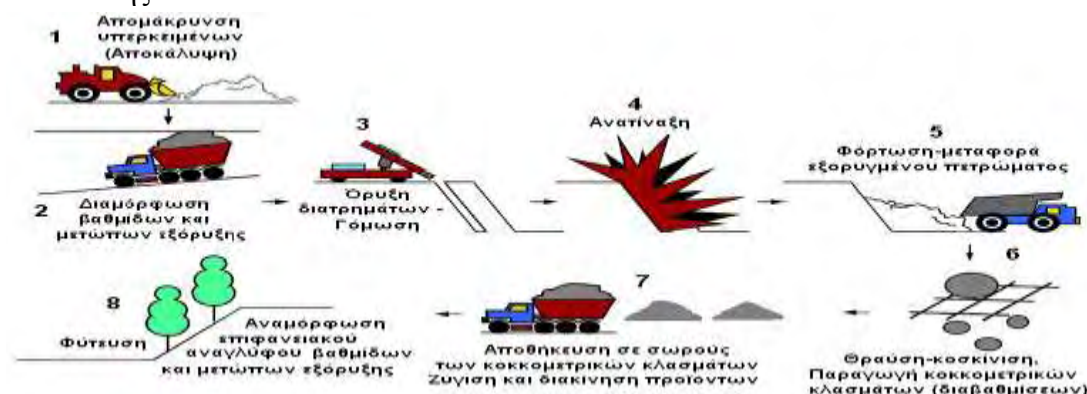
Ο όρος χαλίκι περιλαμβάνει τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους είναι μεταξύ 15,00 mm και 30,00 mm.



Εικόνα 3.1: Είδη αδρανών υλικών για την παρασκευή σκυροδέματος (άμμος – γαρμπίλι - χαλίκι) (Ματκάρης, 2009).

3.4 Διαδικασία παραγωγής των αδρανών υλικών.

Η διαδικασία παραγωγής των αδρανών υλικών ξεκινά με την εξόρυξη τους από τα λατομεία. Η σειρά των διεργασιών εξόρυξης στα λατομεία περιλαμβάνει την απομάκρυνση του υπερκείμενου εδάφους, την διαμόρφωση του λατομείου σε βαθμίδες και μέτωπα εξόρυξης, την όρυξη διατηρημάτων – γόμωση και την ανατίναξη τους και στη συνέχεια την συλλογή και την μεταφορά των εξορυγμένων πετρωμάτων για την παραγωγή κοκκομετρικών κλασμάτων, μέσω της θραύσης και της κοσκίνισης.



Εικόνα 3.2: Αλληλουχία φάσεων διαδικασίας εξόρυξης και παραγωγής αδρανών υλικών. (Τσακαλάκης, 2010).

Τα αδρανή παράγονται με τις γνωστές μεθόδους Μηχανικής Προπαρασκευής Πετρωμάτων, δηλαδή πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή θραύση και ταξινόμηση των προϊόντων κάθε φάσης θραύσης σε δονούμενα κόσκινα για την παραγωγή διαφόρων κοκκομετρικών κλασμάτων.

Η παραγωγική διαδικασία των αδρανών υλικών ολοκληρώνεται με την αποθήκευσή τους, η οποία πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε:

- Να μην διαχωρίζονται οι κόκκοι των αδρανών, όπως για παράδειγμα συμβαίνει όταν ποσότητα χονδρόκοκκου αδρανούς ρίπτεται από μεγάλο ύψος ή όταν αναμοχλεύεται.
- Να αποφεύγεται η ανάμιξη διαφορετικών ειδών αδρανών, όπως συμβαίνει για παράδειγμα όταν δύο σωροί εφάπτονται χωρίς ενδιάμεσο χώρισμα.
- Να αποφεύγεται η ρύπανσή τους από επιβλαβείς προσμίξεις (Μιχάλης και Δημητρίου, 2007).

Κατά την παραγωγική διαδικασία των αδρανών υλικών χρησιμοποιείται μηχανολογικός εξοπλισμός, ο οποίος παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.1). Η κατανάλωση καυσίμων των διαφόρων μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται είναι ανάλογη της ιπποδύναμής τους.

Πίνακας 3.1: Ισχύς λατομικού εξοπλισμού για την παραγωγή αδρανών υλικών (ιδία επεξεργασία).

ΛΑΤΟΜΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	ΙΣΧΥΣ
Εκσκαφείς	316 kW (430 hp)
Φορτωτές	239 kW (320 hp)
Φορητά Αυτοκίνητα	397 kW (540 hp)
Φορητά Dumpers	500 kW (670 hp)
Σπαστήρες	300 kW (400 hp)
Κόσκινα	37 kW (50 hp)

Η παραγωγική διαδικασία των αδρανών υλικών είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με μηχανήματα επιφανειακής εξόρυξης, όπου δεν χρησιμοποιούνται εκρηκτικά, η ποιότητα των εξορυσσόμενων προϊόντων, λόγω της δυνατότητας επιλεκτικής εξόρυξης είναι αυξημένη και το κόστος είναι μειωμένο.

Τα μηχανήματα επιφανειακής εξόρυξης έχουν δυνατότητα βάθους εξόρυξης έως 300,00 mm ή έως 830,00 m και δυνατότητα πλάτους εξόρυξης 2.200,00 mm ή 4.200,00 mm, ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος. Αντίστοιχα, η ισχύς των μηχανημάτων αυτών κυμαίνεται από 708,00 kW (963,00 PS) έως 1.194,00 kW (1.623,00 PS).



Εικόνα 3.3: Παράδειγμα λειτουργίας μηχανήματος επιφανειακής εξόρυξης για την παραγωγή αδρανών υλικών (www.helma.gr).

3.5 Ιδιότητες αδρανών υλικών.

Τα αδρανή υλικά, ανάλογα με το σκυρόδεμα που πρόκειται να παρασκευαστεί, πρέπει να έχουν και την κατάλληλη μηχανική αντοχή, η οποία εξαρτάται από την

σκληρότητα και την αντοχή του μητρικού πετρώματος. Πρέπει επίσης να παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή στην καταπόνηση σε τριβή και σε κρούση και σταθερότητα ως προς την αποσάθρωση από το νερό, τον αέρα και τον παγετό.

3.5.1 Μορφή κόκκων των αδρανών υλικών.

Οι κόκκοι των αδρανών υλικών πρέπει να έχουν κατά το δυνατόν, μορφή η οποία να πλησιάζει την κυβική ή τη σφαιρική. Ένας κόκκος αδρανούς θεωρείται ότι έχει δυσμενή μορφή, όταν η σχέση της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάστασή του ξεπερνά το λόγο 3:1.

Όταν ισχύει $b/d > 2$, οι κόκκοι ονομάζονται πλακοειδείς, ενώ όταν ισχύει $l/d > 1,5$, ονομάζονται επιμήκεις. Όπου l το μήκος του κόκκου, b το πλάτος του κόκκου και d το πάχος του κόκκου.

Το ποσοστό των κόκκων με δυσμενή μορφή δεν πρέπει να ξεπερνά το 50,00 %. Ο περιορισμός αυτός επιβάλλεται, έτσι ώστε να μειωθεί η ολική επιφάνεια των κόκκων που θα πρέπει να καλύψει η πάστα του τσιμέντου κατά την παρασκευή του σκυροδέματος.

3.5.2 Καθαρότητα – Περιεκτικότητα σε επιβλαβείς προσμίξεις.

Με την έννοια της καθαρότητας εννοείται ότι τα αδρανή δεν πρέπει να έχουν στην επιφάνειά τους, μέσα στη μάζα τους ή ανάμεσά τους ξένες ουσίες που μπορούν να εμποδίσουν την πρόσφυση με το κονίαμα ή να έχουν επιβλαβή χημική επίδραση στο τσιμέντο ή στο χαλύβδινο οπλισμό. Τα κυριότερα από τα επιβλαβή αυτά πρόσμικτα υλικά είναι :

- Η παιπάλη. Ως παιπάλη ορίζεται το λεπτότατο υλικό που περνάει από το αμερικανικό πρότυπο κόσκινο Νο 200 (75,00 μm) και προσδιορίζεται σύμφωνα με τον ελληνικό ΚΤΣ. Η παιπάλη δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16,00 % του ξηρού βάρους της άμμου και το 1,00 % των άλλων κλασμάτων (γαρμπίλι, χαλίκι). Η παιπάλη μπορεί αν είναι πηλός ή άργιλος ή σκόνη από το ίδιο πέτρωμα. Ιδιαίτερη όμως σημασία έχει η κατανομή της παιπάλης μέσα στα αδρανή. Μπορεί να είναι: α) κολλημένη επάνω στην επιφάνεια των χονδρότερων κόκκων, β) να σχηματίζει μικρούς σβόλους και γ) να είναι διασκορπισμένη ομοιόμορφα ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών. Η παιπάλη απομακρύνεται όταν τα αδρανή πλυθούν με νερό.
- Οι οργανικές προσμίξεις. Στις οργανικές προσμίξεις περιλαμβάνονται υλικά οργανικής (φυτικής ή ζωικής) προέλευσης, γαιάνθρακες και λιγνίτες. Τα οργανικά προϊόντα μπορεί να έχουν επίδραση στην πήξη της κονίας ή να δημιουργήσουν ρηγματώσεις ή αποφλοιώσεις (σκασίματα) στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η επίδρασή τους στην πήξη είναι μάλλον επιβραδυντική.
- Οι θειούχες ενώσεις. Θειούχες ενώσεις μεταξύ των αδρανών έχουν δυσμενή επίδραση στην τελική αντοχή του σκυροδέματος και σε μεγαλύτερη ποσότητα ή όταν είναι συγκεντρωμένες σε ορισμένα σημεία, μπορούν να δημιουργήσουν ρηγματώσεις, λόγω της τοπικής

διόγκωσης που προκαλούν στο σκυρόδεμα. Η επίδραση των θειούχων ενώσεων εξαρτάται από τον τύπο τους και είναι περισσότερο έντονη, όταν οι θειούχες ενώσεις είναι διαλυτές στο νερό. Η κατάσταση επιβαρύνεται στην περίπτωση που είναι δυνατή η διείσδυση νερού ή αέρα στη μάζα του σκυροδέματος. (ΚΤΣ, 1997)

3.5.3 Περιεχόμενη υγρασία αδρανών υλικών.

Τα αδρανή είναι πιθανόν να περιέχουν νερό στο εσωτερικό τους και επίσης εξωτερική επιφανειακή υγρασία, που οφείλεται στο χώρο και τον τρόπο αποθήκευσής τους. Το πορώδες των αδρανών δίνει τη δυνατότητα απορρόφησης νερού από τα ξηρά αδρανή, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται το διαθέσιμο νερό που είναι απαραίτητο για τις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου. Αντιθέτως, εάν τα αδρανή έχουν περίσσεια νερού, στο εσωτερικό αλλά και στην επιφάνειά τους, συνεισφέρουν νερό για τις αντιδράσεις ενυδάτωσης. Με βάση τα παραπάνω, τα αδρανή διακρίνονται στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες, όσον αφορά στην κατάσταση τους από πλευράς υγρασίας: α) τελείως ξηρά (έχουν υποστεί ολοκληρωτική ξήρανση), β) μερικώς ξηρά (οι εσωτερικοί πόροι είναι μερικώς γεμάτοι με νερό, ενώ η επιφάνειά τους είναι ξηρή), γ) με πόρους γεμάτους με νερό, ενώ η επιφάνειά τους δεν έχει υγρασία και δ) με πόρους γεμάτους με νερό, ενώ η επιφάνειά τους είναι καλυμμένη με στρώμα νερού.

Από τις παραπάνω κατηγορίες, η πλέον χαρακτηριστική είναι η κατάσταση των αδρανών με πόρους γεμάτους με νερό και χωρίς υγρασία στην επιφάνεια, η οποία είναι μια κατάσταση ισορροπίας, όπου τα αδρανή ούτε απορροφούν αλλά ούτε και αποδίδουν νερό στην πάστα του τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010).

3.5.4 Χημική συμπεριφορά.

Σχετικά με τη χημική συμπεριφορά θα πρέπει να ελέγχεται κατά πόσον τα αδρανή περιέχουν ποιότητες πυριτίου, επιρρεπείς σε προσβολή από αλκάλια (Na_2O και K_2O) προέρχονται από το τσιμέντο, καθώς το σκυρόδεμα εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ο κίνδυνος αντίδρασης μεταξύ των αλκαλίων και των αδρανών, με αποτέλεσμα τη φθορά ή και την καταστροφή του σκυροδέματος (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

Τα αδρανή υλικά που είναι χημικά σταθερά, δεν αντιδρούν χημικά με το τσιμέντο με τρόπο επιβλαβή, ούτε και επηρεάζονται χημικά από φυσικές εξωτερικές επιρροές. Σε ορισμένες περιοχές, είναι πιθανόν να παρατηρηθούν αντιδράσεις μεταξύ των αδρανών υλικών του σκυροδέματος, που οφείλονται σε συγκεκριμένα μέταλλα και αλκάλια, λόγω εσωτερικών ή εξωτερικών αιτιών. Παράδειγμα τέτοιας αντίδρασης αποτελεί η αντίδραση μεταξύ αλκαλίων και πυριτίου, που περιλαμβάνει συγκεκριμένα ορυκτά του πυριτίου που υπάρχουν σε κάποια αδρανή υλικά. Η διαδικασία της αντίδρασης ξεκινά όταν αλκάλια των συστατικών του σκυροδέματος (οξειδία νατρίου και καλίου), εισέρχονται στο διάλυμα και ενώνονται με δραστικά πυριτικά ορυκτά, για τον σχηματισμό ενός gel αλκαλίου – πυριτίου, που έχει την τάση να απορροφά νερό και να διογκώνεται. Η διογκωση αυτή είναι πιθανό να προκαλέσει υπερβολική διαστολή και ράγισμα του σκυροδέματος. (ACI, 2007).

3.6 Ποιοτικός έλεγχος αδρανών υλικών.

Ο ποιοτικός έλεγχος των αδρανών υλικών περιλαμβάνει τόσο τον έλεγχο του μητρικού πετρώματος από το οποίο προέρχονται τα αδρανή, όσο και τον έλεγχο των ίδιων των αδρανών.

Στην πρώτη κατηγορία ελέγχων μεταξύ άλλων, περιλαμβάνονται και:

- Η μηχανική αντοχή του μητρικού πετρώματος.
- Η δοκιμή υγείας ή αντοχή σε αποσάθρωση του πετρώματος.
- Η αντοχή σε τριβή και κρούση.
- Η ορυκτολογική σύσταση.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα χαρακτηριστικά των αδρανών και περιλαμβάνει:

- Την κοκκομετρική ανάλυση.
- Τον προσδιορισμό των ειδικών βαρών, του φαινομένου βάρους και της υδατοαπορροφητικότητας.
- Τον προσδιορισμό της παιάλης (Εγχειρίδιο Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 2010).

Προσδιορισμός αντοχής σε τριβή και κρούση αδρανών υλικών.

Ο προσδιορισμός της αντοχής των αδρανών υλικών σε τριβή και κρούση πραγματοποιείται με τη μηχανή Los Angeles. Η δοκιμή αυτή θεωρείται η πλέον κατάλληλη για τον προσδιορισμό της σκληρότητας, της δυσθραυστότητας και του ποσοστού μαλακών τεμαχίων των αδρανών υλικών από οποιαδήποτε άλλη δοκιμή, καθώς είναι κατάλληλη τόσο για τα θραυστά όσο και για τα φυσικά αδρανή, η δράση της επί των αδρανών είναι πολύ ισχυρή ώστε να αποκαλύπτεται οποιαδήποτε αδυναμία του υλικού, είναι αρκετά σύντομη και δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του ειδικού βάρους των αδρανών, εξαιτίας της μεγάλης χωρητικότητας του κυλίνδρου της μηχανής.

Η μηχανή Los Angeles αποτελείται από ένα χαλύβδινο κύλινδρο, κλειστό στις βάσεις του, εσωτερικής διαμέτρου 710,00 mm και μήκους 510,00 mm. Η μηχανή στηρίζεται κατάλληλα ώστε να μπορεί να περιστρέφεται οριζόντια. Στην πλευρική επιφάνεια του κυλίνδρου υπάρχει θυρίδα από την οποία εισάγεται το δείγμα και η οποία κλείνει αεροστεγώς. Η θυρίδα είναι σχεδιασμένη έτσι που να διατηρεί την ίδια καμπυλότητα του κυλίνδρου. Στην εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου υπάρχει χαλύβδινη προεξοχή μήκους όσο και αυτό του κυλίνδρου και πλάτους 89,00 mm, η οποία έχει την διεύθυνση της ακτίνας του κυλίνδρου. Εντός της μηχανής εισάγονται χαλύβδινες σφαίρες διαμέτρου περίπου 47,50 mm και βάρους 390,00 – 445,00 gr η κάθε μία. Τα προς εξέταση δείγματα επιλέγονται από καθαρό αδρανές υλικό, το οποίο έχει υποστεί ξήρανση στους 105–110 °C. Η συσκευή Los Angeles πληρεί τα εξής πρότυπα: EN 12697–17, EN 12697–43, EN 1097–2 και ASTM C131 (Εγχειρίδιο Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 2010).



Εικόνα 3.4: Συσκευή Los Angeles για τον προσδιορισμό των αντοχών σε τριβή και κρούση των αδρανών υλικών (<http://www.controls.it>).

Δοκιμή ισοδύναμου άμμου.

Η δοκιμή του ισοδύναμου άμμου (sand equivalent) εκτελείται στο εργαστήριο ή στο εργοτάξιο επί όλων των αδρανών υλικών που προορίζονται για κατασκευή υποβάσεων, βάσεων και ασφαλτικών επιστρώσεων οδών, όπως και για την παρασκευή σκυροδέματος. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται για να διαπιστωθεί η παρουσία επιβλαβών ποσοτήτων αργίλου στα αδρανή υλικά. Η παρουσία αργίλου στα αδρανή υλικά είναι ανεπιθύμητη, διότι προκαλεί διόγκωση μετά από κορεσμό του αδρανούς με νερό και περιβάλλει τους κόκκους του αδρανούς, με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως λιπαντικό. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε δείγμα υλικού διερχόμενο από κόσκινο Νο 4 (άμμος), το οποίο έχει προηγουμένως υποστεί ξήρανση στους 105 °C και υπολογίζεται η κατ' όγκο σχέση της ποσότητας της αργίλου προς την ποσότητα των κόκκων της άμμου. Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιείται για την δοκιμή αυτή είναι υδατικό διάλυμα που περιέχει άνυδρο χλωριούχο ασβέστιο, γλυκερίνη και φορμαλδεΰδη. Το χλωριούχο ασβέστιο και η γλυκερίνη προστίθενται στο διάλυμα για να επιταχύνουν την καθίζηση των κόκκων της αργίλου, ενώ η φορμαλδεΰδη προστίθεται για αποστείρωση του διαλύματος. Σχετική προδιαγραφή για την εκτέλεση της δοκιμής είναι η ASTM D2419/1995.

Το ισοδύναμο της άμμου υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$S.E. = (h_{sand} / H_{clay}) * 100$$


Εικόνα 3.5: Δοκιμή ισοδύναμου άμμου (<http://pavementinteractive.org>).

Δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση (υγεία).

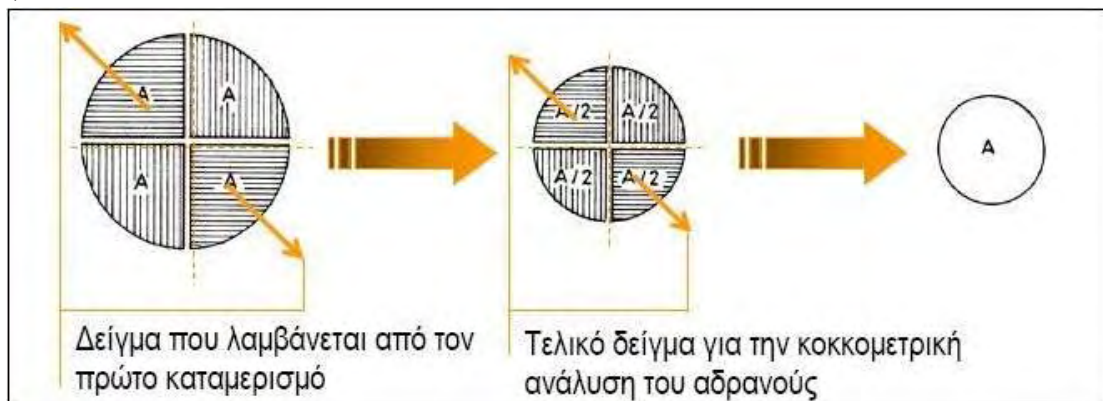
Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι να εκτιμηθεί η ανθεκτικότητα των αδρανών υλικών όταν αυτά υπόκεινται στις καιρικές διαβρώσεις, στις οποίες εκτίθεται το σκυρόδεμα και άλλες κατασκευές. Αυτό επιτυγχάνεται με εμβάπτιση των δειγμάτων σε κορεσμένα διαλύματα θειικού νατρίου, που ακολουθείται από ξήρανση σε φούρνο με σκοπό την μερική ή ολική αφυδάτωση των αλάτων που έχουν εισχωρήσει στους διαπερατούς πόρους του υλικού. Η εσωτερική δύναμη διαστολής που προκύπτει στη συνέχεια από την ενυδάτωση των αλάτων με επανεμβάπτιση, προσομοιώνει τη διαστολή του νερού σε συνθήκες παγετού. Σχετική προδιαγραφή για την εκτέλεση της δοκιμής είναι η AASHTO:104–94 (Εγχειρίδιο Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 2010).

Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών υλικών.

Κοκκομετρική ανάλυση ενός αδρανούς υλικού είναι ο προσδιορισμός της αναλογίας με την οποία περιέχονται στο υλικό τα διάφορα μεγέθη κόκκων του αδρανούς. Τα αδρανή υλικά που προέρχονται από τα λατομεία είναι ένα μίγμα, το οποίο περιέχει κόκκους όλων των μεγεθών. Για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής σύνθεσης του αδρανούς λαμβάνεται ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του υλικού και κοσκινίζεται με όλη τη σειρά των αντίστοιχων πρότυπων κόσκινων. Η απαιτούμενη ποσότητα του υλικού εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του και καθορίζεται ως εξής (www.ntua.gr):

- Για άμμο – 20,00 kg.
- Για γαρμπίλι – 30,00 kg.
- Για χαλίκι – 40,00 kg.

Η δειγματοληψία της αντιπροσωπευτικής ποσότητας του αδρανούς γίνεται με τη μέθοδο του τεταρτομερισμού. Από διάφορες θέσεις του σωρού των αδρανών υλικών λαμβάνεται η τετραπλάσια ποσότητα από την απαιτούμενη για την κοκκομετρική ανάλυση. Η ποσότητα αυτή ανακατεύεται πολύ καλά και απλώνεται ώστε να λάβει κατά το δυνατόν τη μορφή ισοπαχούς δίσκου. Ο δίσκος αυτός διαιρείται σε τεταρτοκύκλια με ένα κατάλληλο όργανο, το σταυρό διαχωρισμού (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: Δειγματοληψία αδρανών υλικών με τη μέθοδο του τεταρτομερισμού (www.ntua.gr).

Στη συνέχεια, λαμβάνονται τα αδρανή από δύο κατά κορυφή τεταρτοκύκλια, σχηματίζεται ένας νέος δίσκος και επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία. Η ποσότητα η οποία προέρχεται από δύο κατά κορυφή τεταρτοκύκλια του δεύτερου

δίσκου, είναι το αντιπροσωπευτικό δείγμα για την κοκκομετρική ανάλυση του αδρανούς υλικού.

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών υλικών γίνεται με κοσκίνισμα στο χέρι ή με ηλεκτροκίνητες συσκευές, στις οποίες τοποθετούνται διαδοχικά τα πρότυπα κόσκινα με σειρά μεγέθους οπών. Κάτω τοποθετείται το «τυφλό» κόσκινο, δηλαδή το κόσκινο χωρίς οπές, ενώ τελευταίο στο επάνω μέρος τοποθετείται το κόσκινο με τη μεγαλύτερη διάμετρο οπών. Το κοσκίνισμα διαρκεί μέχρις ότου περάσουν από τα αντίστοιχα κόσκινα και οι πιο λεπτοί κόκκοι του υλικού. Υπάρχουν δύο σειρές πρότυπων κόσκινων, σύμφωνα με τους γερμανικούς και με τους αμερικάνικους κανονισμούς.



Εικόνα 3.7: Συσκευή κοσκίνισματος αδρανών υλικών (www.teicrete.gr).

Με το κοσκίνισμα προσδιορίζονται τα ποσοστά διόδου (D), % του αδρανούς από κάθε πρότυπο κόσκινο κ.β.. Η γραφική παράσταση των ποσοστών αυτών σε σχέση με τις διαμέτρους των οπών των προτύπων κόσκινων, οι οποίες δίνονται σε ημιλογαριθμική κλίμακα, απεικονίζει την κοκκομετρική γραμμή του αδρανούς υλικού. Αυτή η γραμμή απεικονίζεται στο αντίστοιχο κοκκομετρικό διάγραμμα, ανάλογα με τη μέγιστη διάμετρο των κόκκων του αδρανούς υλικού, οπότε και διαπιστώνεται αν το αδρανές υλικό είναι κατάλληλο ή όχι να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή κονιαμάτων ή σκυροδεμάτων. Οι κοκκομετρικές γραμμές των αδρανών υλικών είναι δυνατόν να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς. Η συνεχής κοκκομετρική γραμμή, σημαίνει ότι το αδρανές υλικό περιέχει κόκκους όλων των διαβαθμίσεων. Η ασυνεχής κοκκομετρική καμπύλη, σημαίνει ότι το αδρανές υλικό περιέχει μόνο ορισμένα μεγέθη κόκκων.

Η κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών υλικών επηρεάζει όλες σχεδόν τις ιδιότητες του κονιάματος (πυκνότητα, αντοχή, υδατοπερατότητα, αντοχή σε παγετό, αντοχή σε φθορά), την ποιότητα του κονιάματος, αλλά και το κόστος της κατασκευής.

Οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν τα αδρανή υλικά έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται στις διάφορες κατασκευές είναι οι εξής:

- Ικανοποιητική αντοχή.
- Σταθερότητα απέναντι στην αποσάθρωση (στον αέρα, στο νερό και στον παγετό).
- Κόκκοι με μορφή σφαιροειδή ή κυβοειδή.
- Καθορισμένη περιεκτικότητα σε επιβλαβείς προσμίξεις.

Προσδιορισμός ειδικού βάρους και υδατοαπορροφητικότητας χονδρόκοκκων αδρανών.

Κατά την δοκιμή αυτή ελέγχονται τα χονδρόκοκκα αδρανή (χαλίκι, γαρμπίλι) για να προσδιοριστούν το ειδικό τους βάρος, το φαινόμενο βάρος και η υγρασία απορρόφησης. Για κάθε κλάσμα αδρανούς, τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται συγκρίνοντας τρία βάρη αυτού, το βάρος του κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού δείγματος στον αέρα, το βάρος του κορεσμένου δείγματος στο νερό και το βάρος του ξηρού δείγματος (Εγχειρίδιο Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 2010).

Προσδιορισμός ειδικού βάρους και υδατοαπορροφητικότητας λεπτόκοκκων αδρανών.

Κατά τη δοκιμή αυτή ελέγχονται τα λεπτόκοκκα αδρανή (άμμος) για να προσδιοριστούν το ειδικό τους βάρος, το φαινόμενο ειδικό βάρος και η υγρασία απορρόφησης. Καθένα από τα μεγέθη αυτά υπολογίζεται συγκρίνοντας τρία βάρη, το βάρος του κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού δείγματος στον αέρα, το βάρος του κορεσμένου δείγματος στο νερό και το βάρος του ξηρού δείγματος.

Προσδιορισμός της παιπάλης στην άμμο.

Η παιπάλη είναι δυνατόν να είναι άργιλος ή σκόνη από το ίδιο το υλικό. Βρίσκεται είτε προσκολλημένη στους κόκκους του υλικού εμποδίζοντας την πρόσφυση των αδρανών με το κονίαμα, είτε σχηματίζοντας συσσωματώματα δημιουργώντας αδύνατα σημεία στη μάζα του σκυροδέματος, ή ακόμη διασκορπισμένη ομοιόμορφα μέσα στη μάζα του αδρανούς. Η παιπάλη έχει γενικά την ιδιότητα να αυξάνει την αναγκαία ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα και να ελαττώνει αντίστοιχα την αντοχή του. Ενώ παράλληλα, συντελεί στην αύξηση της πλαστικότητας του μίγματος αδρανών – κονιάματος. Έτσι σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ '97, για τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό παιπάλης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16,00 % για την άμμο και το 1,00 % για τα χονδρόκοκκα υλικά.

4. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

4.1 Εισαγωγή.

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, αδρανών και νερού και το οποίο στερεοποιείται με τη χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στη μάζα του τα αδρανή υλικά. Ο όρος αδρανή περιλαμβάνει γενικά την άμμο, το γαρμπίλι και τα χαλίκια (σκύρα). Τόσο το τσιμέντο όσο και τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του σκυροδέματος, πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των αντίστοιχων κανονισμών. Το νερό ανάμιξης πρέπει να είναι καθαρό, να μην περιέχει δηλαδή επιβλαβείς ουσίες, οι οποίες θα προκαλούσαν προβλήματα στη σκλήρυνση, στην αντοχή, στην προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση ή θα επηρεάζουν δυσμενώς άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος (Κορωνάιος και Πουλάκος, 2006). Εκτός από τα υλικά αυτά, με το νέο ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 206-1), προβλέπεται η προσθήκη και άλλων συστατικών (βελτιωτικά πρόσμικτα και πρόσθετα συστατικά), τα οποία τροποποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες του σκυροδέματος.

Για να παρασκευασθεί ένα καλής ποιότητας σκυρόδεμα, δεν αρκεί μόνο η καλή διαλογή και σύνθεση των συστατικών του. Εξίσου σημαντική είναι η διάστρωσή του και η συντήρησή του, σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Στην Ελλάδα σχετικές λεπτομερείς οδηγίες υπάρχουν στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ., 1997), όπου επίσης δίνονται πολλές πληροφορίες για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος.

Η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν το σκυρόδεμα, δεν είναι για κανένα άλλο υλικό τόσο απαραίτητη όσο για αυτό. Θεωρείται το σημαντικότερο δομικό υλικό και έχει κυρίαρχη θέση στον τομέα των κατασκευών, τόσο ως άοπλο όσο και ως οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς είναι δυνατόν να αντικαταστήσει εντελώς τους φυσικούς λίθους και το ξύλο (εκτός από τις περιπτώσεις αισθητικής και διακόσμησης), είναι εύπλαστο και είναι δυνατόν να λάβει οποιοδήποτε σχήμα και μέγεθος, παρουσιάζει μεγάλες αντοχές, δεν φθείρεται εύκολα, δεν φλέγεται, συνεργάζεται εύκολα με άλλα υλικά (όπως το ο χάλυβας), μεταφέρεται και διαστρώνεται με ευκολία και αποτελεί ένα οικονομικό υλικό. Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε ένα αρκετά εκτεταμένο εύρος διαφορετικών ποιοτήτων για το σύνολο σχεδόν των κατασκευαστικών έργων. Η σπουδαιότητα των ιδιοτήτων του σκυροδέματος στην ασφάλεια ενός δομικού έργου είναι διαφορετική και εξαρτάται από το είδος της κατασκευής, το περιβάλλον όπου αυτή θα εκτεθεί και την ειδική χρήση που θα έχει. Έτσι, για παράδειγμα διαφορετικές είναι οι απαιτήσεις για το σκυρόδεμα με το οποίο θα κατασκευασθεί ένα φράγμα, διαφορετικές για την κατασκευή μιας οικοδομής ή μιας υποθαλάσσιας κατασκευής. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος επηρεάζονται από τη μεθοδολογία της παρασκευής του και την ποιότητα των πρώτων υλών και μεταβάλλονται σημαντικά σε συνάρτηση με τη βασική ιδιότητά του, που είναι οι αντοχές σε μηχανική καταπόνηση.

4.2 Παραγωγή σκυροδέματος.

Οι πρώτες ύλες του σκυροδέματος, εκτός από το τσιμέντο και τα αδρανή υλικά, περιλαμβάνουν το νερό ανάμιξης και σε κάποιες περιπτώσεις βελτιωτικά (χημικά) πρόσμικτα και πρόσθετα συστατικά.

4.2.1 Το νερό ανάμιξης.

Το νερό είναι ένα από τα δύο ενεργά συστατικά του σκυροδέματος. Μαζί με το τσιμέντο λαμβάνει μέρος σε σειρά χημικών αντιδράσεων που οδηγούν, με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων, στην πήξη και τη σκλήρυνση του μίγματος. Η βασική απαίτηση για το νερό είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης.

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος υπάρχει μία ανοχή σχετικά με την ποιότητά του, σε αντίθεση με τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και αυτό γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμιξης και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν. Στην περίπτωση όμως εξωτερικών νερών, όπως το θαλασσινό νερό ή τα νερά των αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα νερά ανανεώνονται συνεχώς.

Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής είτε την καθυστέρηση της πήξης είναι οι ακόλουθες: η ζάχαρη, τα οξέα, όπως το ανθρακικό οξύ ή άλλα οργανικής προέλευσης, τα λάδια, τα λίπη και οι οργανικές ουσίες.

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008, ενώ η χρησιμοποίηση νερού από ανακύκλωση πρέπει να γίνεται με βάση το Παράρτημα Α, της ίδιας προδιαγραφής. (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

Η καταλληλότητα του νερού ανάμιξης για την παραγωγή σκυροδέματος εξαρτάται από την προέλευσή του. Το πρότυπο EN 1008 κατηγοριοποιεί τους εξής τύπους νερού:

- Πόσιμο νερό: κατάλληλο για το σκυρόδεμα, δεν απαιτείται έλεγχός του.
- Υπόγεια ύδατα: είναι πιθανόν να είναι κατάλληλα για το σκυρόδεμα, πρέπει όμως πρώτα να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.
- Νερό φυσικών πόρων και νερό βιομηχανικών διεργασιών: είναι πιθανόν να είναι κατάλληλα για το σκυρόδεμα, πρέπει όμως πρώτα να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.
- Θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό: είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε άοπλο σκυρόδεμα, δεν είναι όμως κατάλληλο για οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Το μέγιστο επιτρεπόμενο περιεχόμενο σε χλώριο στο σκυρόδεμα, πρέπει να τηρείται για σκυρόδεμα με χαλύβδινο οπλισμό ή εμβαπτισμένα μεταλλικά τμήματα.
- Νερά αποβλήτων: δεν είναι κατάλληλα για το σκυρόδεμα (Εγχειρίδιο Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2010, Hirschi et al., 2007).

4.2.2 Βελτιωτικά (χημικά) πρόσμικτα.

Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα είναι τα υλικά σε υγρή μορφή ή σκόνη που προστίθενται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του σκυροδέματος, με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά κυρίως του νωπού, αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος με χημικό ή/και φυσικό τρόπο. Αποτελούνται από μη επικίνδυνες πολυμερείς ενώσεις, καθώς περιλαμβάνουν ουσίες όπως σάκχαρα, αλκοόλες ή ανόργανα / οργανικά άλατα, οι οποίες είναι μη τοξικές.

Τα βελτιωτικά (χημικά) πρόσμικτα σκοπεύουν σε μεταβολή (βελτίωση) των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, όπως:

- Η εργασιμότητα (μεταβολή της σύστασης και του χρόνου εφαρμογής).
- Η ποιότητα (μεταβολή της ανθεκτικότητας).
- Η αντοχή (αντοχή υψηλότερων τιμών σε συνδυασμό με την μεταβολή του απαιτούμενου χρόνου επίτευξης).
- Η διαχείριση (βελτίωση των συνθηκών μεταφοράς και διάστρωσης).
- Η ανθεκτικότητα (επιμήκυνση του χρόνου ζωής του σκυροδέματος).
- Το περιβάλλον (μείωση απαιτήσεων σε νερό και ενέργεια).

Η επιλογή του κατάλληλου χημικού πρόσμικτου πρέπει να ακολουθεί τα εξής στάδια:

- Προσδιορισμό των απαιτήσεων συμπεριφοράς του σκυροδέματος.
- Έλεγχο της διαδικασίας μίξης με επιλογή των κατάλληλων υλικών.
- Εκτέλεση εργαστηριακών ή / και εργοταξιακών δοκιμών.
- Προσδιορισμό μεταβολής του κόστους, λόγω χρήσης πρόσμικτου και των συγκριτικών πλεονεκτημάτων για τον χρήστη.

Ανάλογα με την κύρια δράση τους τα υλικά αυτά κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες: ρευστοποιητικά, αερεκτικά, επιβραδυντικά, επιταχυντικά και στεγανωτικά. Υπάρχουν επίσης και κάποια άλλα ειδικά πρόσμικτα υλικά, όπως τα αντιπαγετικά, τα διογκωτικά και τα αντιδιαβρωτικά.

Τα ρευστοποιητικά στηρίζονται στη μείωση της επιφανειακής τάσης του νερού και των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου, με αποτέλεσμα όσο διαρκεί η δράση τους να αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος. Παρόμοια είναι η δράση των απλών πλαστικοποιητών, οι οποίοι βοηθούν στην ενίσχυση της πλαστικότητας του σκυροδέματος, της ιδιότητας δηλαδή του υλικού να διατηρεί το σχήμα του μετά από διαμόρφωση. Τα υλικά αυτά λύνουν το πρόβλημα της εργασιμότητας και κατ' επέκταση της αντλησιμότητας και διάστρωσης του σκυροδέματος, χωρίς την επιζήμια αύξηση του νερού ανάμιξης, ενώ έχουν επιπρόσθετα και επιβραδυντική δράση. Τέτοια υλικά είναι: α) οι μειωτές νερού, οι οποίοι καθιστούν δυνατή τη μείωση του περιεχόμενου νερού σε ένα μίγμα χωρίς επίδραση στη συνεκτικότητά του ή αυξάνουν το εργάσιμο του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού ή επιτυγχάνουν και τα δύο αποτελέσματα, β) οι υπερρευστοποιητές, οι οποίοι καθιστούν δυνατή τη σημαντική μείωση του περιεχόμενου νερού σε ένα δεδομένο μίγμα σκυροδέματος, χωρίς επίδραση στη συνεκτικότητά του ή αυξάνουν σημαντικά το εργάσιμο του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού ή επιτυγχάνουν και τα δύο αποτελέσματα και γ) οι ρυθμιστές

ξώδους, οι οποίοι μειώνουν το νερό ανάμιξης που προκύπτει λόγω της εξίδρωσης στο νωπό σκυρόδεμα.

Τα αερακτικά είναι υγρές χημικές ενώσεις που προκαλούν την ανάπτυξη μικρών και ομοιόμορφα κατανεμημένων φυσαλίδων αέρα, μεγέθους 0,02–0,20 mm, στη δομή του σκυροδέματος και αυξάνουν τον περιεχόμενο αέρα στα επίπεδα του 6,00–8,00 %. Με στόχο τον έλεγχο των φαινομένων ‘αποσάθρωσης’, λόγω γένεσης εσωτερικών τάσεων σε περιπτώσεις συχνού παγώματος και τήξης του νερού του σκυροδέματος και σε περιπτώσεις επιφανειακής φθοράς του σκυροδέματος από τη δράση χημικών αντιπαγωτικών. Στις περιπτώσεις αυτές, οι μικροσκοπικές φυσαλίδες αέρα, στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος, παραλαμβάνουν και απορροφούν τις δημιουργούμενες τάσεις. Έχουν επίσης και ρευστοποιητική δράση.

Τα επιβραδυντικά υλικά στηρίζονται στην απομόνωση των ταχύπηκτων αργιλικών ενώσεων και κυρίως του αργιλικού τριασβεστίου. Η κύρια δράση τους είναι προς την κατεύθυνση της επιμήκυνσης του χρόνου, κατά μία ώρα ή και περισσότερο, εντός του οποίου το έτοιμο σκυρόδεμα πρέπει να μεταφερθεί, να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί. Συνήθως προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την παραγωγή του, με στόχο να επιβραδύνουν την πήξη και τη σκλήρυνσή του, ιδιαίτερος όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες κατά τη σκυροδέτηση, ώστε να ελεγχθούν φαινόμενα επιτάχυνσης των αντιδράσεων ενυδάτωσης. Χρησιμοποιούνται επίσης, όταν για αισθητικούς λόγους της εμφάνισης του σκυροδέματος απαιτείται αρκετός χρόνος για τη διαμόρφωση της εμφανούς επιφάνειάς του.

Τα επιταχυντικά υλικά παρουσιάζουν αντίθετη δράση από τα επιβραδυντικά, διευκολύνουν δηλαδή την ενυδάτωση του αργιλικού τριασβεστίου ή/και των πυριτικών ενώσεων. Προστίθενται στο σκυρόδεμα με στόχο να μειώσουν τον χρόνο πήξης και σκλήρυνσης του σκυροδέματος και να επιταχύνει το χρόνο απόκτησης της πρώιμης αντοχής του και η χρήση τους ενδείκνυται σε περιπτώσεις που επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη σκυροδέτηση. Τέτοια υλικά είναι: α) οι επιταχυντές πήξης, οι οποίοι μειώνουν το χρόνο που απαιτείται για την αρχική πήξη αυξάνοντας τις πρώιμες αντοχές και β) οι επιταχυντές σκλήρυνσης, οι οποίοι επιταχύνουν τις πρώιμες αντοχές με ή χωρίς επίδραση στο χρόνο πήξης.

Τα στεγανωτικά υλικά μειώνουν την ποσότητα του νερού, το οποίο απορροφάται ή εισχωρεί στο σκυρόδεμα, αυξάνοντας τη στεγανότητά του. Αποφεύγεται η δημιουργία μικροκοιλοτήτων στη μάζα του σκυροδέματος, καθώς και οι μικρορηγματώσεις και μειώνεται σημαντικά το ποσοστό των πόρων και των τριχοειδών αγγείων. Είναι όμως πιθανόν, να μεταβληθεί η χρονική εξέλιξη της πήξης και να μειωθεί η αντοχή του σκυροδέματος.

Οι κανονισμοί ορίζουν την απαιτούμενη ελάχιστη βελτιωτική δράση καθώς και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο αλλοίωσης των άλλων ιδιοτήτων. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και συμμόρφωση με τα επιτρεπόμενα όρια προσθήκης των υλικών αυτών στο σκυρόδεμα, διότι εκτός από τη βελτιωτική δράση έχουν και άλλες δυσμενείς επιδράσεις, που σχετίζονται για παράδειγμα με τη μείωση της αντοχής, την αύξηση της εκλυόμενης θερμότητας, την αύξηση της συστολής ξήρανσης κ.α.. Επίσης, η παρουσία χλωρίου στα πρόσμικτα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη στη διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EN 206–1 και

βάσει του προτύπου EN 934–2, καθορίζονται οι χρήσεις των πρόσμικτων και η επιτρεπόμενη δοσολογία πρόσμικτων ισούται με $\leq 5,00$ % κ.β. τσιμέντου. Η ολική ποσότητα των πρόσμικτων δεν πρέπει να ξεπερνά την μέγιστη δόση που συνίσταται από τον κατασκευαστή και σε κάθε περίπτωση να μην ξεπερνά τα 50,00 gr/kg τσιμέντου. Αν χρησιμοποιηθούν σε πολύ μικρά ποσά, όπως για παράδειγμα 2,00 gr/kg τσιμέντου, θα πρέπει να προστεθούν με μορφή αιωρήματος σε νερό. Εάν η τελική ποσότητα υγρών πρόσμικτων υπερβαίνει τα 3,00 lt/m³ σκυροδέματος, το νερό αυτό θα πρέπει να συνυπολογιστεί στο λόγο νερού / τσιμέντου (Κεχαγιά κ.α., 2008, Hirschi et al., 2007).

4.2.3 Πρόσθετα συστατικά.

Τα πρόσθετα συστατικά είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα με στόχο τη βελτίωση ή τη ρύθμιση κάποιων ιδιοτήτων και προστίθενται στο σκυρόδεμα σε αρκετά μεγάλες αναλογίες (περίπου 5–20 %). Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206–1 αναφέρεται σε δύο κατηγορίες ανόργανων πρόσθετων σκυροδέματος, αυτά του Τύπου I και αυτά του Τύπου II. Τα πρόσθετα του Τύπου I, είναι ανενεργά υλικά, όπως ασβεστολιθική πούδρα, χαλαζιακή σκόνη και χρωστικές ουσίες. Τα πρόσθετα υλικά του Τύπου II, είναι ποζολανικά ή λανθάνοντα υδραυλικά υλικά, όπως φυσικές ποζολάνες, ιπτάμενες τέφρες και πυριτική πούδρα.

Η πούδρα αδρανών, ασβεστολιθική ή χαλαζιακή, χρησιμοποιείται για τη βελτίωση μιγμάτων με χαμηλή περιεκτικότητα σε λεπτά αδρανή. Τα ανενεργά αυτά υλικά χρησιμοποιούνται για βελτίωση της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών. Η απαίτηση σε νερό είναι αυξημένη, ιδιαίτερος στην περίπτωση της ασβεστολιθικής πούδρας.

Οι χρωστικές ουσίες χρησιμοποιούνται για τον χρωματισμό του σκυροδέματος, πρόκειται για χρωστικά μεταλλικά οξείδια και κυρίως οξείδια του σιδήρου. Προστίθενται σε ποσοστά της τάξης του 0,50–5,00 % κ.β. του τσιμέντου. Πρέπει να παραμένουν χρωματικώς σταθερά στη μάζα του σκυροδέματος και ανενεργά στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος. Με χρήση ορισμένων τύπων χρωστικών ουσιών μπορεί να αυξηθεί η απαίτηση του μίγματος σε νερό.

Η ιπτάμενη τέφρα είναι στάχτη που προέρχεται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από την καύση γαιανθράκων και χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο τόσο στο τσιμέντο όσο και στο σκυρόδεμα. Η σύνθεση της εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του γαιάνθρακα, την προέλευση και τις συνθήκες καύσης του.

Η πυριτική πούδρα (παιπάλη) αποτελείται κυρίως από σφαιρικά σωματίδια άμορφου διοξειδίου του πυριτίου, προερχόμενα από την παραγωγή πυριτίου και κραμάτων πυριτίου. Έχει ειδική επιφάνεια περίπου 18,00–25,00m²/gr και αποτελεί μία πολύ ισχυρής δραστικότητας ποζολάνη. Τυπικές δοσολογίες πυριτικής πούδρας κυμαίνονται μεταξύ 5,00–10,00 % κ.β. τσιμέντου (Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος Π.Ι., 2010).

4.3 Σύνθεση σκυροδέματος – Αναλογία ανάμιξης των υλικών.

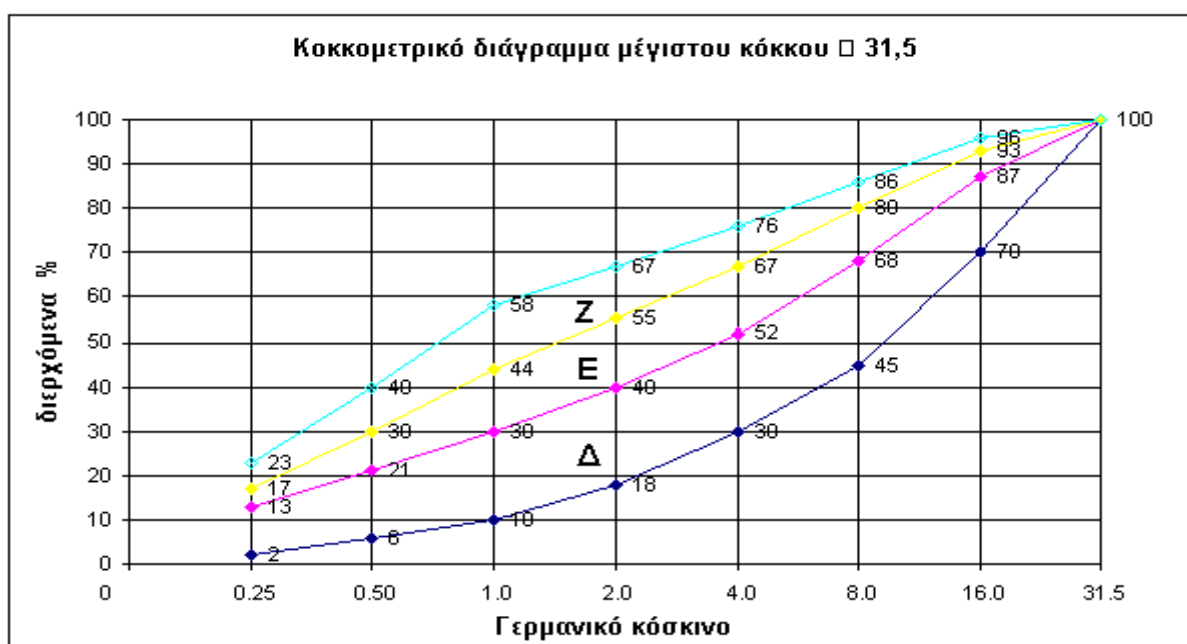
Με τον όρο μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος ορίζεται η επιλογή και η αναλογία ανάμιξης των συστατικών του (τσιμέντο, νερό, αδρανή υλικά και τυχόν

πρόσθετα ή πρόσμικτα συστατικά), έτσι ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί από τον κατασκευαστή ή τον υπεύθυνο μηχανικό του έργου. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι η εξής:

- Επιλέγεται η κατηγορία του σκυροδέματος ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Έτσι προδιαγράφονται ο τύπος του τσιμέντου, ο μέγιστος λόγος νερού/τσιμέντου, η ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών. Λαμβάνονται υπόψη τυχόν περιορισμοί ή άλλοι κανόνες που ορίζονται στον Κ.Τ.Σ. '97.
- Ορίζεται η κατηγορία του σκυροδέματος με βάση τις αντοχές θλίψης ή και την κατηγορία κάθισης, ανάλογα με τις απαιτήσεις για το σχετικό έργο.
- Προσδιορίζεται ο λόγος νερού / τσιμέντου και η περιεκτικότητα σε τσιμέντο με βάση υπάρχοντα εργαστηριακά δεδομένα ή με πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών.
- Προσδιορίζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών όπως και η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε κοκκομετρικού κλάσματος στο σκυρόδεμα.

Ενδεικτικό παράδειγμα υπολογισμού των απαιτούμενων ποσοτήτων υλικών ανά m^3 σκυροδέματος.

Έστω ότι απαιτείται σκυρόδεμα με λόγο νερού/τσιμέντου ίσο με 0,60, περιεκτικότητα σε τσιμέντο $330,00 \text{ kg}/m^3$ σκυροδέματος, μέγιστος κόκκος αδρανών 31,50 mm και κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών εντός της υποζώνης Δ του Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 31,50 mm. <http://www.teicrete.gr>.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πυκνότητα του τσιμέντου είναι $3,15 \text{ ton}/m^3$, η πυκνότητα των αδρανών είναι $2,60 \text{ ton}/m^3$, η πυκνότητα του νερού είναι $1,00 \text{ ton}/m^3$ και ο περιεχόμενος αέρας στο σκυρόδεμα ανέρχεται σε 1,00 %, ισχύει ότι σε $1,00 \text{ m}^3$ σκυροδέματος περιέχονται:

$$\text{Τσιμέντο: } 0,33 \text{ ton}/(3,15 \text{ ton}/m^3)=0,105 \text{ m}^3.$$

Νερό: $0,6 * 0,33 \text{ ton} = 0,198 \text{ ton}$ ή $0,198 \text{ m}^3$.

Αέρας: $1,00 \%$ ή $0,010 \text{ m}^3$.

Αδρανή: $(1 - 0,105 - 0,198 - 0,010) \text{ m}^3 = 0,687 \text{ m}^3 * 2,60 \text{ ton/m}^3 = 1,790 \text{ ton}$.

Η πυκνότητα του σκυροδέματος θα είναι $(0,33 + 0,198 + 1,790) = 2,32 \text{ ton/m}^3$.

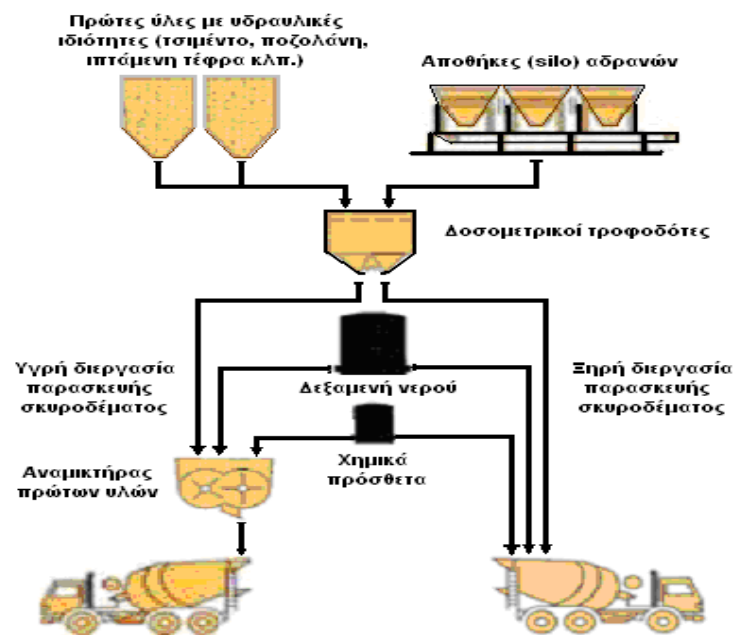
Η αναλογία ανάμιξης των υλικών για την παρασκευή του σκυροδέματος, πρέπει να εξασφαλίζει σε κάθε περίπτωση την ομοιογένεια του μίγματος, το κατάλληλο εργάσιμο για ικανοποιητική διάστρωση και συμπύκνωση του σκυροδέματος, καθώς και πρόσθετες ιδιότητές του, όπως είναι η αντλησιμότητα, η στεγανότητα και η ανθεκτικότητα. Η μέση αντοχή του σκυροδέματος (f_m) πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την απαιτούμενη αντοχή (f_w). Η αναλογία ανάμιξης των υλικών για την παρασκευή του σκυροδέματος δίνεται ως: τσιμέντο / αδρανή / νερό κ.β., (δηλαδή $Z / K / W$). Η αναλογία ανάμιξης επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Πολύ μεγάλη σημασία έχει η περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Η απαιτούμενη ποσότητα της πάστας του τσιμέντου πρέπει να γεμίσει τα κενά μεταξύ των κόκκων των αδρανών και να περιβάλλει τους κόκκους, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία του σκυροδέματος. Η ανάμιξη των πρώτων υλών πραγματοποιείται με κατάλληλο αναμκτήρα, ώστε το παρασκευαζόμενο σκυρόδεμα να γίνει όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιόμορφο. Ο χρόνος ανάμιξης δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 1 λεπτό. Μετά την ανάμιξη απαγορεύεται η προσθήκη υλικών στο μίγμα.

4.4 Διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος.

Για την παρασκευή έτοιμου σκυροδέματος δύο είναι οι κύριες μέθοδοι, η υγρή αυτοτελής μέθοδος και η ξηρή αυτοτελής μέθοδος.

Κατά την υγρή μέθοδο παρασκευής, ακριβείς ποσότητες όλων των συστατικών του σκυροδέματος (τσιμέντο ή υποκατάστατά του, αδρανή υλικά, νερό και χημικά πρόσθετα) τροφοδοτούνται σε μηχανικό αναμκτήρα. Το προϊόν της διεργασίας ανάμιξης, που είναι το έτοιμο σκυρόδεμα, μεταφέρεται κατόπιν με ειδικά φορτηγά (συνεχώς αναδευόμενο ως ρευστό μεγάλου ιξώδους) στη τοποθεσία όπου και θα χρησιμοποιηθεί. Έπειτα το σκυρόδεμα τοποθετείται σε καλούπια και δονείται ώστε να συμπυκνωθεί και να πάρει τη μορφή του στοιχείου του έργου.

Κατά την ξηρή μέθοδο παρασκευής, οι ακριβώς υπολογισμένες ποσότητες των στερεών πρώτων υλών τροφοδοτούνται μαζί με την αναγκαία ποσότητα νερού στο περιστρεφόμενο τύμπανο του οχήματος παρασκευής – μεταφοράς. Ταυτόχρονα προστίθενται στο τύμπανο οι αναγκαίες ποσότητες χημικών πρόσθετων και η ανάμιξη όλων των συστατικών πραγματοποιείται εντός του περιστρεφόμενου κάδου, κατά τη μετακίνηση του οχήματος και τη μεταφορά του σκυροδέματος στο κατασκευαζόμενο έργο.



Εικόνα 4.1: Αυτοτελείς διεργασίες (υγρή – ξηρή) παρασκευής σκυροδέματος (Τσακαλάκης, 2010).

4.5 Είδη – Κατηγορίες σκυροδέματος.

Το σκυρόδεμα ταξινομείται με βάση διάφορα κριτήρια, όπως είναι αυτό των αντοχών θλίψης 28 ημερών, της εργασιμότητάς του, της ανθεκτικότητάς του (διάρκεια στο χρόνο) και της κατηγορίας έκθεσης σε διάφορα περιβάλλοντα κ.λπ.. Οι κύριες κατηγορίες ταξινόμησης του σκυροδέματος είναι οι εξής:

1. Κατηγορίες αντοχής (strength classes).

Για την μελέτη και κατασκευή των έργων χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες σκυροδέματος του Πίνακα 4.1 , όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη εκφραζόμενη σε MPa, που διαπιστώνεται όταν ο έλεγχος πραγματοποιείται με κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15,00 cm και ύψους 30,00 cm και ο δεύτερος αριθμός ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη εκφραζόμενη σε MPa, όταν ο έλεγχος πραγματοποιείται με κυβικά δοκίμια ακμής 15,00 cm.

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες σκυροδέματος σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ. '97 (ιδία επεξεργασία).

Κατηγορία σκυροδέματος	f_{ck} , κυλ. (MPa)	f_{ck} , κύβου (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

2. Κατηγορίες κάθισης (workability classes).

Οι κατηγορίες κάθισης που ορίζονται από τον Κ.Τ.Σ. '97 και έπειτα από αναθεώρησή του της Υ.Α. Δ14/50504/12-4-2002 (ΦΕΚ 537/1-5-2002), παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, που ακολουθεί.

Πίνακας 4.2: Κατηγορίες καθίσεως σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ. '97 (ιδία επεξεργασία).

Κατηγορία	Κάθιση σε mm
S ₁	10 – 40
S ₂	50 – 90
S ₃	100 – 150
S ₄	160 – 210
S ₅	> 220

Η μετρούμενη κάθιση πρέπει να στρογγυλεύεται στα πλησιέστερα 10mm

3. Κατηγορίες Ανθεκτικότητας (durability classes).

Οι κατηγορίες ανθεκτικότητας, δηλαδή οι κατηγορίες εκείνες που εκφράζουν την αντοχή του σκυροδέματος στην διάρκεια του χρόνου και την ικανότητά του να αντεπεξέρχεται ικανοποιητικά στην έκθεσή του σε εξωτερικό περιβάλλον, περισσότερο ή λιγότερο βλαπτικό ή διαβρωτικό, περιλαμβάνονται στον Κ.Τ.Σ. '97 και στις συστάσεις του ΕΛΟΤ EN 206–1 και απαιτούν συνήθως προσοχή σε πέντε παράγοντες, τα λεγόμενα 5 C, οι οποίοι είναι:

- Ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου (Cement content).
- Λόγος νερού / τσιμέντου (Water / Cement ratio).
- Συμπύκνωση / Δόνηση σκυροδέματος (Compaction).
- Συντήρηση σκυροδέματος (Curing).
- Πάχος της στρώσεως της επικάλυψης οπλισμού (Cover).

Το σκυρόδεμα διακρίνεται αν είναι σε:

- Εσωτερικό / εξωτερικό χώρο.
- Περιβάλλον διαβρωτικό με χλωριόντα, σε θαλάσσιο περιβάλλον.
- Περιβάλλον με κίνδυνο παγοπληξίας.
- Περιβάλλον με κίνδυνο από ενανθράκωση.
- Περιβάλλον με κίνδυνο από δράση θεικών.
- Επιχρισμένο ή ανεπίχριστο.

Στον Πίνακα 4.3 δίνονται τα όρια της σύνθεσης (λόγος νερού / τσιμέντου, περιεκτικότητα σε τσιμέντο, κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών) των διαφόρων κατηγοριών σκυροδεμάτων.

Πίνακας 4.3: Απαιτήσεις για τα σκυροδέματα σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ. '97 (ίδια επεξεργασία)

Τύπος τσιμεντού	Σκυροδέματα χωρίς απαιτήσεις							Σκυροδέματα ανθεκτικά σε επιφανειακή φθορά	Σκυροδέματα μειωμένης υδατοπερατότητας	Σκυροδέματα μέσα σε νερό (όχι διαβρωτικό)	Σκυροδέματα στην θάλασσα	Σκυροδέματα εκτεθειμένο σε αέρα κορεσμένο με θάλασσα, άλατα (παραθαλάσσιο περιβάλλον)	Σκυροδέματα ανθεκτικά σε ζημιές προσβολές
	Μέγιστος κόκκος 3/8" ή 8 mm	Μέγιστος κόκκος 1/2" ή 16 mm	Μέγιστος κόκκος 1" ή 31,5 mm	Μέγιστος κόκκος 1,2" ή 38 mm	Μέγιστος κόκκος 1,2" ή 16 mm	Μέγιστος κόκκος 1" ή 31,5 mm	Μέγιστος κόκκος 1,2" ή 16 mm						
Μέγιστος λόγος νερού/τσιμέντο (Ν/Τ)	0,70	0,70	0,70	0,67	0,67	0,67	0,67	0,58	0,50	0,60	0,48	0,60	Ισχύει ο Πίνακας 12,4 του Κ.Τ.Σ.
Ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου (Kg/m ³)	320	300	270	350	330	300	300	350	400	350	400	330	
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής								C 25/30					
Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος αδρανών								Κάτω μισό υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ

4.6 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος – Ποιοτικός έλεγχος.

Νωπό σκυρόδεμα ονομάζεται το σκυρόδεμα, το οποίο προκύπτει από την ανάμιξη των πρώτων υλών του και για όσο χρονικό διάστημα διατηρεί το εργάσιμο, δηλαδή όσο είναι δυνατόν να μεταφέρεται και να διαστρώνεται (Κορωνάιος και Πουλάκος, 2006).

Βασικές ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος αποτελούν ο λόγος νερού/τσιμέντου, το μέτρο εξάπλωσης- μέτρο συμπίκνωσης, η εργασιμότητα, η φαινόμενη πυκνότητα, η θερμοκρασία, η εξίδρωση, το φινίρισμα, η πυκνότητα, ο περιεχόμενος αέρας, η αντλησιμότητα και η συνοχή.

4.6.1 Ο λόγος νερού / τσιμέντου.

Ο λόγος νερού / τσιμέντου είναι ο λόγος του βάρους του νερού προς το βάρος του τσιμέντου στο νωπό σκυρόδεμα. Υπολογίζεται διαιρώντας το βάρος του ολικού νερού (N) με το βάρος του ολικού προστιθέμενου τσιμέντου (T). Το ενεργό περιεχόμενο νερό ενός μίγματος υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ της ολικής ποσότητας νερού (N_0) στο νωπό σκυρόδεμα και της ποσότητας νερού που απορροφάται από τα αδρανή (N_G). Η εξίσωση για το λόγο νερού / τσιμέντου είναι επομένως:

$$\frac{N}{T} = \frac{N_0 - N_G}{T}$$

Ο απαιτούμενος λόγος νερού / τσιμέντου επηρεάζεται κυρίως από τα χρησιμοποιούμενα αδρανή, στρογγυλεμένα ή θραυστά και τη σύνθεσή τους (Hirschi et al., 2007).

4.6.2 Η εργασιμότητα.

Με τον όρο εργασιμότητα ή εργάσιμο χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό, η εργασιμότητα ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπίκνωση. Η εργασιμότητα είναι μία πολύ χρήσιμη έννοια στην πράξη, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά το χρόνο της σκυροδέτησης. Είναι μία σύνθετη ιδιότητα και συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες, όπως:

- Η ρευστότητα, δηλαδή η ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό. Εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμιξης.
- Η πλαστικότητα, η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.
- Η συνοχή, που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια μεταξύ τους και επομένως είναι μία από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.
- Η συμπυκνωσιμότητα, που εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπίκνωσης.

Η εργασιμότητα αυξάνεται γενικά όσο αυξάνεται το νερό ανάμιξης, δηλαδή η ρευστότητα του μίγματος. Η ρευστότητα εξαρτάται περισσότερο από την ποσότητα του νερού ανάμιξης και πολύ λιγότερο από το λόγο νερού / τσιμέντου. Για την ίδια ρευστότητα το απαιτούμενο νερό γενικά ελαττώνεται, όσο ελαττώνεται η ειδική

επιφάνεια των αδρανών. Έτσι ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο μέγιστος κόκκος και η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών κατεβαίνει. Από την άλλη πλευρά όμως, η αύξηση του μέγιστου κόκκου και των χονδροκόκκων αδρανών συντελεί στη μείωση της πλαστικότητας και της συνοχής, με κίνδυνο την απόμιξη του νωπού σκυροδέματος (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

4.6.3 Η φαινόμενη πυκνότητα.

Η φαινόμενη πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος εξαρτάται από τις πυκνότητες και την αναλογία ανάμιξης των συστατικών του, τον λόγο νερού / τσιμέντου και από την περιεχόμενη ποσότητα αέρα. Η φαινόμενη πυκνότητα μαζί με την συνεκτικότητα δείχνουν εάν έχει πραγματοποιηθεί σωστά η σύνθεση και η συμπύκνωση του σκυροδέματος. (Κορωναίος και Πουλάκος, 2006).

4.6.4 Η πυκνότητα.

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος είναι η μάζα σε kg/m^3 νωπού κανονικά συμπυκνωμένου σκυροδέματος, συμπεριλαμβάνοντας τα υπολειπόμενα κενά. Με δεδομένο την ίδια ποσότητα τσιμέντου και αδρανών, χαμηλότερη πυκνότητα σκυροδέματος είναι ενδεικτική χαμηλότερης αντοχής σκυροδέματος, καθώς η πυκνότητα μειώνεται όσο το περιεχόμενο νερό και τα κενά αυξάνονται. Ενώ, η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος αυξάνεται όσο αυξάνεται το περιεχόμενο τσιμέντο, όσο μειώνεται ο λόγος νερού/τσιμέντου και τα περιεχόμενα κενά (Hirschi et al., 2007).

4.6.5 Ο περιεχόμενος αέρας.

Όλα τα σκυροδέματα περιέχουν πόρους. Ακόμα και μετά από προσεκτική συμπύκνωση, το υπολειπόμενο περιεχόμενο αέρα, στην περίπτωση μέγιστου κόκκου αδρανών 32,00 mm καταλαμβάνει ποσοστό 1,00–2,00 % κ.ο. και αυτό το σύνηθες περιεχόμενο μπορεί να ανέλθει σε ποσοστά 4,00 % κ.ο. σε σκυροδέματα με λεπτά αδρανή (Hirschi et al., 2007).

4.6.6 Η συνοχή.

Η συνοχή ενός μίγματος περιγράφει την ομοιογένεια της σύστασης του νωπού μίγματος σκυροδέματος κατά την τοποθέτησή του. Απουσία συνοχής οδηγεί σε απόμιξη, διαχωρισμό και προβλήματα στην τοποθέτηση του σκυροδέματος (Hirschi et al., 2007).

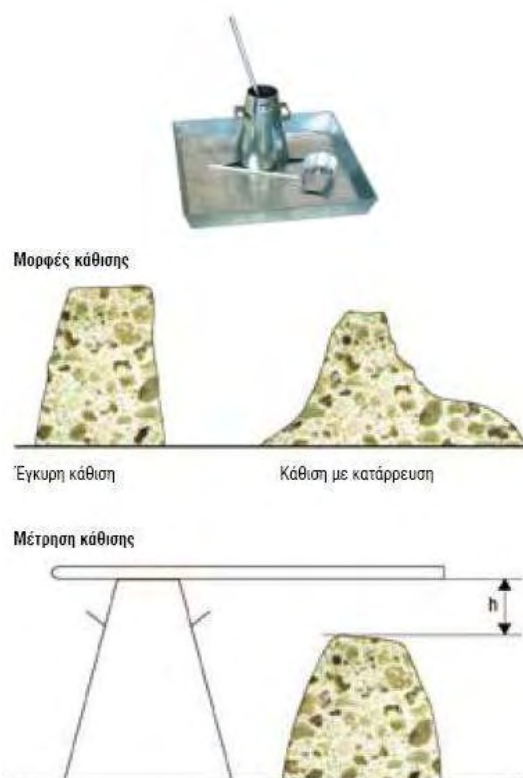
4.6.7 Έλεγχος ιδιοτήτων νωπού σκυροδέματος.

Ο έλεγχος των ιδιοτήτων του νωπού σκυροδέματος επιτυγχάνεται με την πραγματοποίηση των παρακάτω δοκιμών.

Έλεγχος συνεκτικότητας με τη δοκιμή κάθισης (Δοκιμή Slump).

Με τη δοκιμή κάθισης προσδιορίζεται η συνεκτικότητα του μίγματος, η ικανότητα δηλαδή του νωπού σκυροδέματος να ρέει. Μεταλλικός κόλουρος κώνος ανοιχτός επάνω και κάτω γεμίζεται με νωπό σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται. Όταν ο κώνος σηκωθεί, η κάθιση δίνει ένα μέτρο συνεκτικότητας του σκυροδέματος. Η

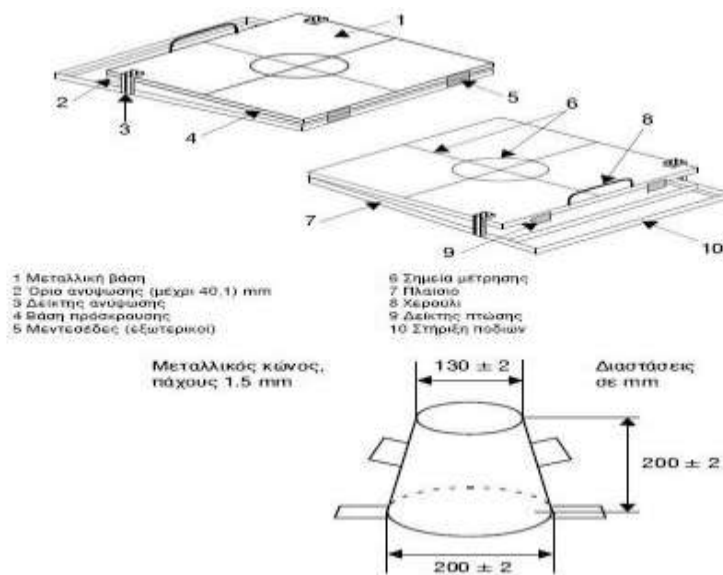
κάθιση είναι η διαφορά σε mm μεταξύ του ύψους του μεταλλικού κώνου και του ύψους του νωπού σκυροδέματος μετά την πτώση του. Ολόκληρη η διαδικασία από την αρχή του γεμίσματος μέχρι να σηκωθεί ο κώνος πρέπει να ολοκληρώνεται εντός 150 δευτερολέπτων. Η δοκιμή είναι έγκυρη μόνο όταν δίνει κάθιση, κατά την οποία το σκυρόδεμα παραμένει σε μεγάλο βαθμό ακέραιο και συμμετρικό μετά την αφαίρεση του κώνου, δηλαδή το σκυρόδεμα να παραμένει όρθιο στη μορφή ενός κόλουρου κώνου ή τμήματος κώνου. Εάν το σκυρόδεμα καταρρεύσει πρέπει να ληφθεί άλλο δείγμα. Εάν το δείγμα καταρρεύσει δύο διαδοχικούς ελέγχους, το σκυρόδεμα δε διαθέτει την πλαστικότητα και τη συνοχή που απαιτούνται για τη δοκιμή κάθισης. Η δοκιμή κάθισης πληροί τα πρότυπα EN 12350-2, ASTM C143, AASHTO T119 (U.S. Department of transportation, 2007).



Εικόνα 4.2: Εξαρτήματα δοκιμή κάθισης. Περιπτώσεις αποτελεσμάτων δοκιμής κάθισης νωπού σκυροδέματος (<http://www.controls.it>).

Έλεγχος συνεκτικότητας βάσει της διαμέτρου εξάπλωσης.

Η δοκιμή καθορίζει τη συνεκτικότητα του νωπού σκυροδέματος μετρώντας την εξάπλωση του σκυροδέματος σε οριζόντια επίπεδη βάση. Μεταλλικός κόλουρος κώνος γεμίζεται με σκυρόδεμα (σε δύο στρώσεις) και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Ο κώνος ακολούθως αφαιρείται κατακόρυφα προς τα επάνω. Μετά από την οποιαδήποτε κατάρρευση σκυροδέματος, η βάση ανυψώνεται χειροκίνητα ή μηχανικά 15 φορές έως το δείκτη ανύψωσης και αφήνεται να πέσει έως τους δείκτες πτώσης. Η εξάπλωση του σκυροδέματος μετριέται παράλληλα προς τις πλευρές της βάσης διαμέσου του κέντρου της. Η δοκιμή αυτή πληρεί το πρότυπο EN12350-5 (www.sika.com).



Εικόνα 4.3: Διάταξη δοκιμής εξάπλωσης νωπού σκυροδέματος (www.sika.com).

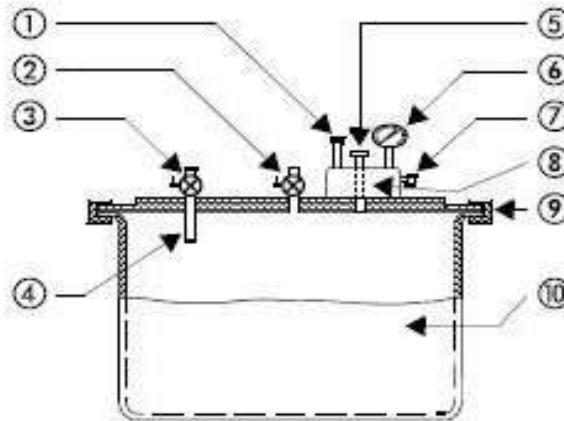
Προσδιορισμός της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος.

Το νωπό σκυρόδεμα συμπυκνώνεται σε στερεό, στεγανό δοχείο και μετά ζυγίζεται. Οι ελάχιστες διαστάσεις του δοχείου πρέπει να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές μεγαλύτερες από τη μέγιστη ονομαστική διάμετρο των μεγαλύτερων αδρανών του σκυροδέματος, αλλά δεν πρέπει να είναι μικρότερες από 150,00mm. Η χωρητικότητα του δοχείου πρέπει να είναι τουλάχιστον 5,00 λίτρα. Το χείλος του δοχείου πρέπει να είναι παράλληλο με τη βάση του δοχείου. Το σκυρόδεμα συμπυκνώνεται μηχανικά με δονητή χειρός ή τράπεζα δόνησης ή χειροκίνητα με ράβδο (www.sika.com).

Προσδιορισμός του περιεχόμενου αέρα.

Για τον προσδιορισμό του περιεχόμενου αέρα του σκυροδέματος υπάρχουν δύο μέθοδοι που βασίζονται στην ίδια αρχή, στον νόμο Boyle – Mariotte, πρόκειται για τη μέθοδο της στήλης νερού και τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης. Στην μέθοδο της στήλης νερού, δοχείου γνωστού όγκου γεμίζεται με νωπό σκυρόδεμα μέχρι μία ορισμένη στάθμη και το υπόλοιπο τμήμα του δοχείου γεμίζεται με νερό. Με συνεχές ανακάτεμα το νερό γεμίζει τους πόρους του σκυροδέματος και καταλαμβάνει τη θέση του αέρα. Από την ποσότητα του εξερχόμενου αέρα προσδιορίζεται η περιεκτικότητα του νωπού σκυροδέματος σε αέρα. Στην μέθοδο της εξισορρόπησης της πίεσης, ένας γνωστός όγκος αέρα σε γνωστή πίεση εξισορροπείται με άγνωστο όγκο αέρα στο σκυρόδεμα σε ένα σφραγισμένο θάλαμο. Η διαβάθμιση στην κλίμακα του μετρητή πίεσης για την προκύπτουσα πίεση βαθμονομείται σε ποσοστό περιεχόμενου αέρα μέσα στο δείγμα. Τα δοχεία μέτρησης αεροπεριεκτικότητας για συμβατικό σκυρόδεμα συνήθως έχουν χωρητικότητα 8,00 λίτρα. Η συμπύκνωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δονητή χειρός ή τράπεζα δόνησης. Καμία από τις προαναφερθείσες μεθόδους δεν είναι κατάλληλη για σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή, σκωρίες υψικαμίνων ή αδρανή με μεγάλο πορώδες. Η δοκιμή αυτή συμφωνεί με το πρότυπο EN12360–7 (Hirschi et al, 2007).

- 1 Αντλία
- 2 Βαλβίδα Β
- 3 Βαλβίδα Α
- 4 Θάλαμοι εκτόνωσης για έλεγχο κατά τη βαθμονόμηση
- 5 Κύρια βαλβίδα αέρα
- 6 Μετρητής πίεσης
- 7 Βαλβίδα εκτόνωσης
- 8 Χώρος αέρα
- 9 Κολάρο σφράγισης
- 10 Δοχείο



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα συσκευής μέτρησης για τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης για τον προσδιορισμό του περιεχόμενου αέρα του νωπού σκυροδέματος (Hirschi et al, 2007).

4.7 Μεταφορά – Συμπύκνωση – Συντήρηση σκυροδέματος.

Το σκυρόδεμα κατά τη μεταφορά και τη διάστρωσή του, πρέπει να προστατεύεται από τις επιδράσεις των καιρικών φαινομένων και από την πρόσμιξή του με άλλα υλικά. Επίσης, πρέπει να αποφεύγεται η απόμιξή του και το σκυρόδεμα να διατηρεί την ομοιογένεια και την εργασιμότητά του.

Η μεταφορά του σκυροδέματος στον τόπο διάστρωσης γίνεται με διάφορους τρόπους, ανάλογα με την ποιότητα και την ποσότητά του (καροτσάκια, αναβατόρια, ειδικά οχήματα, ειδικές αντλίες κ.λπ.). Για την εκφόρτωση του σκυροδέματος και την μεταφορά του στη θέση διάστρωσης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κεκλιμένα επίπεδα, μεταφορικές ταινίες ή άλλα κατάλληλα μέσα, τα οποία δεν προκαλούν απόμιξη του μίγματος. Ενώ, απαγορεύεται η ελεύθερη πτώση σκυροδέματος από ύψος μεγαλύτερο από 2,50 m.

Η διάστρωση του σκυροδέματος στα καλούπια πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία κανών ή οπών. Όταν μετά τη διάστρωσή του το σκυρόδεμα σκληρυνθεί χωρίς να συμπυκνωθεί, παραμένει μέσα στη μάζα του μία επιπλέον ποσότητα αέρα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πόρων που επηρεάζουν αρνητικά τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Έτσι, το νωπό σκυρόδεμα πρέπει να συμπυκνώνεται, ώστε να απομακρυνθεί ο εγκλωβισμένος αέρας και να γίνει πυκνότερη η διάταξη των κόκκων των αδρανών. Η συμπύκνωση εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των κόκκων του αδρανούς, το συντελεστή νερού / τσιμέντου, τη διάταξη του οπλισμού και τις διαστάσεις του δομικού στοιχείου. Οι συνηθέστεροι τρόποι συμπύκνωσης είναι: α) ο κοπανισμός, μηχανικά ή χειρονακτικά, β) ο ραβδισμός, με ξύλινες ή χαλύβδινες κυλινδρικές ράβδους και γ) η δόνηση, με δονητές μέσα στη μάζα, επιφανειακούς, ξυλότυπου ή και με δονητικές τράπεζες. Η συμπύκνωση για σκυρόδεμα με μεγάλο μέτρο εξάπλωσης πραγματοποιείται με δόνηση, ενώ για δοκίμια μικρού πάχους πραγματοποιείται με σανίδα ή ράβδο. Ο βαθμός συμπύκνωσης του σκυροδέματος εξαρτάται από τη συνεκτικότητά του, δηλαδή το μέτρο για το εργάσιμο και το βαθμό συμπύκνωσης του νωπού σκυροδέματος, που εξαρτάται από την ποσότητα της πάστας του τσιμέντου.

Η συντήρηση του σκυροδέματος αρχίζει αμέσως μετά τη διάστρωσή του, που στην αρχή είναι εντατική, συνήθως με διαβροχή και διαρκεί τουλάχιστον 7 ημέρες και στη συνέχεια είναι ηπιότερη και διαρκεί τουλάχιστον 21 ακόμη ημέρες. Κατά το πρώτο εξάωρο της σκληρύνσεως του σκυροδέματος είναι πολύ σημαντική η εντατική διαβροχή του. Η συντήρηση του σκυροδέματος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και χωρίς διαβροχή, με μεθόδους που αποτρέπουν την εξάτμιση του νερού του μίγματος (www.titan.gr).

5. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.

Η οδηγία 96/61/ΕΚ για την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης (IPPC) περιλαμβάνει την ενδεικτική λίστα των κύριων ρύπων, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη διόρθωση των τιμών των ορίων εκπομπής. Οι κύριοι ρύποι κατά την παραγωγή του κλίνκερ του τσιμέντου, που περιλαμβάνονται στη λίστα είναι:

- Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και οι άλλες ενώσεις του.
- Το οξείδιο του θείου (SO_x) και οι άλλες ενώσεις του.
- Η σκόνη (αιωρούμενα σωματίδια).

Από τη λίστα αυτή, θεωρείται επίσης ότι έχουν ενδιαφέρον και οι ακόλουθοι ρύποι, παρότι έχουν λιγότερη σημασία για την παραγωγή κλίνκερ: οι πτητικές οργανικές ουσίες (VOC), τα μέταλλα και οι ενώσεις τους, οι πολυχλωριωμένες διβενζοδιοξίνες και διβενζοφουράνες (PCDD/F). Στη λίστα δεν αναφέρεται, παρότι είναι σχετικό με την παραγωγή τσιμέντου, το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Άλλες σχετικές εκπομπές είναι τα απόβλητα, ο θόρυβος και οι οσμές.

Οξείδια του αζώτου (NO_x) και άλλες ενώσεις του αζώτου.

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) είναι από τις πιο σημαντικές ουσίες όσον αφορά την αέρια ρύπανση από τις εγκαταστάσεις παρασκευής τσιμέντου. Στα καυσαέρια της καμίνου κυριαρχούν τα NO και τα NO_2 ($\text{NO} > 90,00\%$ και $\text{NO}_2 < 10,00\%$). Υπάρχουν δύο κύριες πηγές παραγωγής NO_x :

- i. NO_x από την αέρια καύση: μέρος του αζώτου στον αέρα καύσης αντιδρά με το οξυγόνο για να σχηματίσει διάφορα οξείδια του αζώτου.
- ii. NO_x προερχόμενα από το καύσιμο: οι ουσίες που περιέχουν άζωτο και βρίσκονται χημικά δεσμευμένες στο καύσιμο, αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα για να σχηματίσουν οξείδια του αζώτου.

Κάθε σύστημα καμίνου έχει τα δικά του χαρακτηριστικά εκπομπών, ενώ οι εκπομπές NO_x , από την ίδια εγκατάσταση, μπορεί να μεταβάλλονται ευρέως σε σχέση με το χρόνο. Η χρήση καυσίμων από απόβλητα έχει δείξει τόσο αύξηση των εκπομπών NO_x , όσο και μείωση.

Διοξείδιο του θείου (SO_2) και άλλες ενώσεις θείου.

Η εισαγωγή του θείου στη διεργασία, προέρχεται από τις πρώτες ύλες και τα καύσιμα. Το θείο εμφανίζεται όταν τα σουλφίδια εξατμίζονται μερικώς από τις πρώτες ύλες (περίπου κατά 30,00%) στο πρώτο στάδιο του προθερμαντήρα. Ο αέρας από αυτή τη μονάδα θα ελευθερωθεί είτε απευθείας στην ατμόσφαιρα, είτε θα τροφοδοτηθεί στο μύλο των πρώτων υλών, εάν αυτός είναι σε λειτουργία. Στο μύλο αυτό, περίπου 50,00% του SO_2 παγιδεύεται από τις πρώτες ύλες.

Παρά το γεγονός ότι το περισσότερο θείο δεσμεύεται στο κλίνκερ, οι εκπομπές SO_2 είναι γενικά αρκετά σημαντικές και το θείο θεωρείται από τους πιο σοβαρούς ρύπους. Όπως ισχύει για τα NO_x και τους άλλους ρύπους, οι εκπομπές SO_2 ποικίλουν από εγκατάσταση σε εγκατάσταση. Ακόμα και στην ίδια εγκατάσταση σημειώνονται ευρείες διακυμάνσεις. Τόσο αυξημένες όσο και μειωμένες εκπομπές SO_2 έχουν μετρηθεί στις περιπτώσεις χρήσης εναλλακτικών καυσίμων. Οι διαφορές αυτές είναι συγκρίσιμες με τις φυσιολογικές διακυμάνσεις των εκπομπών θείου.

Σκόνη.

Οι εκπομπές σκόνης είναι αυτό που απασχολεί περισσότερο από περιβαλλοντικής άποψης τη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου. Διακρίνονται σημειακές εκπομπές σκόνης (ελεγχόμενες) και διάχυτες (μη ελεγχόμενες).

Οι κύριες πηγές σημειακών εκπομπών σκόνης είναι οι κάμινοι, οι μύλοι της φαρίνας, τα ψυγεία κλίνκερ, καθώς και οι μύλοι τσιμέντου και άνθρακα. Σε όλες αυτές τις υποδιεργασίες, μεγάλοι όγκοι αερίων ρέουν μέσα από κονιοποιημένα υλικά. Ο σχεδιασμός και η αξιοπιστία των σύγχρονων ηλεκτροστατικών φίλτρων και των σακκόφιλτρων εξασφαλίζουν τη μείωση της σκόνης που ελευθερώνεται σε επίπεδα μικρής σημασίας. Οι εκπομπές σκόνης έχουν μειωθεί κατά 90,00 % τα τελευταία 20 χρόνια και οι διαθέσιμες τεχνικές δείχνουν πως η εκπομπή σκόνης από μία σύγχρονη εγκατάσταση σύντομα θα είναι ασήμαντη. Η χρήση δευτερογενών καυσίμων δεν επηρεάζει το ποσό της σκόνης που ελευθερώνεται από την κάμινο, επειδή η εκπομπή σκόνης σχετίζεται με την αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων αποκονίωσης.

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

- Την κυκλοφορία των οχημάτων μεταφοράς υλικών (πρώτων υλών κ.λπ.).
- Την υπαίθρια αποθήκευση πρώτων υλών και κλίνκερ.
- Τη διακίνηση υλικών με οχήματα (τροφοδοσία και απόληψη).
- Τη λειτουργία των συστημάτων μεταφοράς (ταινίες, αναβατόρια και κοχλίες) ειδικά στα σημεία αλλαγής συστημάτων και πτώσης υλικών.

Η εκπομπή της σωματιδιακής ύλης σε εσπνεύσιμα μεγέθη είναι δυνατόν να προκαλέσει ζημία στους πνεύμονες των ανθρώπων.

Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).

Η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα εκτιμάται σε 800,00–900,00 kg/ton κλίνκερ. Περίπου το 60,00 % αυτής της εκπομπής προέρχεται από τη χημική διαδικασία της μετατροπής πρώτων υλών (κυρίως ασβεστόλιθου) σε κλίνκερ, ενώ το 40,00 % σχετίζεται με την κατανάλωση καυσίμου, καθώς όλα τα καύσιμα που καίγονται στους κλιβάνους τσιμέντου παράγουν CO₂, από τη χημική αντίδραση μεταξύ άνθρακα και οξυγόνου (άμεσες εκπομπές CO₂). Οι έμμεσες εκπομπές CO₂, σχετίζονται με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για την παραγωγή του κλίνκερ του τσιμέντου. Το διοξείδιο του άνθρακα της ασβεστοποίησης δεν μπορεί να αλλάξει, όμως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την καύση έχουν προοδευτικά μειωθεί. Τα τελευταία χρόνια έχει επιτευχθεί μία μείωση περίπου 30,00%, κυρίως λόγω της υιοθέτησης περισσότερο αποδοτικών, από πλευράς καυσίμου, καμίνων.

Πτητικές οργανικές ενώσεις (H/C, VOC).

Στις θερμικές διεργασίες, η εμφάνιση πτητικών οργανικών ενώσεων και μονοξειδίου του άνθρακα σχετίζεται με την ατελή καύση. Στις κάμινους παραγωγής τσιμέντου οι εκπομπές αυτές είναι αμελητέες, κάτω από συνθήκες μόνιμης κατάστασης, εξαιτίας του μεγάλου χρόνου παραμονής των αερίων στην κάμινο, των πολύ υψηλών θερμοκρασιών και των συνθηκών περίσσειας οξυγόνου. Οι συγκεντρώσεις μπορούν να αυξηθούν σε μικρό ποσοστό κατά τη διάρκεια της εκκίνησης. Αυτά τα γεγονότα συμβαίνουν από μία ή δύο φορές την εβδομάδα, έως μία φορά κάθε δύο ή τρεις μήνες.

Οι εκπομπές αλογόνων από πτητικές οργανικές ενώσεις, σε σχέση με την καύση, έχουν ενδιαφέρον μόνον όταν χρησιμοποιούνται εναλλακτικά καύσιμα. Μία σειρά από δοκιμές που έγιναν για τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων σε κάμινους, δείχνουν χαμηλά επίπεδα εκπομπών όλων των οργανικών ενώσεων και αποδόσεις απομάκρυνσης της τάξης του 99,99 %.

Εκπομπές οργανικών ενώσεων εμφανίζονται στα αρχικά στάδια της διεργασίας (προθέρμανση), όπου οι οργανικές ενώσεις που περιέχονται στις πρώτες ύλες αεριοποιούνται, καθώς θερμαίνονται. Ανάλογα με την ποιότητα της πρώτης ύλης, περίπου 1,50-6,00 gr οργανικού άνθρακα/kg κλίνκερ, εισέρχονται στη διεργασία της παραγωγής. Διάφορες δοκιμές έδειξαν ότι η απελευθέρωση των οργανικών πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μεταξύ 400,00-600,00 °C. Η χρήση πρώτων υλών με μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανικά (μάργα), οδηγεί σε εκπομπές που φτάνουν σε 100,00 mg/m³. Για τις περισσότερες πρώτες ύλες οι εκπομπές είναι πολύ μικρότερες.

Μέταλλα και ενώσεις τους.

Οι πρώτες ύλες και τα καύσιμα περιέχουν μέταλλα των οποίων οι συγκεντρώσεις ποικίλουν ευρέως ανάλογα με την περιοχή. Οι ενώσεις των μετάλλων μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, με βάση την πτητικότητα και τα άλατα τους:

- Μέταλλα τα οποία είναι ή βρίσκονται σε ενώσεις που είναι μη – πτητικές: Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu, Ag.
- Μέταλλα τα οποία είναι ή βρίσκονται σε ενώσεις που είναι ημι – πτητικές: Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K, Na.
- Μέταλλα τα οποία είναι ή βρίσκονται σε ενώσεις που είναι πτητικές: Hg, Ti.

Οι ενώσεις των μετάλλων που είναι πτητικές και βρίσκονται στη σκόνη, συλλέγονται κατά τη διεργασία της αποκονίωσης του εξερχόμενου αέρα. Οι υπόλοιπες μη-πτητικές ενώσεις δεσμεύονται και παραμένουν στο κλίνκερ, ως συστατικό του.

Πολυχλωριωμένες διβενζοδιοξίνες και διβενζοφουράνες (PCDF, PCDD/F).

Οι πρώτες ύλες ή τα καύσιμα που περιέχουν χλωρίδια είναι δυνατόν να προκαλέσουν το σχηματισμό πολυχλωριωμένων διβενζοδιοξινών (PCDD) και πολυχλωριωμένων διβενζοφουρανών (PCDF). Οι PCDD/F σχηματίζονται κατά τη διάρκεια ή μετά την προθέρμανση, εφόσον υπάρχουν πρόδρομες ουσίες διαθέσιμες στις πρώτες ύλες (χλώριο και υδαάνθρακες). Από δεδομένα που έχουν καταγραφεί,

οι συγκεντρώσεις ανέρχονται σε 0,10 ng/m³, το οποίο είναι και το όριο σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία στην Ευρώπη.

Υγρά απόβλητα.

Τα υγρά απόβλητα στη βιομηχανία τσιμέντου προέρχονται μόνον από τα νερά ψύξης των μηχανημάτων και των καυσαερίων, τα οποία όμως κυκλοφορούν συνήθως, σε κλειστό κύκλωμα και έτσι δεν απορρίπτονται στο περιβάλλον.

Στερεά απόβλητα.

Τα απόβλητα τα οποία παράγονται κατά την παραγωγή του κλίνκερ, είναι συνήθως ανεπιθύμητες πέτρες, οι οποίες απομακρύνονται από τις πρώτες ύλες κατά την προετοιμασία της φαρίνας, σκόνη, η οποία απομακρύνεται από το ρεύμα της παράκαμψης και διάφορα υλικά συσκευασίας (χαρτί, ξυλοπαλέτες, κ.λπ.). Η σκόνη ανακυκλώνεται είτε στο στάδιο της τροφοδοσίας του κλιβάνου με πρώτη ύλη, είτε στην τροφοδοσία του μύλου άλεσης του τσιμέντου.

Θόρυβος.

Ο βαρύς εξοπλισμός της εγκατάστασης και οι μεγάλοι ανεμιστήρες προκαλούν αρκετό θόρυβο και δονήσεις.

Οσμές.

Οι οσμές αποτελούν σπάνια πρόβλημα σε μια καλά λειτουργούσα εγκατάσταση.

Είναι επομένως, αναγκαίος και πολύ σημαντικός τόσο ο έλεγχος όσο και η μείωση των ρύπων αυτών, καθώς συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση, με πολύ σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, την χλωρίδα και την πανίδα.

Το μονοξειδίο του άνθρακα αποτελεί έναν βέβαιο συντελεστή των καρδιακών προβλημάτων, σε ήπιες συγκεντρώσεις προκαλεί δημιουργία λιπαρού στρώματος στα αιμοφόρα αγγεία, σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις είναι πιθανό να προκαλέσει ακαριαίο θάνατο. Η δράση του είναι προσθετική, επιδρά στο κεντρικό νευρικό σύστημα ακόμα και σε συγκεντρώσεις της τάξεως των λίγων ppm.

Τα οξείδια του αζώτου προκαλούν ερεθισμό των ματιών και ερεθισμό της λειτουργίας του αναπνευστικού συστήματος. Αποτελούν από τους κύριους συντελεστές στο σχηματισμό του νέφους, λόγω της συμμετοχής τους στις φωτοχημικές αντιδράσεις της ατμόσφαιρας.

Η εκπεμπόμενη σκόνη είναι αρκετά βλαβερή για το αναπνευστικό σύστημα όλων των οργανισμών. Η άμεση τοξικότητα ή μη ενός σωματιδιακού ρύπου σχετίζεται με την πηγή προέλευσής του. Οι ουσίες αυτές λαμβάνονται μέσω του αναπνευστικού σωλήνα και επικάθονται στους πνεύμονες προκαλώντας σταδιακά συσσώρευση. Η πνευμονοκονίαση είναι μια συνηθισμένη αρρώστια για αυτούς που δουλεύουν σε ορυχεία και σε τσιμεντοβιομηχανίες (Νουσιοπούλου, 2010, EC, 2001).

5.1 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Ο όρος 'περιβαλλοντικό αποτύπωμα' αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 από τους Mathis Wackernagel και William Rees και είναι ένας λογιστικός δείκτης με τον οποίο υπολογίζεται η έκταση που απαιτείται, για την απόθεση των παραγόμενων αποβλήτων κατά την παραγωγή των απαιτούμενων πόρων.

Ενώ αρχικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των επιπτώσεων σε εθνικό επίπεδο, το μοντέλο πλέον εφαρμόζεται τόσο σε περιφερειακό επίπεδο, αλλά και σε επίπεδο οργανισμών και επιχειρήσεων. Γενικά, οποιαδήποτε 'οντότητα' έχει μετρίσιμους πόρους, μπορεί εύκολα να υπολογίσει το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αναδείχθηκε ως μία καινοτόμα τεχνική με την οποία υπολογίζεται η οικολογική διάσταση της αειφορίας. Μέσω της αειφόρου ανάπτυξης επιδιώκεται η οικονομική αποτελεσματικότητα, η προστασία και η αποκατάσταση των οικοσυστημάτων και η ευημερία όλων των λαών. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι ένας τρόπος για την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας των φυσικών πόρων και του βαθμού με τον οποίο η παραγωγή και η κατανάλωση έχουν επιπτώσεις σε αυτούς.

Ο όρος του περιβαλλοντικού αποτυπώματος έχει τις ρίζες του στην έννοια της «Φέρουσας Ικανότητας». Σε ένα περιβάλλον η φέρουσα ικανότητα είναι το μέγιστο δυνατό φορτίο, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει αυτό το συγκεκριμένο περιβάλλον. Ως φέρουσα ικανότητα ορίζεται ο μέγιστος δυνατός πληθυσμός ενός συγκεκριμένου είδους, ο οποίος μπορεί να υποστηριχθεί επ' αόριστον από ένα συγκεκριμένο οικοσύστημα, χωρίς να μειώνει την παραγωγικότητα, του εν λόγω οικοσυστήματος (Wackernagel and Rees, 1996). Ο Khanna et al. (1999) υποστηρίζουν ότι στην ανθρώπινη κοινωνία η φέρουσα ικανότητα πρέπει να ορίζεται ως το ανώτατο ποσοστό κατανάλωσης πόρων και απόρριψης αποβλήτων, που μπορεί να διατηρείται επ' αόριστον σε μια καθορισμένη περιφέρεια, χωρίς να εξασθενεί η βιοποικιλότητα και η οικολογική ακεραιότητα.

Για έναν πληθυσμό το περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι ο βιολογικός χώρος ο οποίος απαιτείται για την παραγωγή των πόρων που χρησιμοποιεί και την απορρόφηση των αποβλήτων που δημιουργούνται από τον εν λόγω πληθυσμό. Η μέτρηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μπορεί να γίνει σε μία συγκεκριμένη περιοχή ή σε ολόκληρο τον πλανήτη (Ecological footprint). Γενικά χρησιμεύει για την εστίαση στις οικολογικές απαιτήσεις των οικισμών. Μετρώντας τις οικολογικές απαιτήσεις των περισσότερων υφιστάμενων επιχειρήσεων, σε σχέση με την απαιτούμενη γη, τα παραγόμενα απόβλητα κ.λπ. αποδεικνύεται ότι ελάχιστες επιχειρήσεις είναι αυτάρκειες.

Ο όρος του περιβαλλοντικού αποτυπώματος αναφέρεται δηλαδή, σε έναν λογιστικό δείκτη που παρακολουθεί τις ανταγωνιστικές απαιτήσεις της ανθρωπότητας στη βίωση, συγκρίνοντας τις απαιτήσεις των ανθρώπων με την αναγεννητική ικανότητα του πλανήτη. Αυτό επιτυγχάνεται με τον συνυπολογισμό των εκτάσεων που απαιτούνται για την παροχή των ανανεώσιμων πόρων που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι, των εκτάσεων που καταλαμβάνονται από τις υποδομές και των εκτάσεων που απαιτούνται για την απορρόφηση των αποβλήτων (www.wwf.com).

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα υπολογίζεται σε παγκόσμια εκτάρια. Ένα παγκόσμιο εκτάριο είναι ο βιολογικός παραγωγικός χώρος με μέσο όρο 11,20 δισεκατομμύρια κατελημμένο βιολογικό παραγωγικό χώρο στη γη (Wackernagel et al., 2006). Ο Alan Fricker (1998) έδωσε ένα παρόμοιο ορισμό του οικολογικού αποτυπώματος. Ως περιβαλλοντικό αποτύπωμα ορίζεται: το ποσοστό των πόρων που καταναλώνονται εκφραζόμενο σε αντίστοιχο ποσοστό των παραγωγικών εκτάσεων

που απαιτούνται για την παραγωγή τους και τη συνακόλουθη απορρόφηση των παραγόμενων αποβλήτων.

5.2 Αποτύπωμα άνθρακα.

Ο όρος αποτύπωμα άνθρακα (carbon footprint) αποτελεί μία μέθοδο μέτρησης του συνολικού ποσοστού των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες προκύπτουν άμεσα ή έμμεσα από μία δραστηριότητα ή έχουν συσσωρευτεί κατά τα διάφορα στάδια της ζωής ενός προϊόντος (Wiedmann and Minx, 2007).

Οι δραστηριότητες αυτές μπορεί να είναι ατομικές, ομαδικές, να αφορούν κράτη, εταιρίες, οργανισμούς, διεργασίες, τομείς της βιομηχανίας κ.λπ.. Στα προϊόντα περιλαμβάνονται τα διάφορα υλικά αγαθά αλλά και οι υπηρεσίες. Σε κάθε περίπτωση, όλες οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, άμεσες και έμμεσες, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Παρά τη γενικευμένη εμφάνιση του όρου δεν φαίνεται να υπάρχει ένας σαφής ορισμός του και επικρατεί σύγχυση ακόμα και για το τι πραγματικά σημαίνει και παίζει σημαντικό ρόλο και σε ποια μονάδα μέτρησης πρόκειται να μετρηθεί. Ενώ ο όρος προέρχεται από την έννοια του Οικολογικού αποτυπώματος (Ecological Footprint) (Wackernagel and Rees, 1996), η μόνη κοινή βασική γραμμή είναι ότι το αποτύπωμα άνθρακα αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη ποσότητα εκπομπών αερίων που σχετίζεται με την κλιματική αλλαγή και συνδέεται με ανθρωπογενείς δραστηριότητες παραγωγής και κατανάλωσης. Το φάσμα των ορισμών ποικίλλει, περιλαμβάνοντας από τις άμεσες εκπομπές CO₂ έως το συνολικό κύκλο ζωής των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις το αποτύπωμα άνθρακα χρησιμοποιείται γενικά ως συνώνυμο για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ή των αερίων του θερμοκηπίου εκφρασμένες σε ισοδύναμες μονάδες CO₂ (carbon dioxide equivalent, CDE ή CO₂e) (Fuglestedt et al., 2003).

Για τον προσδιορισμό του αποτυπώματος άνθρακα λαμβάνονται υπόψη μόνο οι εκπομπές του CO₂, αν και είναι γεγονός πως και άλλες ουσίες συμμετέχουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Πολλές από τις οποίες, είτε δεν περιέχουν άνθρακα είτε είναι αρκετά δύσκολο να υπολογιστούν, λόγω της διαθεσιμότητας των δεδομένων. Το μεθάνιο για παράδειγμα, θα μπορούσε να λαμβάνεται υπόψη, όμως η πληροφορία που θα λαμβάνεται από έναν δείκτη που περιέχει μόνο δύο από όλα τα αέρια του θερμοκηπίου θα είναι ελλιπής. Ένας αναλυτικός δείκτης των αερίων του θερμοκηπίου θα πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα είδη αυτών των αερίων και θα μπορούσε να ονομάζεται 'climate footprint' και όχι 'carbon footprint'.

Επίσης, ο παραπάνω ορισμός δεν εκφράζει το αποτύπωμα του άνθρακα σαν έναν δείκτη βασισμένο στην έκταση. Η συνολική ποσότητα του CO₂ μετριέται σε μονάδες μάζας (kg, ton, κ.λπ.) και όχι σε μονάδες έκτασης (ha, m², km², κ.λπ.). (Wiedmann and Minx, 2007).

Το Παγκόσμιο Δίκτυο Αποτυπώματος (Global Footprint Network, GFN), που συντάσσει σε ετήσια βάση τους υπολογισμούς των Εθνικών Αποτυπώματων, θεωρεί το αποτύπωμα άνθρακα ως τμήμα του οικολογικού αποτυπώματος. Το αποτύπωμα άνθρακα ερμηνεύεται ως συνώνυμο του αποτυπώματος ορυκτών καυσίμων (fossil

fuel footprint) (GFN, 2007). Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει ορισμένους ορισμούς που έχουν προταθεί από επιχειρήσεις, Μη Κυβερνητικές Οργανώσεις (ΜΚΟ), οργανισμούς και κυβερνήσεις σχετικά με το αποτύπωμα άνθρακα.

Πίνακας 5.1: Ορισμοί του αποτυπώματος άνθρακα (ιδία επεξεργασία).

Πηγή	Ορισμός
http://bp.com/liveassets (2007)	«Το αποτύπωμα άνθρακα είναι η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται εξαιτίας των καθημερινών σας δραστηριοτήτων.»
ETAP (2007)	«Το αποτύπωμα άνθρακα είναι ένα μέτρο αντίκτυπου των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο περιβάλλον σε ποσοτικούς όρους των παραγόμενων αερίων του θερμοκηπίου, εκφρασμένων σε τόνους διοξειδίου του άνθρακα.»
Wiendmann and Minx (2007)	«Το αποτύπωμα άνθρακα είναι ένα μέτρο της ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων.»
Parliamentary Office of Science and Technology (POST, 2006)	«Το αποτύπωμα άνθρακα είναι η συνολική ποσότητα CO ₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, που εκπέμπονται καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής μιας διαδικασίας ή ενός προϊόντος. Εκφράζεται σε ισοδύναμα γραμμάρια διοξειδίου του άνθρακα ανά κιλοβατώρα παραγωγής (gCO ₂ eq / kWh).»

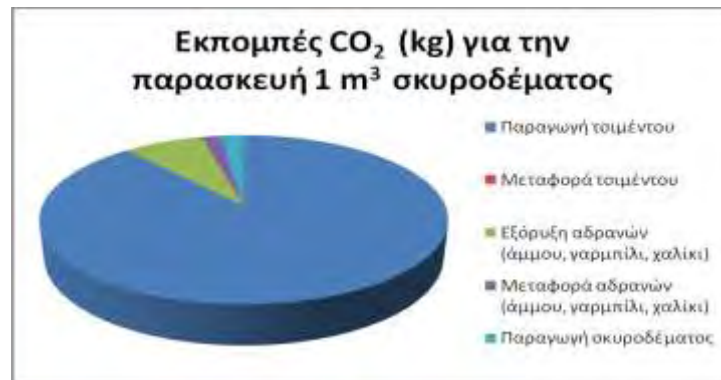
5.3 Παράδειγμα εκπομπής ρύπων μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας.

5.3.1 Εκπομπές CO₂.

Το σκυρόδεμα είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο στην κατασκευή παγκοσμίως. Οι άνθρωποι δεν καταναλώνουν κανένα άλλο υλικό σε τόσες ογκώσιμες ποσότητες, με εξαίρεση αυτή του νερού. Πρόσφατες εκτιμήσεις για την παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου έχουν δείξει ότι είναι της τάξης των $2,50 \times 10^9$ κάθε χρόνο, το οποίο αντιστοιχεί στην παραγωγή ενός κυβικού μέτρου ανά άτομο κάθε χρόνο (Gartner, 2004). Αυτό οδηγεί σε μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα εξαιτίας της χρήσης του τσιμέντου ως συνδετικό υλικό των αδρανών για την κατασκευή του τσιμέντου. Συγκεκριμένα, πρόσφατες έρευνες έχουν επιβεβαιώσει ότι η παραγωγή τσιμέντου είναι η πρωτογενής πηγή για την εκπομπή CO₂ και υπεύθυνη για το 74,00-81,00 % των εκπομπών CO₂ του σκυροδέματος. Πιο αναλυτικά για την παραγωγή 1 kg τσιμέντου εκπέμπονται συνολικά 0,79 kg CO₂ ενώ για 1 m³ σκυροδέματος 220,62 kg αντίστοιχα (Σχήμα 5.1 και 5.2).



Σχήμα 5.1: Παρουσίαση συνόλου εκπομπών CO₂ (kg) από κάθε ενέργεια για την παραγωγή 1kg (Γιάμα, 2009, ίδια επεξεργασία).



Σχήμα 5.2: Παρουσίαση συνόλου εκπομπών CO₂ (kg) από κάθε ενέργεια για την παραγωγή 1m³ (Γιάμα, 2009, ίδια επεξεργασία).

Οι εκπομπές CO₂ από την τσιμεντοβιομηχανία αποτελούν το 5,00 % των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών. Συγκεκριμένα, οι συνολικές άμεσες εκπομπές CO₂ από τα εργοστάσια παραγωγής και άλεσης τσιμέντου μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας, κατά το έτος 2010 ήταν 10,10 εκατομμύρια τόνοι. Το 2009 συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς οι εκπομπές από τα οχήματα και τον κινητό εξοπλισμό των εγκαταστάσεων. Οι ειδικές εκπομπές CO₂ για το έτος 2010 ήταν 697,70 kg CO₂ ανά τόνο προϊόντος.



Σχήμα 5.3: Παρουσίαση συνόλου μικτών άμεσων εκπομπών CO₂ (εκατ. τόνοι CO₂ / έτος), των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr/userfiles/File/csr2010/CSR_GR.pdf, ίδια επεξεργασία).

Σημειώσεις:

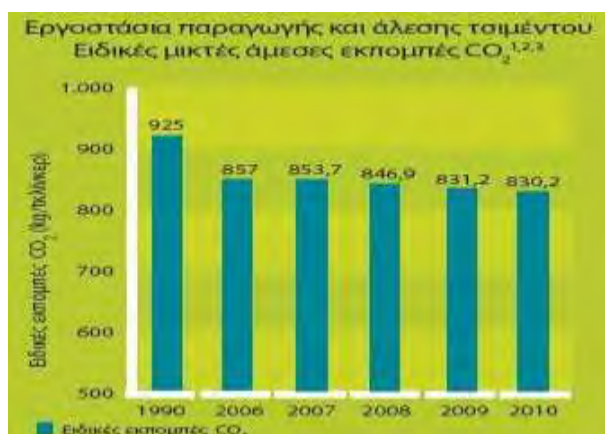
1. Οι συνολικές εκπομπές για τα έτη 1990 – 2008 επανυπολογίστηκαν το 2009, σύμφωνα με τη WBCSD/CSI λαμβάνοντας υπόψη αλλαγές στη μετοχική συμμετοχή της τσιμεντοβιομηχανίας.
2. Οι εκπομπές CO₂ πριν από το 2008 δεν περιλαμβάνουν εκπομπές που σχετίζονται με οχήματα και κινητό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται εντός των εργοστασίων.
3. Οι καθαρές εκπομπές ισούνται με τις μικτές εκπομπές μείον τα δικαιώματα που έχουν αποκτηθεί λόγω πιστοποιημένων μειώσεων εκπομπών (CER) από τη χρήση αποβλήτων ως εναλλακτικών καυσίμων.



Σχήμα 5.4: Παρουσίαση ειδικών μικτών άμεσων εκπομπών CO₂ (CO₂ kg/τόνο προϊόντος), των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr/userfiles/File/csr2010/CSR_GR.pdf, ιδία επεξεργασία).

Σημειώσεις:

1. Οι ειδικές εκπομπές υπολογίζονται βάσει της κεφαλαιακής συμμετοχής της τσιμεντοβιομηχανίας το 2009.
2. Οι εκπομπές CO₂ πριν από το 2008, δεν περιλαμβάνουν εκπομπές που σχετίζονται με τα οχήματα και τον κινητό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται εντός του εργοστασίου.
3. Οι καθαρές εκπομπές ισούνται με τις μικτές εκπομπές μείον τα δικαιώματα που έχουν αποκτηθεί, λόγω πιστοποιημένων μειώσεων εκπομπών (CER) από τη χρήση απορριμμάτων ως εναλλακτικών καυσίμων.
4. Το προϊόν ισούται με υλικά που έχουν παρεμφερείς με το τσιμέντο ιδιότητες, όπως ορίζεται από το WBCSD/CSI.



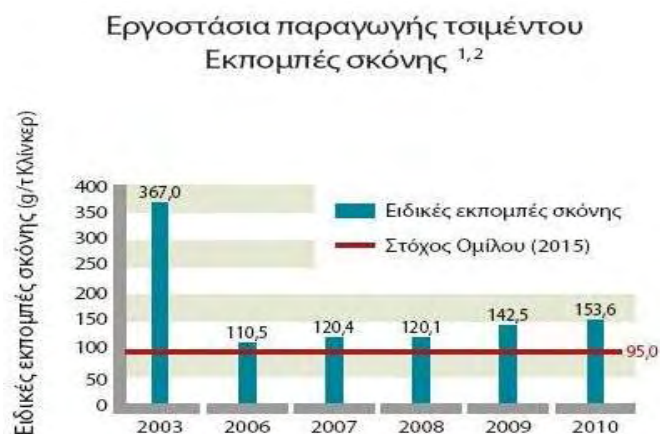
Σχήμα 5.5: Παρουσίαση ειδικών μικτών άμεσων εκπομπές CO₂ (CO₂ kg/τόνο κλίνκερ), των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr/userfiles/File/csr2010/CSR_GR.pdf, ίδια επεξεργασία).

Σημειώσεις:

1. Οι ειδικές εκπομπές υπολογίζονται με βάση τη μετοχική συμμετοχή της τσιμεντοβιομηχανίας κάθε χρονιά.
2. Οι εκπομπές CO₂ πριν από το 2008 δεν περιλαμβάνουν εκπομπές που σχετίζονται με τα οχήματα και τον κινητό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται εντός των εργοστασίων.
3. Οι καθαρές εκπομπές ισούνται με τις μικτές εκπομπές μείον τα δικαιώματα που έχουν αποκτηθεί, λόγω πιστοποιημένων μειώσεων εκπομπών (CER) από τη χρήση αποβλήτων ως εναλλακτικών καυσίμων.

5.3.2 Εκπομπές σκόνης.

Η σκόνη αποτελεί έναν σημαντικό βιομηχανικό παράγοντα ρύπανσης του περιβάλλοντος. Στα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου η κυριότερη εστία εκπομπής σκόνης είναι η παραγωγική διαδικασία. Αιωρούμενη σκόνη δημιουργείται ωστόσο και κατά τη μεταφορά των υλικών (διάχυτη σκόνη), η συνεχής μέτρηση και παρακολούθηση της οποίας δεν είναι εφικτή. Κατά το έτος 2010, οι συνολικές εκπομπές σκόνης ανήλθαν σε 1.866,00 τόνοι, ενώ οι ειδικές εκπομπές ήταν 153,60 gr/ton κλίνκερ.



Σχήμα 5.6: Παρουσίαση εκπομπών σκόνης (gr σκόνης/τόνο κλίνκερ), των εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr/userfiles/File/csr2010/CSR_GR.pdf, ίδια επεξεργασία).

Σημειώσεις:

1. Οι ειδικές εκπομπές κάθε χρονιάς υπολογίστηκαν με βάση τη μετοχική συμμετοχή της τσιμεντοβιομηχανίας το έτος 2009.
2. Ο στόχος της τσιμεντοβιομηχανίας υπολογίστηκε με βάση τη μετοχική συμμετοχή της το 2009.

5.3.3 Εκπομπές NO_x.

Η καύση σε υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί στη δημιουργία και εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO_x). Επιστημονικές μελέτες έχουν συνδέσει τις εκπομπές NO_x με τη δημιουργία όξινης βροχής και αιθαλομίχλης. Κατά το έτος 2010, οι εκπομπές NO_x μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας ήταν 22.561,00 τόνοι και οι ειδικές εκπομπές ήταν 1.857,00 gr/ton κλίνκερ, βάσει της παραγωγικής δυναμικότητας του ομίλου.



Σχήμα 5.7: Παρουσίαση ειδικών εκπομπών NO_x (gr NO_x / t κλίνκερ) των εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr/userfiles/File/csr2010/CSR_GR.pdf, ίδια επεξεργασία).

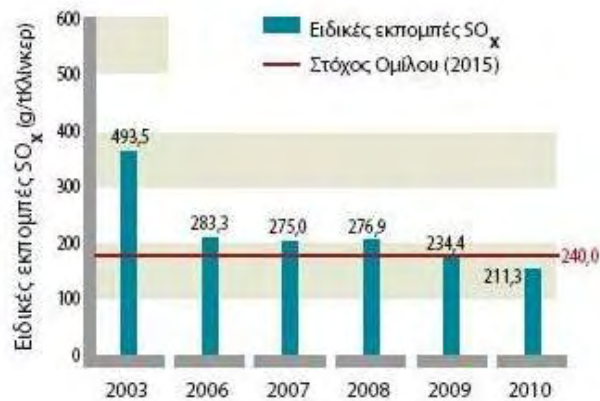
Σημειώσεις:

1. Οι ειδικές εκπομπές υπολογίζονται βάσει της παραγωγικής δυναμικότητας της τσιμεντοβιομηχανίας το 2009.
2. Ο στόχος της τσιμεντοβιομηχανίας υπολογίστηκε με βάση τη μετοχική συμμετοχή της το έτος 2009.

5.3.4 Εκπομπές SO_x.

Η παρουσία του θείου (S) στις πρώτες ύλες είναι η βασική αιτία εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x), που συνδέονται άμεσα με την δημιουργία της όξινης βροχής. Είναι επομένως, ζωτικής σημασίας να περιοριστούν οι εκπομπές αυτές στο ελάχιστο δυνατό. Οι εκπομπές SO_x μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας κατά το 2010 ήταν 2.567 τόνοι, ενώ οι ειδικές εκπομπές ήταν 211,30 gr/ton κλίνκερ.

Εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου
Εκπομπές SO_x (ως ισοδύναμο SO₂)^{1,2}



Σχήμα 5.8: Παρουσίαση των ειδικών εκπομπών SO_x, (gr SO_x / t κλίνκερ) των εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr/userfiles/File/csr2010/CSR_GR.pdf, ιδία επεξεργασία).

Σημειώσεις:

1. Οι ειδικές εκπομπές υπολογίζονται βάσει της παραγωγικής δυναμικότητας της τσιμεντοβιομηχανίας το 2009.
2. Ο στόχος της τσιμεντοβιομηχανίας υπολογίστηκε με βάση τη μετοχική συμμετοχή της το έτος 2009.

6. ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.

6.1 Εισαγωγή.

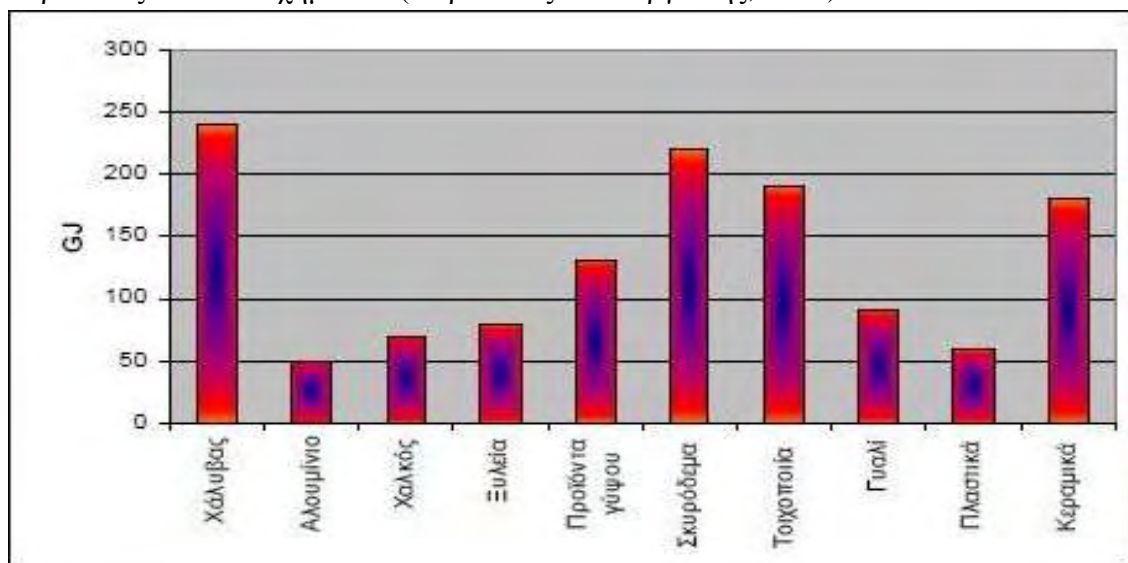
Ενσωματωμένη ενέργεια είναι η ενέργεια που χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένα προϊόν. Η κατανάλωση της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή, τη δημιουργία, τη μεταφορά του προϊόντος που παρασκευάζεται, αφορούν στην ενσωματωμένη ενέργεια. Η ενσωματωμένη ενέργεια ενός υλικού είναι μείζονος σημασίας, καθώς υλικά με μεγάλη ενσωματωμένη ενέργεια προκαλούν γενικά κατά τη διαδικασία παραγωγής μεγάλες εκπομπές CO₂ και θερμική ρύπανση.

Οι τιμές της ενσωματωμένης ενέργειας των διαφόρων υλικών διαφοροποιούνται σύμφωνα με τις εξής παρατηρήσεις:

- Η ενσωματωμένη ενέργεια ενός υλικού που παράγεται σε μία χώρα με συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία, είναι πολύ πιθανόν να είναι πολύ διαφορετική από την ενσωματωμένη ενέργεια του ίδιου υλικού που παράγεται σε κάποια άλλη χώρα με διαφορετική παραγωγική διαδικασία.
- Στην ενσωματωμένη ενέργεια περιλαμβάνεται και η ενέργεια μεταφοράς του υλικού στην τελική του θέση. Έτσι, το ξύλο που είναι ανανεώσιμη πρώτη ύλη, με μικρή ενσωματωμένη ενέργεια, όταν προέρχεται από τον Αμαζόνιο η ενσωματωμένη ενέργειά του αυξάνεται κατά πολύ.

Η ενσωματωμένη ενέργεια ενός υλικού εξαρτάται κυρίως από την επεξεργασία που δέχεται το υλικό αυτό. Για το λόγο αυτό διαφορετική είναι η ενσωματωμένη ενέργεια που περιέχεται σε διαφορετικές μορφές του ίδιου υλικού.

Είναι γνωστό ότι χρησιμοποιούνται πολλά και διαφορετικά υλικά σε ένα κτίριο, με διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής το καθένα. Σύμφωνα με το ποσοστό συμμετοχής κάθε υλικού στην κατασκευή, προκύπτει η συνολική ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών του κτηρίου. Η ενέργεια έχει υψηλό κόστος και το σύστημα έχει αντιδράσει σχεδόν από μόνο του και χρησιμοποιεί υλικά με μικρή ενσωματωμένη ενέργεια. Από διάφορες μελέτες έχει προκύψει ότι για ένα τυπικό διώροφο κτίριο η ενσωματωμένη ενέργεια που έχει καταναλωθεί σε κάθε κατασκευαστικό μέρος παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1 (Κορωναίος και Σαργέντης, 2005).



Σχήμα 6.1: Ενσωματωμένη ενέργεια υλικών κατασκευής τυπικού διώροφου κτιρίου (Κορωναίος και Σαργέντης, 2005, ίδια επεξεργασία).

6.2 Προβλήματα που συνδέονται με την ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών.

6.2.1 Το πρόβλημα του πλεονάσματος θερμότητας.

Μέχρι σήμερα υπήρχε ισορροπία ανάμεσα στην ακτινοβολία που παίρνει η γη από τον ήλιο και σε αυτή που εκπέμπει η γη στο διάστημα. Η ισορροπία επιφέρει μία μέση θερμοκρασία που ευνοεί την ανάπτυξη της ζωής όπως τη γνωρίζουμε. Τους τελευταίους δύο αιώνες η έντονη παραγωγή ενέργειας είναι ένας νέος παράγοντας στην εν λόγω ισορροπία γιατί προκαλεί θερμική ρύπανση. Θερμική ρύπανση προκαλείται γιατί κατά τη διάρκεια παραγωγής έργου υπάρχουν πολλές ενεργειακές απώλειες, κυρίως λόγω τριβών. Οι απώλειες αυτές, μολονότι γίνεται πάντα προσπάθεια να περιοριστούν, μεταφράζονται σε θερμική ρύπανση.

Όταν η εκπομπή θερμικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσα στο αστικό μικροκλίμα η δράση αυτή συμβάλει στο φαινόμενο της «θερμικής νησίδας». Εκτός αυτού το περιβάλλον της γης αποτελεί το χώρο που αποβάλλεται όση ενέργεια δεν καταναλώνεται επωφελώς. Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στη γη συμβάλει στην αύξηση της θερμότητας του πλανήτη. Αν η γήινη ακτινοβολία προς το διάστημα δεν εξουδετερώνει την αύξηση της θέρμανσης της γης η θερμοκρασία της γης θα αυξάνεται. Αυτό ενδεχομένως μπορεί να αποτελέσει έναν παράγοντα της αλλαγής του κλίματος του πλανήτη.

6.2.2 Το πρόβλημα του CO₂.

Ο άνθρακας είναι το πρωταρχικό στοιχείο της ζωής. Σχηματίζει τον τελειότερο από τους βιογεωχημικούς κύκλους και κυκλοφορεί με σχετικά μεγάλη ταχύτητα στις βιοκοινωνίες μέσα από τις τροφικές αλυσίδες. Οι κυριότερες ανόργανες μορφές της παρουσίας του άνθρακα στη φύση είναι το διοξείδιο του άνθρακα και το ανθρακικό ασβέστιο.



Εικόνα 6.1: Ο κύκλος του άνθρακα (Κορωνάιος και Σαργέντης 2005).

Από την αρχή της Τεταρτογενούς περιόδου μέχρι τη Βιομηχανική εποχή, η ανακύκλωση του άνθρακα είναι σχεδόν τέλεια και ο κύκλος σταθερός. Σε προηγούμενες όμως γεωλογικές περιόδους ο κύκλος του άνθρακα ήταν ατελής. Η φωτοσύνθεση υπερτερούσε της αναπνοής στη βιόσφαιρα με αποτέλεσμα το CO₂ στην ατμόσφαιρα να μειώνεται, το O₂ να αυξάνεται και ο άνθρακας να αποθηκεύεται στο

έδαφος και τα ιζήματα. Η σημασία της σταθερότητας των διαταραχών του κύκλου του άνθρακα γίνεται αντιληπτή αν εξεταστεί η ιστορία της ατμόσφαιρας της γης.

Η ατμόσφαιρα δεν ήταν πάντα όμοια με τη σημερινή. Την εποχή που δημιουργήθηκε περιείχε μεγάλες ποσότητες από υδρογόνο και αδρανή αέρια που χάθηκαν σύντομα στο διάστημα. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε αναγωγική ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο που περιείχε κυρίως αέρια όπως άζωτο μεθάνιο αμμωνία υδρατμούς διοξείδιο του άνθρακα κλπ. Μετά τη δημιουργία της ζωής άρχισε να παράγεται οξυγόνο με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και μέσα από ποικίλες χημικές αντιδράσεις η ατμόσφαιρα οδηγήθηκε στη σημερινή της σύνθεση που περιλαμβάνει κυρίως άζωτο οξυγόνο και σε μικρές ποσότητες αργό, υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα. Όταν ο κύκλος του άνθρακα σταθεροποιήθηκε στην αρχή της Τεταρτογενούς περιόδου η σύνθεση της ατμόσφαιρας ήταν περίπου όμοια με τη σημερινή και παρέμεινε έκτοτε σταθερή. Επί εκατομμύρια χρόνια επικράτησε μια ισορροπία κατά την οποία η παραγωγή του οξυγόνου των φυτών καταναλώνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από την αναπνοή του συνόλου των ζωντανών οργανισμών. Ωστόσο ήδη από το 19ο αιώνα η ισορροπία αυτή ανατράπηκε με την εκτεταμένη αποψίλωση των δασών και τη χρήση των ορυκτών καυσίμων που διοχετεύουν στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες άνθρακα με τη μορφή CO₂, οι οποίες παρέμεναν αποθηκευμένες στη δασική βιομάζα ή στα καύσιμα.

Η καύση των ορυκτών καυσίμων (μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας) ελευθερώνει την ενέργεια που είχε δεσμευτεί από τα φυτά στην διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, καθώς τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι τίποτε άλλο από υδρογονάνθρακες, οι οποίοι προήλθαν από την μετουσίωση των οργανικών ενώσεων που παρήγαγαν τα φυτά με την φωτοσύνθεσή τους. Η καύση των ορυκτών καυσίμων οδηγεί στη λύση γεωλογικά μετασχηματισμένων υδατανθράκων, σε CO₂, νερό και άλλες χημικές ενώσεις. Σήμερα, ο άνθρωπος χρησιμοποιεί εντατικά τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, καταναλώνοντας σε ένα χρόνο όσο οξυγόνο παρήγαγε η φωτοσύνθεση για χίλια χρόνια. Ωστόσο, η αντιστροφή των φυσικών διεργασιών δεν δημιουργεί κίνδυνο έλλειψης οξυγόνου, διότι οι ποσότητες στην ατμόσφαιρα είναι τεράστιες σε σχέση με αυτές που καταναλώνονται. Δημιουργεί όμως κινδύνους η περίσσεια CO₂ διότι η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα κατά τα τελευταία 100 χρόνια έχει αυξηθεί πολύ.

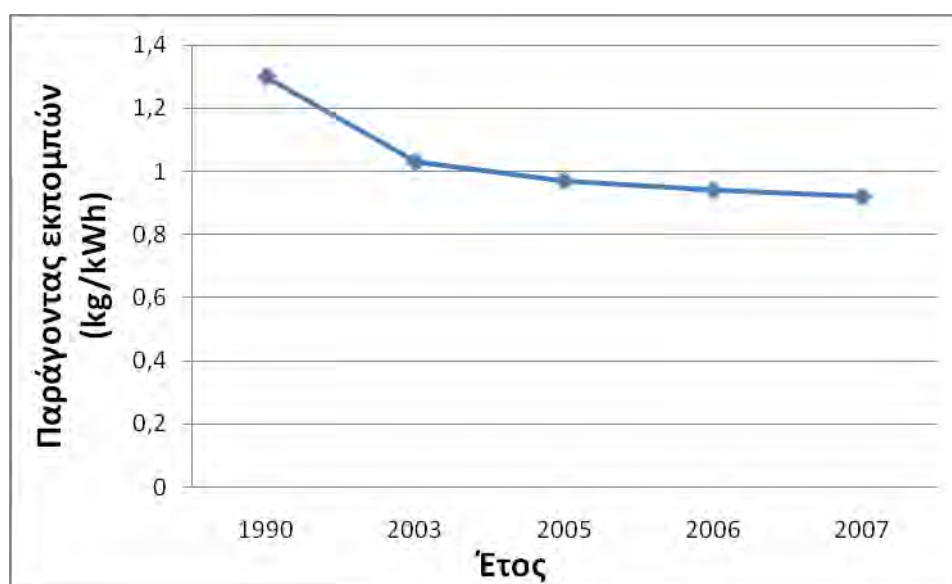
Η προκαλούμενη αύξηση του CO₂ της ατμόσφαιρας πιστεύεται ότι προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας της τροπόσφαιρας, για τον λόγο ότι το CO₂ έχει την ιδιότητα να παγιδεύει την υπέρυθη ακτινοβολία (ανθρωπογενές φαινόμενο του θερμοκηπίου). Η συμμετοχή της βιομηχανικής παραγωγής των υλικών, δεν είναι καθόλου αμελητέα στην διαταραχή του κύκλου του άνθρακα.

Η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου προκαλείται από την εκπομπή αερίων. Όπως προκύπτει, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα είναι η σημαντικότερη αιτία της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας. Ο τομέας της παραγωγής ενέργειας είναι μία από τις σημαντικότερες πηγές εκπομπών CO₂ μέσω της καύσης των ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το μερίδιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, στο σύνολο των εκπομπών CO₂ έχει αυξηθεί από 36,00 % (8,8 Gt CO₂) το 1990 σε 41,00 % (11,00 Gt CO₂) το 2005, και

αν οι σύγχρονες τάσεις συνεχιστούν με τους ίδιους ρυθμούς, αναμένεται να αυξηθεί σε 45,00 % (18,70 Gt CO₂) το 2030 (Malla, 2009). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έχουν αυξηθεί εντυπωσιακά κατά τη διάρκεια των τελευταίων 60 ετών. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών CO₂ του τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας ως έτος βάσης το 1990. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παρουσίασαν αύξηση κατά 98,00 % και 40,00 % αντίστοιχα σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 για το έτος 2007. Ο παράγοντας εκπομπών (Emission Factor, EF), που ορίζεται ως η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα (kg CO₂) που απελευθερώνεται ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (kWh), παρουσίασε αξιόλογη μείωση που έφτασε το 41,00 %. Η διαχρονική αυτή μείωση απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Η κάμψη αυτή οφείλεται στη συμβολή της υδροηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο της παραγωγής, στη χρήση ορυκτών καυσίμων υψηλής ποιότητας με χαμηλό παράγοντα εκπομπών και στην αποδοτικότερη λειτουργία των σταθμών.

Πίνακας 6.1: Διαχρονική εξέλιξη εκπομπών CO₂ (Καβουρίδης κ.ά., 2005, ίδια επεξεργασία).

Έτος	Εκπομπές CO ₂ (kt)	Ποσοστό αύξησης εκπομπών CO ₂ με βάση το έτος 1990 (%)	Καθαρή παραγωγή (GWh)	Ποσοστό αύξησης καθαρής παραγωγής με βάση το έτος 1990 (%)	Παράγοντας εκπομπών (kg/kWh)
1990	40.776		31.284		1,30
2003	53.658	31,59	52.219	66,92	1,03
2005	54.561	33,81	56.131	79,42	0,97
2006	56.533	38,64	60.064	92,00	0,94
2007	57.162	40,19	62.060	98,38	0,92



Σχήμα 6.2: Διαχρονική μείωση του Παράγοντα Εκπομπών (Emission Factor) (Καβουρίδης κ.ά., 2005, ίδια επεξεργασία).

Ο Πίνακας 6.2 παρουσιάζει τη διαχρονική εξέλιξη του παράγοντα εκπομπών CO₂ (kg/kWh) ανά είδος καυσίμου. Παρατηρείται γενικά ότι στα αποθέματα λιγνίτη

δεν εμφανίζεται σημαντική μείωση του παράγοντα διαχρονικά. Το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο εμφανίζουν μείωση του παράγοντα εκπομπών κατά 4,40 % (σε σχέση με το 2003) και 9,60 % (σε σχέση με το 1990), αντίστοιχα. Η μείωση σχετίζεται άμεσα με την υψηλή θερμική αξία των καυσίμων και τη συνολικά υψηλότερη απόδοση των πετρελαϊκών και των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν με φυσικό αέριο.

Πίνακας 6.2: Συντελεστές εκπομπών CO₂ (kg / kWh) ανά είδος καυσίμου (Καβουρίδης κ.ά., 2005, ίδια επεξεργασία).

Έτος	Σύνολο Λιγνιτών	Φυσικό Αέριο	Πετρέλαιο
1990	1,55	-	0,83
2003	1,40	0,45	0,79
2005	1,33	0,47	0,75
2006	1,34	0,43	0,75
2007	1,33	0,43	0,75

Γενικά υπάρχει μια τάση των ανεπτυγμένων χωρών στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, ώστε η παγκόσμια θερμοκρασία να μην υπερβεί τους 2°C. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευτεί για αυτό το κατώτατο όριο ήδη από το 2005. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, οι ετήσιες παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να μειωθούν από περίπου 28,00 Gt (2006) σε 20,00 Gt μέχρι το 2050 και σε 10,00 Gt μέχρι το 2100, σύμφωνα με τη IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να αυξηθεί από 6,40 δισεκατομμύρια (2007) σε περίπου 9,50 δισεκατομμύρια το 2050. Συγχρόνως, όλο και περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες προχωρούν στην εκβιομηχάνισή τους και κατά συνέπεια αντιγράφουν το δυτικό πρότυπο ανάπτυξης και τρόπο ζωής, προκαλώντας περαιτέρω αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι απαιτείται ο περιορισμός των εκπομπών στα βιομηχανοποιημένα έθνη καθώς και αλλαγή του τρόπου ζωής ώστε να καταστεί περισσότερο βιώσιμος ([http://timeforchange.org/CO₂-cause-of-global-warming](http://timeforchange.org/CO2-cause-of-global-warming)).

Για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η ΔΕΗ υλοποιεί τα τελευταία χρόνια μια σειρά μέτρων με θεαματικά αποτελέσματα. Την περίοδο 1990 – 2008, ο μέσος παράγοντας εκπομπών CO₂ του συνολικού συστήματος παραγωγής της ΔΕΗ από 1,30 kg/ kWh το 1990, μειώθηκε σε 1,00 kg/ kWh το 2008, σημειώνοντας μείωση ίση με 23,10 %.

Συγκεκριμένα, η υποχρέωση της ΔΕΗ για την παρακολούθηση και αναφορά των εκπομπών CO₂ αφορά 31 εγκαταστάσεις της Επιχείρησης, περιλαμβάνοντας 8 λιγνιτικούς σταθμούς, 2 φυσικού αερίου, 1 φυσικού αερίου και μαζούτ και πετρελαϊκούς σταθμούς στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα και στην Κρήτη – Ρόδο, και 15 πετρελαϊκούς αυτόνομους σταθμούς παραγωγής στα μη διασυνδεδεμένα νησιά. Οι παραπάνω σταθμοί αποτελούν την Ομάδα των Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής της ΔΕΗ, που υπόκεινται στο συστηματικό έλεγχο των εκπομπών. Την κεντρική επιμέλεια της παρακολούθησης και καταγραφής των εκπομπών διοξειδίου του

άνθρακα για την Ομάδα των Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής της ΔΕΗ έχει η Διεύθυνση Περιβάλλοντος Παραγωγής της Γενικής Διεύθυνσης Παραγωγής (ΔΕΗ, 2009).

6.2.3 Φαινόμενο του θερμοκηπίου και κλιματικές αλλαγές.

Η αύξηση της ανθρωπογενούς έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου είναι η αιτία για την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας. Η αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου, και ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα, είναι συνδεδεμένη με το φαινόμενο του θερμοκηπίου (greenhouse effect).

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο οφείλεται στη δράση αερίων μικρής συγκέντρωσης (ιχνοαερίων) στο ισοζύγιο ακτινοβολίας. Τα αέρια αυτά είναι διάσπαρτα στην ατμόσφαιρα και απορροφούν δραστικά την μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία, η οποία εκπέμπεται από τη γη προς το διάστημα. Μέρος της ακτινοβολίας αυτής εκπέμπεται εκ νέου προς τη γη με αποτέλεσμα τη θέρμανση της. Χάρη στην παρουσία των ιχνοαερίων, η θερμοκρασία της Γης είναι σήμερα κατά μέσο όρο 15 °C, ενώ στην περίπτωση απουσίας των ιχνοαερίων η θερμοκρασία θα ήταν -18 °C.

Ένα από τα σημαντικότερα ιχνοαέρια είναι το CO₂. Η ποσοστιαία κατ' όγκο συμμετοχή των αερίων θερμοκηπίου στο ανθρωπογενές (ενισχυμένο) φαινόμενο του θερμοκηπίου αποδεικνύει ότι το CO₂ είναι κυρίως υπεύθυνο για το φαινόμενο της ανθρωπογενούς πρόκλησης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην υψηλή του συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα σε σχέση με τα άλλα αέρια του θερμοκηπίου και λιγότερο στο θερμαντικό του δυναμικό που υπολείπεται σημαντικά των άλλων ιχνοαερίων. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 6.3) παρουσιάζει τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου, το μέσο χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα, το ποσοστό συμβολής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και το συντελεστή δυναμικού παγκόσμιας υπερθέρμανσης.

Πίνακας 6.3: Κυριότερα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου. (Κούγκολος, 2007. EC, 2007, Blasing, 2010, ίδια επεξεργασία).

Κυριότερα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου		Μέσος Χρόνος ζωής (έτη)	Συμμετοχή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (%)		Δυναμικό Παγκόσμιας Υπερθέρμανσης
Χημικός τύπος	Όνομασία		1988	2010	
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα	200	48	61	1
CH ₄	Μεθάνιο	11	17	15	25
N ₂ O	Υποξείδιο του αζώτου	120	6	4	298
CFC -11	Χλωροφθοράνθρακες	65	18	12	4.750
CFC-12		110			10.900

Η παρουσία στην ατμόσφαιρα των αερίων του θερμοκηπίου και ειδικότερα του CO₂ ευτυχώς προϋπήρχε της παρουσίας του ανθρώπου. Γεγονός είναι ότι το ανθρωπογενές (ενισχυμένο) φαινόμενο του θερμοκηπίου που οφείλεται στις αυξημένες καύσεις άνθρακα, είναι μία ανθρωπογενής διαταραχή η οποία σύμφωνα με

την κλασική λογική θα επισύρει αλλαγές στο κλίμα (Quadrelli and Peterson, 2007). Όμως το σαφές αίτιο των αλλαγών αυτών δηλαδή η ανθρωπογενής αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί ένα αδιευκρίνιστου ύψους ποσοστό των αιτιών που επηρεάζουν δραστικά τις όποιες κλιματικές αλλαγές.

Βέβαιο είναι ότι οι δράσεις αυτές συμβάλλουν στην πρόκληση αλλαγής της ισορροπίας της βιόσφαιρας. Δεν είναι όμως ακόμα δυνατό να αποδοθεί με βεβαιότητα μια παρατηρούμενη κλιματική αλλαγή από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Έχει διαπιστωθεί ότι το κλίμα στον πλανήτη μας ουδέποτε υπήρξε σταθερό και εμφανίζει σημαντικές διακυμάνσεις σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Το κλίμα αλλάζει με διαδικασίες που δεν ξέρουμε και με τρόπους τους οποίους δεν είμαστε σε θέση να εξηγήσουμε. Συνεπώς, δεν είναι δόκιμο να παραπέμπονται μονοσήμαντα τα αποτελέσματα των ερευνών (όπως η αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ ή η θερμική ρύπανση) ως η αιτία της αλλαγής του κλίματος του πλανήτη, αλλά ως η αιτία της αλλαγής της τάξης του οικοσυστήματος.

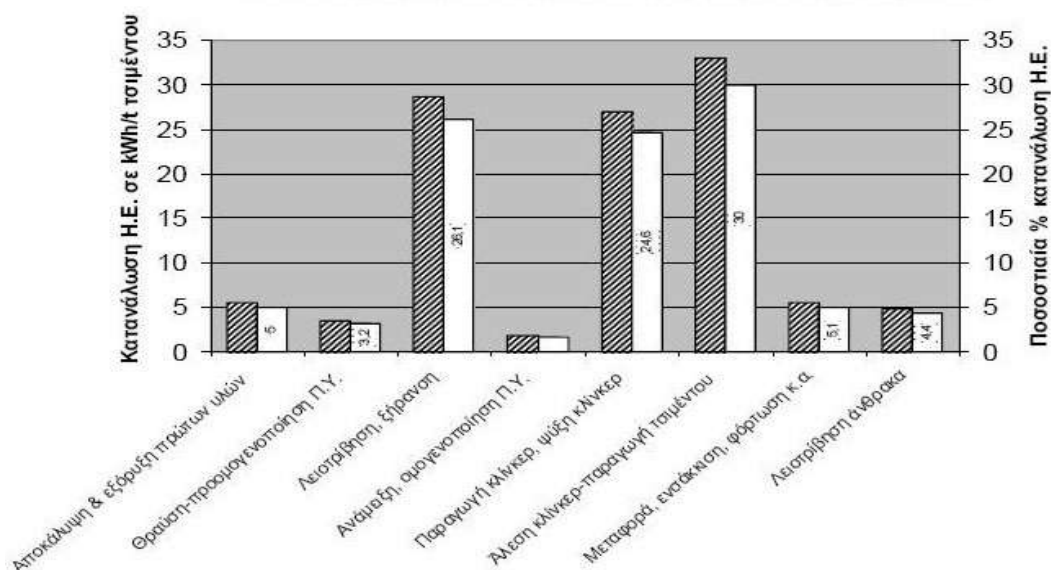
6.3 Ενσωματωμένη ενέργεια στην παραγωγή τσιμέντου.

Η κύρια κατανάλωση θερμικής ενέργειας στην παρασκευή τσιμέντου γίνεται κατά την καύση στην κάμινο. Οι κύριοι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι περιστροφικές κάμινοι, οι μύλοι άλεσης τσιμέντου, φαρίνας και στερεών καυσίμων και οι μεγάλοι ανεμιστήρες. Κατά μέσο όρο, η ενέργεια αποτελεί το 50,00 % του συνολικού κόστους παραγωγής. Μεγάλη προσπάθεια έχει καταβληθεί στην έρευνα για νέες μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας, από τη βιομηχανία τσιμέντου.

Η θεωρητική κατανάλωση θερμικής ενέργειας από τα συστήματα της καμίνου, σύμφωνα με την οδηγία 96/61/EK, για τις απαιτούμενες χημικές αντιδράσεις είναι περίπου 1.700-1.800 MJ/ton κλίνκερ. Η πραγματική κατανάλωση ποικίλλει ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο και είναι περίπου ίση με 3.000 MJ/ton κλίνκερ για ξηρή διεργασία με κλιβάνους εξοπλισμένους με προθερμαντές και προασβεστοποιητές, 3.100-4.200 MJ/ton κλίνκερ για ξηρή διεργασία με κλιβάνους εξοπλισμένους με προθερμαντές, 3.300-4.500 MJ/ton κλίνκερ για ημι-ξηρές/ημι-υγρές διεργασίες (Lepol), μέχρι 5.000 MJ/ton κλίνκερ για ξηρή διεργασία με μακρούς κλιβάνους, 5.000-6.000 MJ/ton κλίνκερ για μακριούς κλιβάνους υγρής διεργασίας.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με την οδηγία 96/61/EK, για το σύνολο των μηχανολογικών εγκαταστάσεων κυμαίνεται από 90,00–130,00 kWh/ton τσιμέντου. Σε ότι αφορά την άλεση τσιμέντου, η κατανάλωση ενέργειας σε συμβατικούς σφαιρόμυλους κυμαίνεται μεταξύ 28,00-33,00 kWh/ton τσιμέντου για το συνηθισμένο τσιμέντο Portland. Άλλοι τύποι τσιμέντου απαιτούν μέχρι και 85,00 kWh/ton τσιμέντου σε σφαιρόμυλο. Αντίστοιχα, στους κάθετους κυλινδρόμυλους η κατανάλωση ενέργειας είναι 25,00-45,00 kWh/ton τσιμέντου, ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου που παράγεται. Οι διπλοί κυλινδρόμυλοι υψηλής πίεσης έχουν μέχρι στιγμής τη μικρότερη κατανάλωση για τη διεργασία άλεσης, η οποία ισούται με 15,00-20,00 kWh/ton τσιμέντου.

Κατανομή κατανάλωσης Η.Ε. στην παραγωγή τσιμέντου



■ κατανάλωση Η.Ε. σε kWh □ Ποσοστιαία κατανάλωση Η.Ε. στην παραγωγή τσιμέντου

Σχήμα 6.2: Κατανάλωση και ποσοστιαία κατανομή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην παραγωγή τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010, ίδια επεξεργασία).

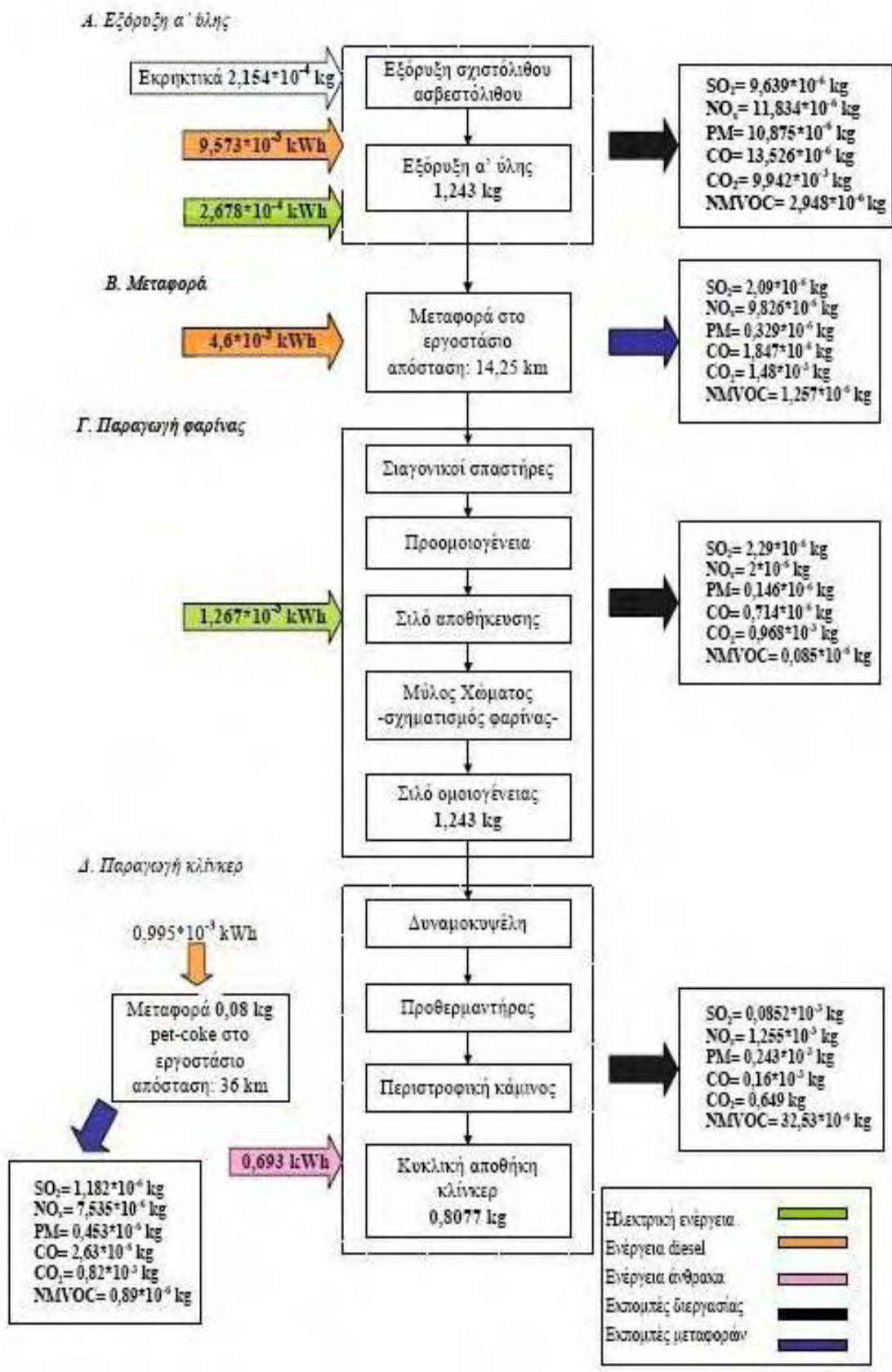
Βάσει του Σχήματος 6.2, το 63,70 % της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στην παραγωγή τσιμέντου αφορά στις διεργασίες θραύσης, λειτουργία και ξήρανση των πρώτων υλών και επίσης στην άλεση του κλίνκερ και της γύψου. Επίσης, η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τη λειτουργία και την άλεση εξαρτάται από το μέγεθος της τροφοδοσίας (διαστάσεις των τεμαχίων κλίνκερ), το μέγεθος του προϊόντος, τα φυσικά χαρακτηριστικά του μύλου (διαστάσεις, σχέση μήκους προς διάμετρο) και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του (συντελεστής πλήρωσης, σύνθεση του φορτίου).

Επίσης, η ειδική επιφάνεια του τσιμέντου (λεπτότητα) εξαρτάται από το μέγεθος των τεμαχίων του προϊόντος. Έχει διαπιστωθεί ότι η ειδική ενέργεια άλεσης είναι συνάρτηση της σκληρότητας του κλίνκερ (δείκτης έργου ή δείκτης Bond, w_i) και της λεπτότητας Blaine του τσιμέντου που θα παραχθεί και με πολύ καλή προσέγγιση, δίνεται από την σχέση:

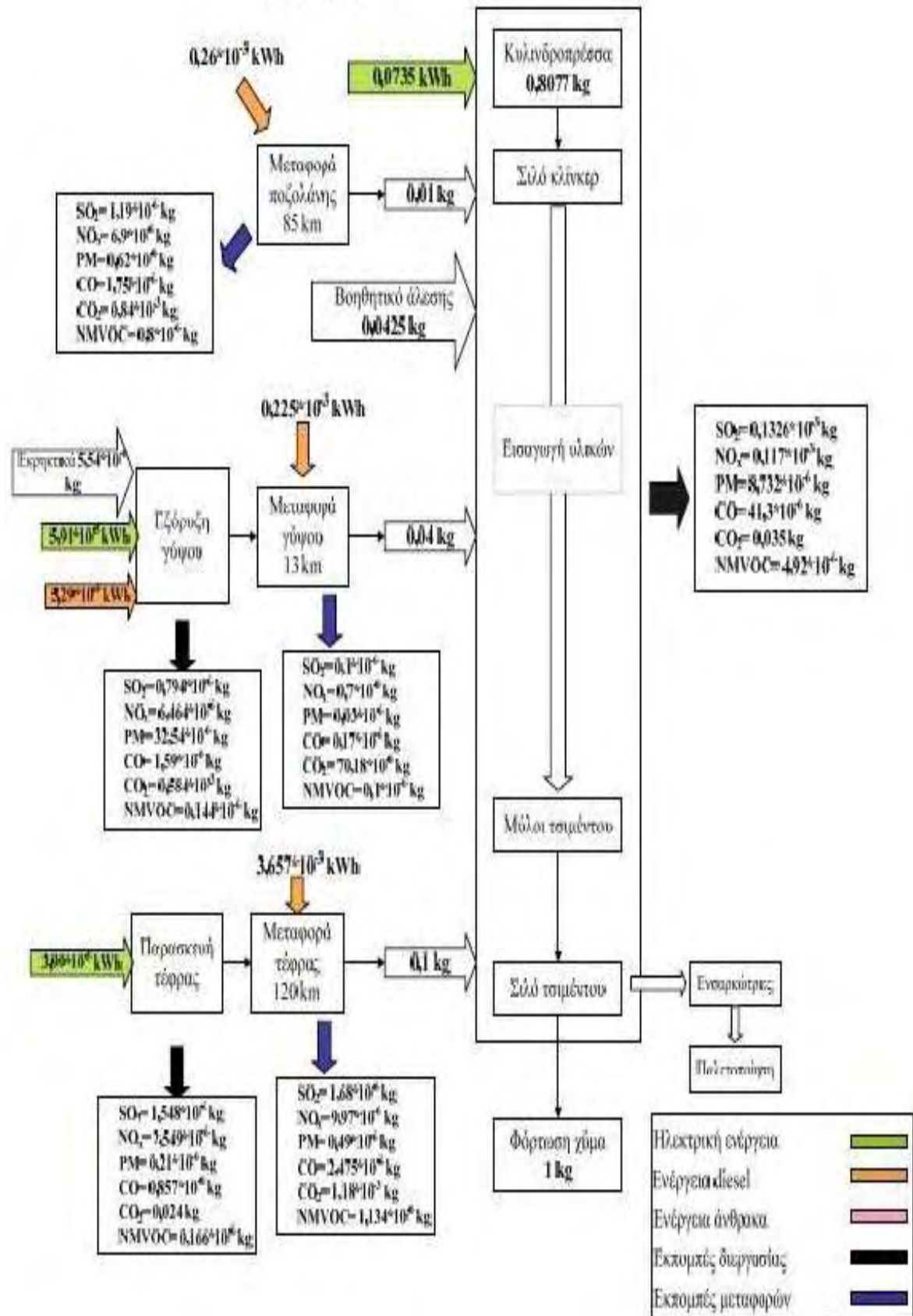
$$E = 10 \left(1.74 \cdot 10^{-4} \cdot F_{Bl} + 0.035 \cdot w_i + 0.4714 \right)$$

όπου: E η ενέργεια άλεσης του κλίνκερ σε kWh/ton, F_{Bl} η λεπτότητα του τσιμέντου σε cm^2/g και w_i ο δείκτης έργου σε kWh/short ton. Στους συντελεστές της εξίσωσης έχει ενσωματωθεί ο συντελεστής μετατροπής: 1 short ton = 0,907 t (Τσακαλάκης, 2010).

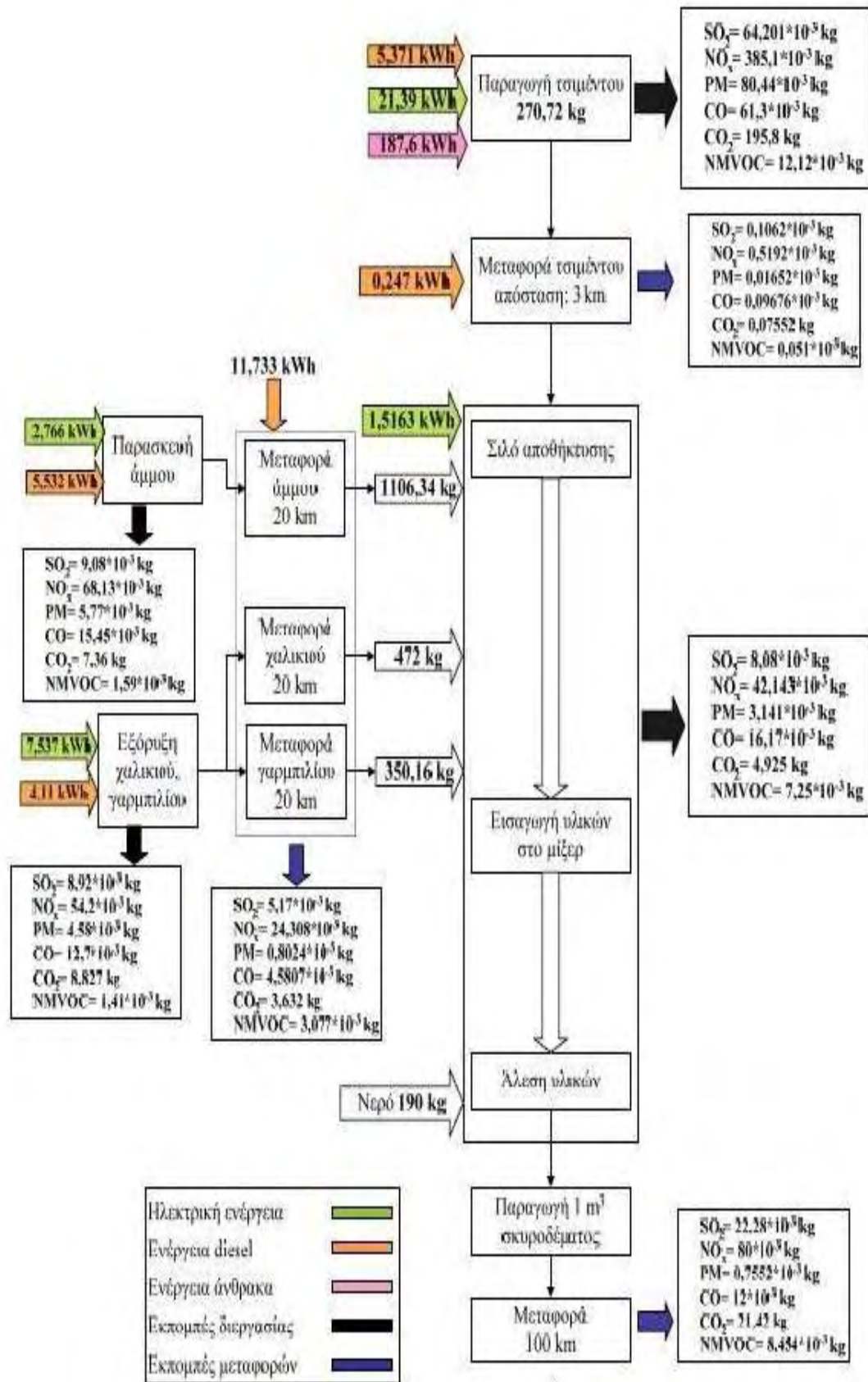
Για την παραγωγή σκυροδέματος χρησιμοποιούνται είτε οχήματα παρασκευής – μεταφοράς σκυροδέματος, είτε μηχανικός σταθερός αναμκτήρας. Τα οχήματα παρασκευής – μεταφοράς σκυροδέματος παρουσιάζουν υποδύναμη της τάξεως των 309,00 kW (414,00 HP). Για την παραγωγή 1 m^3 σκυροδέματος η ενέργεια που απαιτείται για την μεταφορά (κατανάλωση πετρελαίου) των πρώτων υλών του σκυροδέματος (τσιμέντο και αδρανή υλικά) είναι της τάξεως των 12,00 kWh.



Ε. Παραγωγή τσιμέντου



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα ροής διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου (Γιάμα, 2009).



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα ροής παραγωγής 1 m³ σκυροδέματος (Γιάμα, 2009).

Κατά το έτος 2010, σε εργοστάσιο μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας παρήχθησαν 1.803.000 τόνοι κλίνκερ, 2.080.889 τόνοι τσιμέντου και 2.119.493 τόνοι ‘cementitious materials’. Ο όρος ‘cementitious materials’ αναφέρεται στο τελικό προϊόν του τσιμέντου, που αναλόγως με τον τύπο, περιλαμβάνει κλίνκερ, γύψο και διάφορα πρόσθετα υλικά (όπως ποζολάνη, ασβεστόλιθος, ιπτάμενη τέφρα).

Για την παραγωγή των παραπάνω απαιτείται η κατανάλωση καυσίμων, τα οποία καταναλώνονται στους κλιβάνους και στην θέρμανσή τους, σε οχήματα εντός του εργοστασίου και στις εστίες των μύλων. Καθώς και στα μηχανήματα και οχήματα που χρησιμοποιούνται στα λατομεία εξόρυξης των πρώτων υλών. Οι ποσότητες των απαιτούμενων καυσίμων και ενέργειας δίνονται παρακάτω, χωρίς όμως να περιλαμβάνονται τα καύσιμα που καταναλώνουν τα οχήματα και τα μηχανήματα των εργολάβων, είτε στο εργοστάσιο είτε στα λατομεία, καθώς και οι εξωτερικές μεταφορές από και προς το εργοστάσιο.

Η κατανάλωση πετρελαίου από τα μηχανήματα αντιστοιχεί σε ενέργεια της τάξεως των 1.161 GJ/y, η κατανάλωση πετρελαίου των οχημάτων αντιστοιχεί σε ενέργεια της τάξεως των 1.33 3GJ/y και η κατανάλωση πετρελαίου για την θέρμανση των κλιβάνων αντιστοιχεί σε ενέργεια της τάξεως των 2.795 GJ/y. Χρησιμοποιούνται ακόμη καύσιμα οι αντιστοιχίες των οποίων σε ενέργεια έχουν ως εξής: μαζούτ (ultra heavy) για την παραγωγή 29.862 GJ/y, κάρβουνο για την παραγωγή 429.015 GJ/y και κοκ (pet coke) για την παραγωγή 5.383.807 GJ/y. Σαν εναλλακτικά καύσιμα χρησιμοποιούνται, ελαστικά οχημάτων που αντιστοιχούν σε ενέργεια 195.429 GJ/y, RDF (Refuse Derived Fuel) που αντιστοιχούν σε ενέργεια 11.660 GJ/y, εμποτισμένο πριονίδι που αντιστοιχεί σε ενέργεια 72.071 GJ/y και οργανικά απόβλητα/βιομάζα (sewage sludges / biomass) που αντιστοιχούν σε ενέργεια 209.762 GJ/y. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 898.907 GJ/y και η επιπρόσθετη ενέργεια που καταναλώνεται στα επιμέρους μέρη του εργοστασίου (καύσιμα, συντήρηση, κ.λπ.) είναι ίση με 249.696.500 kWh/y.

6.4 Παράδειγμα ενεργειακών καταναλώσεων μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας.

6.4.1 Κατανάλωση θερμικής ενέργειας.

Οι συνολικές καταναλώσεις θερμικής ενέργειας κατά το έτος 2010 μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας, για την παραγωγή κλίνκερ και τσιμέντου ήταν 42.919 TJ. Η παρατηρούμενη αύξηση στη συνολική κατανάλωση θερμικής ενέργειας, σχεδόν κατά 15,90 % σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος ήταν αποτέλεσμα της αύξησης του όγκου της παραγωγής με την λειτουργία των δύο νέων γραμμών σε Αίγυπτο και Αλβανία. Η μέση κατανάλωση διατηρήθηκε στα ίδια επίπεδα με το προηγούμενο έτος και ήταν ίση με 3.535 MJ/ton κλίνκερ.

Η μεγαλύτερη πηγή θερμικής ενέργειας (98,60 % σε θερμικό ισοδύναμο) προέρχεται από τις συμβατικές πηγές θερμικής ενέργειας, όπως ο άνθρακας, ο πετρελαϊκός άνθρακας, το μαζούτ και το φυσικό αέριο. Το υπόλοιπο ποσοστό προέρχεται από εναλλακτικά καύσιμα. Η ποσοστιαία συνεισφορά των εναλλακτικών καυσίμων (σε θερμική βάση) μειώθηκε από 1,53 % το 2009, σε 1,43 % το 2010.



Σχήμα 6.5: Συνολική κατανάλωση θερμικής ενέργειας (TJ) και ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας (MJ/τον κλίνκερ) για την παραγωγή κλίνκερ και τσιμέντου, των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου και των λατομείων, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr, ίδια επεξεργασία).

Σημείωση:

1. Ο υπολογισμός έγινε με βάση τη μετοχική συμμετοχή της τσιμεντοβιομηχανίας σε κάθε έτος.

6.4.2 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας και τα λατομεία τους, κατά το έτος 2010 ήταν ίση με 5.900 TJ. Η περίπου κατά 9,00 % αύξηση που παρατηρείται σε σύγκριση με το έτος 2009, οφείλεται στην αύξηση του όγκου παραγωγής. Η μέση ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε μόνο κατά 4,20 % σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, λόγω της διαφοροποίησης του λόγου κλίνκερ/τσιμέντο και ισούται με 113,00 MJ/τον κλίνκερ.



Σχήμα 6.6: Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (TJ) και ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (MJ/τον κλίνκερ) για την παραγωγή κλίνκερ και τσιμέντου, των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου και των λατομείων, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr, ίδια επεξεργασία).

6.4.3 Κατανάλωση νερού.

Η ειδική κατανάλωση νερού κατά το έτος 2010 ήταν περίπου ίση με 362,30 λίτρα/τόνο τσιμέντου. Σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, η κατανάλωση νερού μειώθηκε κατά 19,10 %.



Σχήμα 6.7: Συνολική κατανάλωση νερού (λίτρα νερού/τόν τσιμέντου) των εργοστασίων παραγωγής και άλεσης τσιμέντου, μεγάλης ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας (www.titan.gr, ίδια επεξεργασία).

Σημειώσεις:

1. Ο υπολογισμός βασίστηκε στη μετοχική συμμετοχή της τσιμεντοβιομηχανίας τη συγκεκριμένη χρονιά.
2. Ο στόχος της τσιμεντοβιομηχανίας υπολογίστηκε με βάση τη μετοχική συμμετοχή της το έτος 2009.

7. ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.

7.1 Ανθεκτικότητα σκυροδέματος.

Η ανθεκτικότητα αποτελεί γενική έννοια, η οποία εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή στη μέγιστη δυνατή διάρκεια. Συγκεκριμένα αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μην φθείρεται από το περιβάλλον (φυσικό ή μη) στο οποίο εκτίθεται. Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών (διαβρωτικών μέσων) που συνιστούν το περιβάλλον όπου εκτίθεται. Εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και με μείωση της μηχανικής αντοχής του και απώλεια μάζας. Η ανθεκτικότητα μπορεί να μην αποτελεί ιδιότητα του σκυροδέματος, αποτελεί όμως ποιοτική έννοια με μεγάλη αξία. Με την βασική ιδιότητα του σκυροδέματος, την αντοχή σε μηχανική καταπόνηση, αποτελούν δύο παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης.

Οι βασικότερες αιτίες φθοράς του σκυροδέματος που καταγράφονται στην πράξη είναι η διάβρωση του σιδηροπλισμού, η ψύξη – απόψυξη στα ψυχρά κλίματα, οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των διαφόρων διαβρωτικών μέσων και οι φυσικοχημικές δράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος μεταξύ των συστατικών του. Η μελέτη των διαφόρων φυσικοχημικών δράσεων της φθοράς είναι σύνθετη και απαιτεί τη συνολική και πολύπλευρη εξέτασή τους. Η κατανόηση των φαινομένων που προκαλούν τη φθορά του σκυροδέματος επιτρέπει την αναγωγή τους σε παράγοντες ανθεκτικότητας. Οι βασικοί παράγοντες είναι η παρουσία συνδεδεμένων πόρων, η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον και η παρουσία νερού. Όταν ένας από τους παραπάνω παράγοντες υπάρχει μόνος του, χωρίς την παρουσία των υπολοίπων, τότε δεν υπάρχει κίνδυνος φθοράς του σκυροδέματος. Όταν συνυπάρχουν δύο παράγοντες η πιθανότητα φθοράς αυξάνεται σημαντικά. Ενώ, στην περίπτωση που και οι τρεις παράγοντες συνυπάρχουν, ο κίνδυνος φθοράς γίνεται μέγιστος. Η αναλυτική εξέταση των παραγόντων αυτών καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σχετίζεται με τρία ρευστά, τα οποία εισερχόμενα στο σκυρόδεμα προκαλούν τη φθορά του. Τα ρευστά αυτά είναι το νερό (με τα διαβρωτικά μέσα που περιέχει), ο ατμοσφαιρικός αέρας (CO_2 , O_2) και το ειδικό περιβάλλον (SO_4^{2-} , Cl- και αλκάλια).

Η αντοχή στο χρόνο και στο περιβάλλον, όπως και οι προκύπτουσες φθορές μιας κατασκευής εξαρτώνται άμεσα από α.) το πορώδες και τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, β.) τις περιβαλλοντικές συνθήκες και γ.) τις μηχανικές, φυσικές και χημικές επιδράσεις. Η διαπερατότητα και το πορώδες εξαρτώνται από τη σύσταση του τσιμέντου, το λόγο νερού / τσιμέντου, το βαθμό συμύκνωσης, τη συντήρηση του σκυροδέματος και την ύπαρξη ρωγμών σε αυτό. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζονται από τη διαθέσιμη υγρασία, την παρουσία διαβρωτικών ουσιών στο νερό και τη θερμοκρασία. (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

7.2 Περιβάλλον έκθεσης σκυροδέματος.

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος εξαρτάται άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα από τις φυσικές και χημικές δράσεις στις οποίες εκτίθεται. Είναι πιθανή η έκθεση του σκυροδέματος σε περισσότερα από ένα τέτοια περιβάλλοντα και ως εκ τούτου ο συνδυασμός της επίπτωσής τους. Οι γενικές περιπτώσεις έκθεσης του σκυροδέματος σε περιβαλλοντικές δράσεις είναι οι εξής:

- Δεν υπάρχει κίνδυνος για διάβρωση ή άλλη προσβολή του σκυροδέματος στο εσωτερικό οικοδομών με πολύ μικρό ποσοστό υγρασίας.
- Διάβρωση προερχόμενη από ενανθράκωση. Συμβαίνει όταν το οπλισμένο σκυρόδεμα εκτίθεται σε αέρα ή υγρασία. Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται τέσσερις υποπεριπτώσεις περιβάλλοντος: α.) ξηρό, όπως το σκυρόδεμα στο εσωτερικό οικοδομών με μικρό ποσοστό υγρασίας, β.) υγρό, σπάνια ξηρό, όπως πολλά θεμέλια ή κατασκευές που συγκρατούν νερό, γ.) ενδιάμεσης υγρασίας, όπως εσωτερικά οικοδομών με ενδιάμεσο ή μεγάλο ποσοστό υγρασίας καθώς και εξωτερικές όψεις κτιρίων προφυλαμμένες από βροχή και δ.) συνεχείς κύκλοι υγρού και ξηρού περιβάλλοντος, όπως είναι επιφάνειες που άλλοτε έρχονται σε επαφή με το νερό και άλλοτε εκτίθενται στον ήλιο.
- Διάβρωση προερχόμενη από επίδραση χλωριόντων. Συμβαίνει όταν το οπλισμένο σκυρόδεμα έρχεται σε επαφή με νερά που περιέχουν χλωριόντα, περιλαμβανομένων των νερών που περιέχουν άλατα από λιώσιμο πάγων και άλλες πηγές, εκτός από το θαλασσινό νερό. Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται οι εξής υποπεριπτώσεις: α.) ενδιάμεσης υγρασίας, όπως είναι επιφάνειες σκυροδέματος που εκτίθενται σε απευθείας ψεκασμό υγρών στα οποία υπάρχουν χλωριόντα, β.) υγρό, σπάνιο ξηρό, όπως είναι οι πισίνες και το σκυρόδεμα που εκτίθεται σε βιομηχανικά απόβλητα που περιέχουν χλωριόντα και γ.) συνεχείς κύκλοι υγρού και ξηρού περιβάλλοντος, όπως είναι μέρη γεφυρών και τα πεζοδρόμια.
- Διάβρωση προερχόμενη από την επίδραση των χλωριόντων του θαλασσινού νερού. Συμβαίνει όταν το οπλισμένο σκυρόδεμα έρχεται σε επαφή με χλωριόντα από θάλασσα ή με αέρα που μεταφέρει άλατα που προέρχονται από θαλασσινό νερό. Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται οι εξής υποπεριπτώσεις: α.) όχι άμεση επαφή με νερό, όπως είναι οι οικοδομές κοντά στις ακτές, β.) βυθισμένα μέσα στο νερό, όπως είναι τμήματα από προβλήτες και γ.) εκτεθειμένα στον παφλασμό των κυμάτων, όπως είναι τμήματα από προβλήτες.
- Έκθεση σε κύκλους πήξης – τήξης. Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται οι εξής υποπεριπτώσεις: α.) ενδιάμεσος κορεσμός με νερό που δεν έχει προϊόντα τήξης πάγων, όπως είναι κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος που εκτίθενται στη βροχή και στον παγετό, β.) ενδιάμεσος κορεσμός με νερό που έχει προϊόντα τήξης πάγων, όπως

είναι οι κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδεμάτων κυρίως σε έργα οδοποιίας που εκτίθενται σε βροχές, παγετούς και ανέμους που έχουν προϊόντα πήξης πάγων, γ.) υψηλός κορεσμός με νερό που δεν έχει προϊόντα τήξης πάγων, όπως είναι οι οριζόντιες επιφάνειες σκυροδέματος που εκτίθενται στη βροχή και στον παγετό και δ.) υψηλός κορεσμός με νερό που έχει προϊόντα τήξης πάγων, που περιλαμβάνει όλες τις άλλες αντίστοιχες περιπτώσεις.

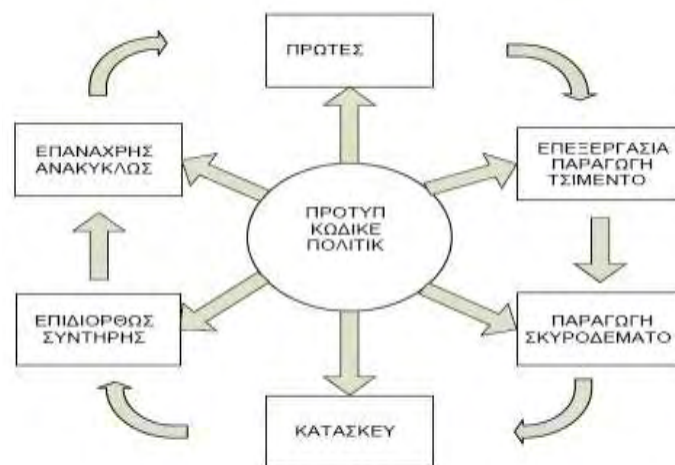
- Προσβολή με χημικά μέσα. Όταν το σκυρόδεμα προσβάλλεται από διάφορα χημικά μέσα, που βρίσκονται είτε στο έδαφος είτε στα υπόγεια ή θαλασσινά νερά. Ο βαθμός προσβολής διακρίνεται σε ασθενή, μέτριο και ισχυρό (Τσίμας και Τσιβιλής, 2010).

7.3 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κατασκευαστικής βιομηχανίας του σκυροδέματος.

Πρέπει όμως να παραδεχθούμε ότι η κατασκευαστική βιομηχανία του σκυροδέματος είναι απαιτητική τόσο σε ότι αφορά τις πηγές πρώτων υλών, όσο και στην κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή ρύπων και δεν μπορούμε να παραγνωρίζουμε η να μην μας απασχολεί η επίδραση της στο περιβάλλον σε τοπικό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο.

Για να εκτιμηθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα οποιουδήποτε κατασκευαστικού υλικού είναι απαραίτητο να συνυπολογισθούν όλες οι φάσεις της ζωής του από την παραγωγή μέχρι την κατεδάφιση και την ανακύκλωση. Η παραγωγή είναι μια περιβαλλοντικά σημαντική διεργασία και αποσπά την μεγαλύτερη προσοχή. Αλλά και η κατασκευή ενός έργου είναι επίσης σημαντική αφού απαιτεί ενέργεια και παράγει κάποια απόβλητα.

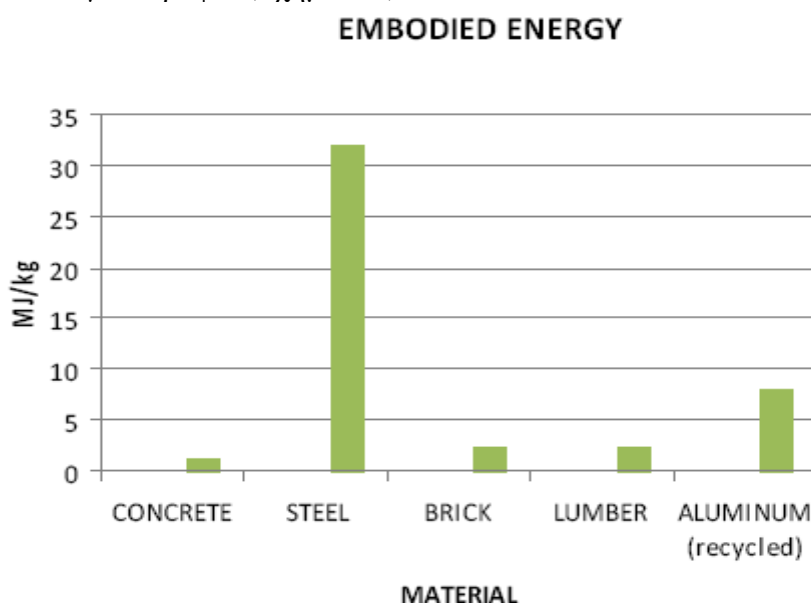
Η ποσότητα και ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία καθώς και οι μέθοδοι κατασκευής και χρήσης των υλικών ρυθμίζονται γενικά από ένα νομοθετικό πλαίσιο, δηλαδή, πρότυπα και κώδικες σχεδιασμού, πολιτικές και επαγγελματικό πλαίσιο. Έτσι στο Σχήμα 7.1 συνοψίζεται ο κύκλος ζωής του υλικού ενώ τονίζεται η σημασία που αποδίδεται στο πλαίσιο μέσα στο οποίο η κατασκευαστική βιομηχανία αναπτύσσεται και λειτουργεί.



Σχήμα 7.1 Κύκλος Ζωής το Σκυροδέματος στην Κατασκευαστική Βιομηχανία (ιδία επεξεργασία).

Η κατασκευαστική βιομηχανία έχει άμεση και εμφανή επίδραση στα παγκόσμια αποθέματα, την κατανάλωση ενέργειας και την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα. Η βιομηχανία των κατασκευών αποτελεί το 10,00 % του GDP, 7,00 % του εργατικού δυναμικού ενώ τα κτήρια καταναλώνουν το 45,00 % περίπου της απαιτούμενης ενέργειας και παράγουν το 35,00 % των ρύπων. Επιπλέον καταναλώνουν το 50,00 % των πρώτων υλών και «παράγουν» το 50,00 % των απορριμμάτων (Μοροπούλου 2007, Parrott 2002).

Συγκρινόμενο με τα μέταλλα, και άλλα δομικά υλικά, το σκυρόδεμα έχει ένα εξαιρετικό οικολογικό προφίλ (Σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.2 Ενσωματωμένη Ενέργεια του Σκυροδέματος (από δεδομένα των Hammond and Jones, 2008, επεξεργασία ίδια).

Επίσης το σκυρόδεμα σαν καθαρά δομοστατικό υλικό έχει λιγότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα από τον χάλυβα. Δηλαδή, για την ίδια μηχανική αντοχή, ένα στοιχείο από σκυρόδεμα (π.χ Δοκός) έχει λιγότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα από ένα αντίστοιχο από χάλυβα (Struble and Godfrey, 2002).

Το σκυρόδεμα είναι ένα μείγμα τσιμέντου (8,00-15,00 %), νερού (6,00-10,00 %) και σκύρων (75,00-85,00 %). Τα σκύρα, παρά το γεγονός ότι αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του μείγματος, έχουν το μικρότερο περιβαλλοντικό φορτίο. Για παράδειγμα, εάν το ποσοστό σκύρων είναι 80,00 % περίπου, τότε οι συνολικοί ρύποι εξαιτίας των σκύρων είναι μόλις 3,00 % των συνολικών ρύπων και ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος. Το βασικό περιβαλλοντικό φορτίο καθορίζεται από το τσιμέντο. Κάθε τόνο τσιμέντου απαιτεί περίπου 1,50 τόνο πρώτης ύλης και κατανάλωση ενέργειας περίπου 4.000 μέχρι 7.500 MJ ενώ απελευθερώνει περίπου 1,00 τόνο διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το σκυρόδεμα σαν υλικό, έχει κάποια εγγενή σημεία θετικής συνεισφοράς στη αειφόρο ανάπτυξη αλλά η κατασκευαστική βιομηχανία του σκυροδέματος διαθέτει περιθώρια και δυνατότητες βελτίωσης όπως φαίνονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1. Συμβολή του Σκυροδέματος στη Αειφόρο Ανάπτυξη (ιδία επεξεργασία)

Θετική Συμβολή	Δυνατότητες Βελτίωσης
Τοπικό υλικό	Απαιτεί τσιμέντο και χάλυβα των οποίων η παραγωγή εκλύει μεγάλες ποσότητες CO ₂
Απορροφά διοξείδιο (CO ₂) επιτόπου (μετά τη σκυροδέτηση)	Η ανθεκτικότητα του στο χρόνο είναι εξαρτώμενη από την ποιότητα επιτόπου η οποία δεν μπορεί εύκολα να τυποποιηθεί
Οι πρώτες ύλες δεν παράγουν μεγάλες ποσότητες απορριμμάτων	Οι κανονισμοί σχεδιασμού δεν περιλαμβάνουν άμεσα κριτήρια αειφορίας
Ανθεκτικό στο χρόνο (κάτω από προϋποθέσεις)	Η ανακύκλωση και επανάχρηση δεν έχει ενσωματωθεί στη διαδικασία παραγωγής
Ανθεκτικό σε ακραία καιρικά φαινόμενα	
Προσφέρει θερμική μάζα	
Προσφέρει μεγάλη ευελιξία σχεδιασμού	
Ανακυκλώνεται για επανάχρηση σαν πρώτη ύλη	

7.3 Αειφορία του σκυροδέματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω και προκειμένου να αποκτήσουν ουσία οι αειφορικές δυνατότητες του σκυροδέματος πρέπει να τεθούν στόχοι και στρατηγικές που θα αποτελέσουν το όραμα της κατασκευαστικής βιομηχανίας του σκυροδέματος . Βασικοί στόχοι μπορεί να είναι:

- Βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος
- Μείωση των περιβαλλοντικά απαιτητικών πρώτων υλών
- Επαύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος
- Εισαγωγή στους κανονισμούς σχεδιασμού στοιχείων αειφορίας.

Από τους τέσσερεις πιο πάνω στόχους, ο πρώτος αφορά κυρίως την βιομηχανία παραγωγής ενώ οι άλλοι τρεις αφορούν την κατασκευαστική βιομηχανία της οποίας η ανταγωνιστικότητα εξαρτάται επίσης από την ποιότητα του σχεδιασμού και της εκτέλεσης καθώς και από την δυνατότητα γρήγορης ενσωμάτωσης της σύγχρονης τεχνολογίας στο σχεδιασμό και την εκτέλεση των έργων. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν γίνει σημαντικά επιτεύγματα τα τελευταία χρόνια κυρίως με την εισαγωγή λογισμικών μεθόδων στην ανάλυση και τον σχεδιασμό, και την χρήση μηχανημάτων και εξοπλισμού αντί της χειρονακτικής εργασίας στην εκτέλεση. Επίσης με την εισαγωγή τεχνολογιών, όπως προένταση του σκυροδέματος, αυτό-συμπύκνωση κ.λ.π.

Όμως το πρόβλημα της αειφορίας της κατασκευαστικής βιομηχανίας, ενισχύεται και από την πιο κάτω κοινωνική αντίφαση: Η κοινωνία απαιτεί παραδοσιακά συνεχώς μεγαλύτερα επίπεδα αξιοπιστίας των κατασκευών και ταυτόχρονα λιγότερο κόστος.

Η ικανοποίηση των βασικών στόχων ανταγωνιστικότητας και της ταυτόχρονης κοινωνικής απαίτησης προϋποθέτει επιτυχία σε τέσσερις βασικούς άξονες που αναλύονται πιο κάτω:

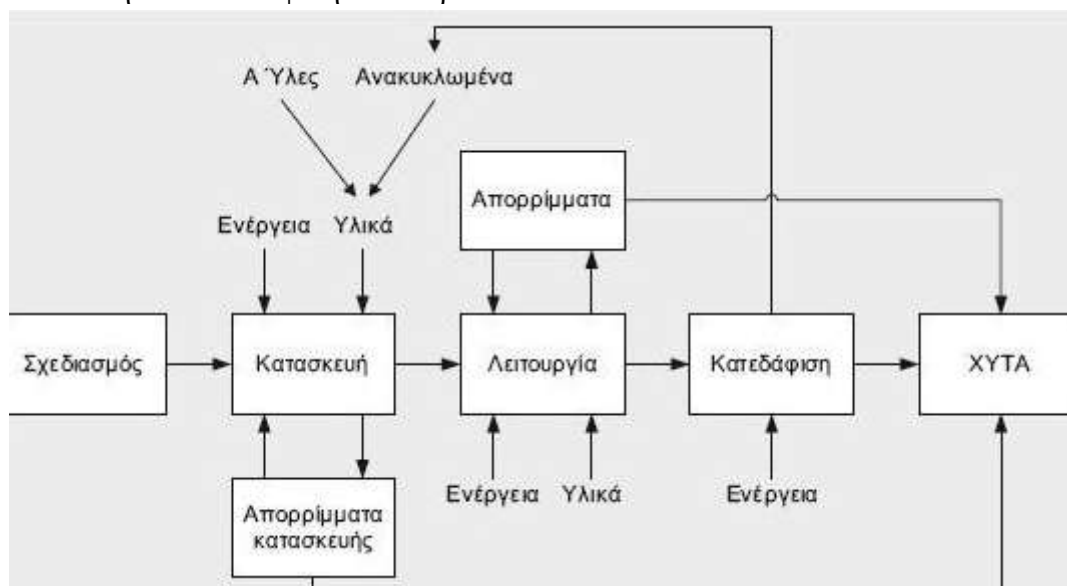
- Βελτίωση της αξιοπιστίας των μεθόδων υπολογισμού και σχεδιασμού
- Εξέλιξη των Υλικών
- Βελτίωση των Μεθόδων Αξιολόγησης Υφιστάμενων Κατασκευών
- Ολιστικό Σχεδιασμό στις Κατασκευές.

8. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.

8.1 Εισαγωγή.

Πολύ σημαντική ιδιότητα του σκυροδέματος, αποτελεί η ανθεκτικότητά του, η ικανότητα δηλαδή του σκυροδέματος να αντέχει στο χρόνο. Ως βέλτιστη διάρκεια σταθερής θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος αναφέρονται τα 50 έτη, σε ‘ιδανικές’ όμως συνθήκες (τεχνητό περιβάλλον εργαστηρίου). Σε πρακτικό και όχι σε τεχνητό περιβάλλον, μία τυπική κτιριακή κατασκευή με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, χρίζει συντήρησης και παρακολούθησης περίπου μετά από 30 έτη από την κατασκευή της. Η διαδικασία της κατεδάφισης αποτελεί το τελευταίο στάδιο του κύκλου ζωής ενός υλικού. Στην περίπτωση όμως που ακολουθήσει η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση του υλικού αυτού, τότε η κατεδάφιση αποτελεί το πρώτο στάδιο στον νέο πλέον κύκλο ζωής του.

Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου παράγονται απορρίμματα, τα οποία έχουν ως κυρίαρχο χαρακτηριστικό την έντονη διαφοροποίηση, τόσο στη σύστασή τους, όσο και στις τελικές προς διάθεση ποσότητες. Το μεγαλύτερο ποσοστό των απορριμμάτων (εξαιρουμένων αυτών που παράγονται από τους κατοίκους του κτιρίου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κτιρίου) προέρχεται κατά την κατασκευή και κατεδάφιση του κτιρίου.



Σχήμα 8.1: Διάγραμμα ροής υλικών, διεργασιών και παραγωγής απορριμμάτων στη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου (Μουσιόπουλος κ.α., 2008α, ίδια επεξεργασία).

Τα απορρίμματα από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (Α.Ε.Κ.Κ.) προκύπτουν κατά τη διάρκεια διεργασιών όπως είναι οι κατασκευές και οι κατεδαφίσεις κτιρίων που βρίσκονται στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους, οι ανακαινίσεις κτιρίων για την αισθητική και λειτουργική αναβάθμισή τους, αλλά και οι καταστροφές που οφείλονται σε ακραία καιρικά φαινόμενα.

Πίνακας 8.1: Κυριότερα παραγόμενα απορρίμματα από τα τρία βασικά στάδια κατά τον κύκλο ζωής ενός κτιρίου (Μουσιόπουλος κ.α., 2008β, ίδια επεξεργασία).

Κατεδάφιση	Ανάμεικτα. Περιλαμβάνουν σκυρόδεμα, τούβλα, σίδηρο, ξύλο, πλαστικό, καλώδια, μηχανικό εξοπλισμό, κ.τ.λ.
Κατασκευή	Ξύλο, μονωτικό υλικό, σωλήνες, απορρίμματα συσκευασιών, σκυρόδεμα, τούβλα.
Ανακαίνιση	Ξύλο, μονωτικό υλικό, σωλήνες, απορρίμματα συσκευασιών, σκυρόδεμα, τούβλα, μηχανικός εξοπλισμός.

Τα απορρίμματα από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις ανήκουν στην κατηγορία των ειδικών και βιομηχανικών αποβλήτων. Ο όρος ‘απορρίμματα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων’ είναι αρκετά γενικός και καλύπτει ένα μεγάλο εύρος υλικών. Οι πιο προφανείς κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν είναι οι εξής:

- Απορρίμματα που προκύπτουν από την ολική ή μερική κατεδάφιση κτιρίων ή / και των άλλων δομικών κατασκευών.
- Απορρίμματα που προκύπτουν από την κατασκευή κτιρίων ή / και δομικών κατασκευών.
- Χώμα, πέτρες και βλάστηση που προκύπτουν από εκχέρσωση εκτάσεων, ισοπεδώσεις, θεμελιώσεις κ.λπ..
- Απορρίμματα από την οδοποιία και τη συντήρηση οδών.

Πολύ συχνά παρατηρείται η ανάμιξη των απορριμμάτων. Ιδιαίτερο πρόβλημα δημιουργείται όταν τα απόβλητα αυτά αναμιγνύονται και με επικίνδυνα απόβλητα, όπως είναι ο αμιάντος, κάποια βαρέα μέταλλα (μόλυβδος), διαλυτικά και κόλλες. Τα παραπάνω απορρίμματα μπορεί να προέρχονται από διαφορετικού είδους εργασίες και περιοχές και αναλόγως να αλλάζει και η σύνθεσή τους.

Ανάλογα με τις ιδιομορφίες και τις υποδομές που υπάρχουν σε κάθε χώρα, υπάρχουν διάφορες δυνατότητες πρόληψης, αξιοποίησης, επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των απορριμμάτων από κατασκευές και κατεδαφίσεις. Αυτές είναι:

- Η πρόληψη, με σκοπό την μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που προέρχονται από διάφορες εργασίες εκσκαφών, κατασκευής και κατεδάφισης.
- Η εναλλακτική διαχείριση, που αποτελείται από εργασίες συλλογής, μεταφοράς, προσωρινής αποθήκευσης, διαλογής, επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης των υλικών από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις, έτσι ώστε μετά την επαναχρησιμοποίηση ή επεξεργασία τους να επιστρέφουν στο ρεύμα αγοράς.
- Η επαναχρησιμοποίηση, που είναι οποιαδήποτε ενέργεια στην οποία τα υλικά χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς που σχεδιάστηκαν, με ή χωρίς την υποστήριξη βοηθητικών προϊόντων που υπάρχουν στην αγορά.
- Η επεξεργασία, που είναι η οποιαδήποτε δραστηριότητα, συμπεριλαμβανομένης της διαλογής, αφότου τα απορρίμματα παραδοθούν σε εγκατάσταση που διαθέτει άδεια για να περιορισθούν ο όγκος ή οι επικίνδυνες ιδιότητές τους, να διευκολυνθεί η διακίνησή τους και να βελτιωθεί η ανάκτηση των περιεχομένων χρήσιμων υλικών.

- Η ανακύκλωση, η εκ νέου δηλαδή ένταξη διαφόρων υλικών σε μια παραγωγική διαδικασία προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για τον αρχικό ή για άλλους σκοπούς, στην ανακύκλωση δεν συμπεριλαμβάνεται η ανάκτηση ενέργειας.
- Η ανάκτηση ενέργειας, η οποία νοείται ως η χρήση των καυσίμων υλικών των εν λόγω απορριμμάτων, ως μέσου παραγωγής ενέργειας με άμεση καύση και ανάκτηση της θερμότητας, χωρίς ρύπανση του περιβάλλοντος.
- Η αξιοποίηση, που είναι κάθε εργασία, συμπεριλαμβανομένων των επιχωματώσεων, αποκατάστασης ανενεργών λατομείων και ανεξέλεγκτων χωματερών, επικαλύψεων χώρων υγειονομικής ταφής και γενικά αναμόρφωση υποβαθμισμένων τοπίων ή αναπλάσεων χώρων.

8.2 Νομοθεσία για τα στερεά απόβλητα.

Από το 1960 η πορεία εξέλιξης των νόμων για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων βελτιώθηκε ουσιαστικά. Απαιτήσεις σχετικά με το πού μπορούν να δημιουργηθούν εγκαταστάσεις διάθεσης και επεξεργασίας, πώς πρέπει αυτές να κατασκευασθούν και πώς αυτές θα λειτουργήσουν, γίνονται ολοένα και πιο αυστηρές. Πέρα από την επιβολή περιορισμών σε πραγματικές εγκαταστάσεις, η κρατική νομοθεσία για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων υποχρέωσε επίσης τις δημοτικές αρχές και τις επαρχίες να προχωρήσουν σε σχεδιασμό για την καλύτερη διάθεση των στερεών τους αποβλήτων.

Ακολουθώντας το παράδειγμα του Ομοσπονδιακού Νόμου για την Ανάκτηση και τη Διατήρηση των Πόρων (Federal Resource Conservation and Recovery Act – RCRA), οι πολιτείες άρχισαν να βλέπουν τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων (ΔΣΑ) σε ένα ευρύτερο πλαίσιο. Εκτός του να βλέπει κανείς μόνο τι απορρίπτεται ως απόβλητο κατά τη διάθεσή του, αναγνωρίστηκε όλο και πιο πολύ ότι τα απόβλητα περιέχουν πόρους που μπορούν να αξιοποιηθούν εάν επανέλθουν στην οικονομία. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η κύρια πορεία αυτής της τάσης οδηγούσε σε σχέδια ανάκτησης ενέργειας από απορρίμματα. Εντούτοις, το ψήφισμα της νομοθεσίας του Όρεγκο το 1983 με τίτλο «Ευκαιρία για ανακύκλωση» (Opportunity to Recycle) οδήγησε σε μια περίοδο Νομοθεσίας για τη μείωση των αποβλήτων που εστιάζεται στην ανακύκλωση, στην κομποστοποίηση και στη μείωση στην πηγή.

Με την πλειονότητα των κρατικών στόχων μείωσης των αποβλήτων να θέτονται σε εφαρμογή στις αρχές του 1990, το δεύτερο μέρος της δεκαετίας θεωρήθηκε ως μια στιγμή για τις πολιτείες να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα των προγραμμάτων διαχείρισης αποβλήτων που έχουν και να προσαρμόσουν τις προσδοκίες τους που βασίζονται σε μια αποτίμηση της προόδου τους. Για παράδειγμα κάποιες πολιτείες αύξησαν τους στόχους για ανακύκλωση με απώτερο σκοπό την επιτυχία των δικών τους προγραμμάτων ανακύκλωσης. Αφού η Νέα Ιερσέη κατόρθωσε το στόχο της για εκτροπή 25,00 % των αποβλήτων της από διάθεση, η πολιτεία διόρθωσε το στόχο της με νέα εκτροπή 65,00 % των αποβλήτων για το έτος 2000.

Ένας από τους παράγοντες που προώθησε τη νομοθεσία μείωσης αποβλήτων ήταν η αίσθηση ότι ο διαθέσιμος χώρος απόθεσης στερεών έφθινε. Ενώ αυτός ο

ισχυρισμός δεν είναι απόλυτος τεκμηριωμένος, είναι προφανές ότι οι χώροι απόθεσης στερεών σε αυτήν τη χώρα συνεχίζουν να μειώνονται. Στα τέλη του 1988, υπήρχαν τουλάχιστον 7.924 χώροι απόθεσης στερεών σε λειτουργία στη χώρα αυτή (Glenn and Riggle, 1998).

Μολονότι ο αριθμός των χώρων απόθεσης στερεών ελαττώνεται, δε σημαίνει απαραίτητα ότι υπάρχει μια ανάλογη μείωση στην ικανότητα διάθεσης. Στην Πενσυλβανία, για παράδειγμα, στα τέλη του 1988 η πολιτεία είχε 75 χώρους απόθεσης στερεών που μπορούσαν να δεχτούν δημοτικά στερεά απόβλητα, ενώ με το τέλος του 1988 υπήρχαν μόνο 51. Αλλά, παρόλο που ο αριθμός των χώρων απόθεσης στερεών μειώθηκε, η ικανότητα διάθεσης στην πολιτεία αυξήθηκε από κάτι λιγότερο από 5 χρόνια σε σχεδόν 10 με 15 χρόνια (Glenn, 1999). Στα τέλη του 1998, είχαν συμπληρωθεί στη χώρα περίπου 21 χρόνια ικανότητας απόθεσης (landfill capacity) σε ΧΥΤΑ.

Την ώρα που οι περισσότερες αλλαγές στους νόμους διαχείρισης στερεών αποβλήτων τα τελευταία 20 με 30 χρόνια μπορεί να περιγραφούν ως εξελικτικές, οι διατάξεις μείωσης αποβλήτων χαρακτηρίζονται καλύτερα ως επαναστατικές. Το 1980, την ώρα που οι περισσότερες μακροπρόθεσμες πρωτοβουλίες μείωσης αποβλήτων εφαρμόζονταν, υπήρχε νομοθεσία υποχρεωτικής προκαταβολής σε ορισμένα μεταλλικά κουτιά αναψυκτικών. Ίσως η βασικότερη πρόβλεψη σε κάθε νομοθεσία στερεών αποβλήτων να σχετίζεται με την επιβολή ενός διαπολιτειακού στόχου μείωσης αποβλήτων.

Στη διάρκεια των δεκαετιών 1980 και 1990 η νομοθεσία μείωσης αποβλήτων έδωσε βάρος στην απαίτηση από τους δήμους να αναπτύξουν προγράμματα ανακύκλωσης. Σε γενικές γραμμές, είχαν χρησιμοποιηθεί δύο προσεγγίσεις. Ένας τύπος νόμου υποχρεώνει τους δήμους να χρησιμοποιούν συστήματα παραγωγής για να διαχωρίζουν τα ανακυκλώσιμα υλικά, και σε μερικές περιπτώσεις τα κομποστοποιήσιμα υλικά, για περαιτέρω διεργασία. Η πιο επικρατούσα μορφή νομοθεσίας που επιβάλλει την ανάμειξη των δήμων είναι αυτή που επιβάλλει στις τοπικές κυβερνήσεις να επιτύχουν εξειδικευμένους στόχους. Το άλλο μοντέλο αφορά νομοθεσία που επιβάλλει στις τοπικές κυβερνήσεις να παρέχουν στους κατοίκους τους κάποια μορφή συστήματος μείωσης αποβλήτων.

Πέρα από τη μείωση αποβλήτων, μια άλλη τάση στην πολιτειακή νομοθεσία είναι μια αύξηση της αντίληψης ότι ορισμένα προϊόντα αποβλήτων χρειάζονται ειδική μελέτη όταν έρχεται η στιγμή ανάπτυξης ενός νομοθετικού πακέτου. Για παράδειγμα, χρειάζεται ειδική νομοθεσία για προϊόντα όπως σκραπ ελαστικών, χρησιμοποιημένο λάδι μηχανής και επικίνδυνα οικιακά απόβλητα. Οι πολιτείες προχωρούν πέρα από μια απλή φορολόγηση ενός υλικού και/ή στην απαγόρευση του από χώρους απόθεσης και αναπτύσσουν ευρεία προγράμματα διαχείρισης.

8.3 Κατασκευή και κατεδάφιση

8.3.1. Γενικά

Η κατασκευαστική βιομηχανία είναι πλέον ένας από τους σημαντικότερους τομείς σε παγκόσμια κλίμακα, χωρίς να αγνοήσουμε τις οικονομικές, τεχνολογικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (EU-25) υπάρχουν περίπου

2.300.000 εκατομμύρια κατασκευαστικές εταιρείες, που συνεισφέρουν κατά 9,80 % στο συνολικό Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν και απασχολούν περίπου 12.000.000 εργαζομένους που είναι το 7,10 % της συνολικής Ευρωπαϊκής εργατικής δύναμης. Η γρήγορη ανάπτυξη της κατασκευαστικής βιομηχανίας συνάδει με την υπερμεγέθη αύξηση των αποβλήτων κατά τη διαδικασία της κατασκευής και της κατεδάφισης παγκοσμίως. Συγκεκριμένα, τα κατασκευαστικά απορρίμματα αλλά και αυτά από τις κατεδαφίσεις αποτελούν τη μεγαλύτερη ροή αποβλήτων σε όλη την Ευρώπη και υπολογίζονται σε περισσότερους από 450.000.000 τόνους ετησίως. Αποκλείοντας τα γαιώδη υλικά και αυτά των εκσκαφών από το οδικό δίκτυο, η ποσότητα των απορριμμάτων από την κατασκευή και την κατεδάφιση, γενικώς, εκτιμάται να είναι περίπου 180.000.000 τόνους ανά έτος (Dorsthorst and Kowalczyk, 2002; EC, 1999). Εκτός από το σημαντικό αυτό όγκο των αποβλήτων, σε πολλές χώρες υπάρχει ακόμα έλλειψη ακριβής πληροφόρησης σε αυτόν τον τομέα, καθώς τα «μπάζα» δεν μελετώνται ξεχωριστά από τα αστικά στερεά απόβλητα.

Οι δραστηριότητες κατασκευών και κατεδαφίσεων συνεισφέρουν στα απόβλητα που αποτίθενται ετησίως σε χώρους τελικής διάθεσης στις ΗΠΑ με 136,00 εκατομμύρια ton ή 2,80 lb ανά άτομο και ημέρα (U.S. EPA, 1998). Τα απόβλητα νέων κατασκευών μπορούν να μειωθούν κτίζοντας μόνο ανάλογα με τις ανάγκες, χρησιμοποιώντας υλικά με μειωμένη ή καθόλου τοξικότητα και επιλέγοντας οικοδομικά υλικά με μειωμένη συσκευασία. Τα απόβλητα μπορούν επίσης να αποτραπούν με την επιλογή χρησιμοποίησης ανακαινισμένων ή επαναχρησιμοποιήσιμων προϊόντων, καθώς και την ένταξη στο έργο υλικών που έχουν εκτεταμένη διάρκεια ζωής.

Η μείωση των απορριμμάτων και η αποτελεσματική και βιώσιμη διαχείρισή τους είναι βασικές αρχές της Ευρωπαϊκής Περιβαλλοντικής Νομοθεσίας και Στρατηγικής. Ως μέρος της γενικότερης στρατηγικής διαχείρισης αποβλήτων, πολλές ειδικές ροές αποβλήτων έχουν οριστεί ως πρώτη προτεραιότητα με σκοπό να μειωθεί η γενικότερη περιβαλλοντική αντίδραση για κάθε ροή (EC, 1999). Τα κατασκευαστικά απόβλητα καθώς και αυτά των κατεδαφίσεων, σύμφωνα με τη Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διαχείριση των αποβλήτων, θεωρείται ως βασική προτεραιότητα που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα. Τέλος, σύμφωνα με το έκτο Πρόγραμμα Ευρωπαϊκής Δράσης με τίτλο: «Περιβάλλον 2010: Το μέλλον μας, Οι επιλογές μας», η προσέγγιση για την αντιμετώπισή του βασικού αυτού προβλήματος θα πρέπει να γίνει με σεβασμό στο περιβάλλον και να επικεντρωθεί στην αποκατάσταση του φυσικού τοπίου.

Τα απορρίμματα προερχόμενα από την κατασκευή και την κατεδάφιση περιλαμβάνουν μεγάλη ποικιλία υλικών διαφορετικής φύσεως. Ανάλογα με την προέλευσή τους κατηγοριοποιούνται όπως ακολούθως:

1. Υλικά εκσκαφών: αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει χώμα εκσκαφής, άμμος, γαρμπίλι, πέτρες αλλά και άλλα υλικά που προέρχονται από την εκσκαφή. Τα συγκεκριμένα υλικά υπάρχουν σχεδόν σε κάθε κατασκευαστική δραστηριότητα και ειδικά κατά τη διάρκεια υπόγειων έργων και γεωτεχνικών κατασκευών. Επίσης, μπορούν να προκύψουν και από φυσικά φαινόμενα όπως υπερχειλίσεις ποταμών, κατολισθήσεις

κ.α.. Η χημική τους σύνθεση εξαρτάται από τα γεωλογικά τους χαρακτηριστικά.

2. Σχεδιασμός οδικών αξόνων και υλικά συντήρησής τους: Τέτοια υλικά μπορεί να είναι άσφαλτος και όλες οι πρώτες ύλες για την κατασκευή πεζοδρομίων, όπως άμμος, γαρμπίλι, χαλύβδινο πλέγμα και υλικό προερχόμενο από αποδόμηση οδών ή ανακατασκευή τους.
3. Υλικά κατεδάφισης: Σε αυτά περιέχονται χώμα, αδρανή, κομμάτια σκυροδέματος, τούβλα, γύψο, άμμο, πέτρες επένδυσης, ξύλο, πορσελάνη κλπ.. Σε καμιά περίπτωση δεν είναι ομογενή και προέρχονται από κατεδαφισμένα κτίρια ή από άλλες δραστηριότητες στα κατασκευαστικά έργα. Η σύνθεσή τους ποικίλει και εξαρτάται από τον τύπο, την ηλικία, το σχήμα, τη χρήση και το μέγεθος του κτιρίου ενώ παράλληλα η ιστορική, πολιτιστική και οικονομική αξία του κτιρίου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην ποιότητα των υλικών κατεδάφισης.
4. Απορρίμματα εργοταξίου: Είναι κυρίως ξύλα, πλαστικά, χαρτί, γυαλί, μέταλλα, καλώδια, χρωστικές βαφές ή γυαλιστερές μπογιές, κόλλες και όλα τα υπολείμματα υλικών που απορρίπτονται μετά από τη χρήση τους στο εργοτάξιο, μετά από επισκευές, ανακαινίσεις και άλλες οικοδομικές δραστηριότητες.

8.3.2. Προέλευση απορριμμάτων κατασκευής και κατεδάφισης

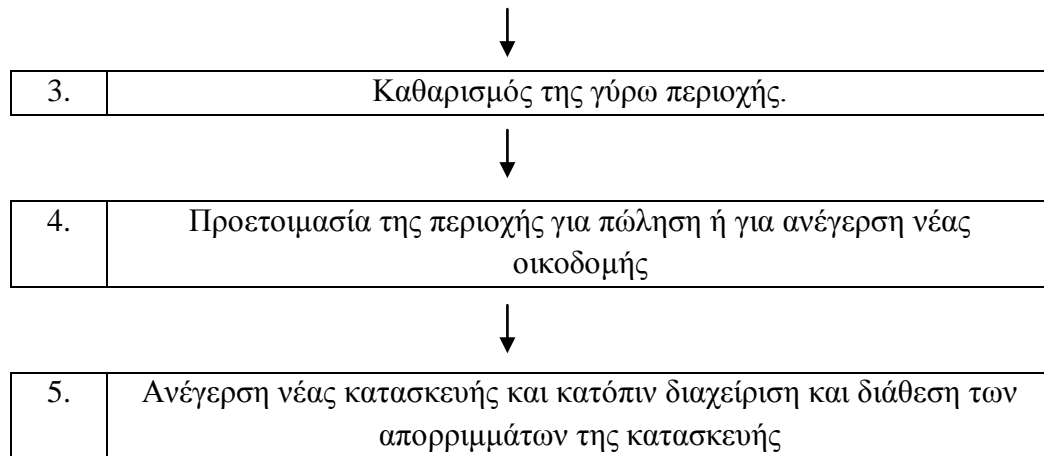
Τα απόβλητα της κατασκευής και της κατεδάφισης μπορούν να προέρχονται από διάφορες οικοδομικές δραστηριότητες και υπάρχουν κυρίως:

1. σε οικόπεδα μετά από κατεδάφιση και καθαρισμό, δηλαδή σε οικόπεδα με κατασκευές που έχουν ήδη κατεδαφιστεί αλλά καμιά οικοδομή δεν έχει προγραμματιστεί να ξεκινήσει άμεσα.
2. σε οικόπεδα με κατασκευές που πρόκειται να κατεδαφιστούν προκειμένου να ανεγερθούν νέες.
3. σε εργασίες ανακαίνισης.
4. εργοτάξια σε μη αξιοποιημένες περιοχές όπου πρόκειται να ανεγερθούν νέες οικοδομές.
5. σε εργοτάξια για τη χάραξη νέων οδικών δικτύων.
6. σε εργοτάξια για αποκατάσταση οδικών αξόνων, δηλαδή αποξήλωση παλαιού οδοστρώματος και στρώση καινούριου.

1.	Επιλεκτική αφαίρεση υλικών από την υπάρχουσα κατασκευή, πιθανώς μετά από επιτόπια επεξεργασία.
----	--



2.	Κατεδάφιση της κατασκευής, κατάλληλος διαχωρισμός των απορριμμάτων και διαχείρισή τους δίνοντας έμφαση στην ανακύκλωση και στην τελική τους διάθεση.
----	--



Σχήμα 8.1: Δραστηριότητες που συναντώνται σε εργοτάξια κατασκευών και ανακαινίσεων (ιδία επεξεργασία).

Αν η ποικιλία της σύνθεσης των οικοδομικών «μπαζών» και οι πιθανότητες διήθησης τοξικών ουσιών που περιέχονται στη σύστασή τους όταν διατίθενται ανεξέλεγκτα, ληφθούν υπόψη, είναι εμφανές ότι το σημείο έναρξης πρέπει να είναι οι τεχνικές κατεδάφισης. Όταν χαμηλού κόστους τεχνικές κατεδάφισης χρησιμοποιούνται, τότε προκύπτει ένα ανομοιογενές σύνολο υλικών. Αυτό αποτελείται από οικοδομικά υλικά, ξύλινα υλικά αλλά και διάφορα εξαρτήματα. Ένας διαχωρισμός μέσω μιας κατάλληλης διαδικασίας διαλογής θα ήταν θεμιτός και θα διευκόλυνε και τη μετέπειτα επεξεργασία.

Έχουν επιλεγθεί τρεις περιπτώσεις τυπικής διαδικασίας για τις μονάδες επεξεργασίας υλικών κατεδάφισης. Αυτές κατηγοριοποιούνται με βάση το σύστημα τους σε ξηρή και υγρή επεξεργασία, αλλά και με βάση τον εξοπλισμό τους σε κινητές και ημι-κινητές εγκαταστάσεις. Αυτές που είναι μεταφερόμενες είναι και οι πιο διαδεδομένες. Τα κινούμενα συστήματα έχουν μειώσει τα βασικά στάδια διαδικασίας του πρωταρχικού διαχωρισμού στο να γίνει η διαβάθμιση των αδρανών και με το θραυστήρα να μειωθεί το μέγεθος των μεγαλύτερων, να απομακρυνθούν οι όποιες μεταλλικές προσμίξεις και να γίνει κοκκομετρική διαβάθμιση.

Η μονάδα της ξηρής επεξεργασίας αποτελείται από ένα αρχικό κόσκινο και θραυστήρα μονής φάσης και μια εγκατάσταση καθαρισμού με αέρα. Πριν από τον καθαρισμό, το προϊόν χωρίζεται σε πέντε κλάσεις ενώ γίνεται διαφορετικά η κατηγοριοποίηση των ορυκτών και των ελαφρών αδρανών αλλά και των χαλικιών του τσιμέντου. Για την κλάση των αδρανών από 0-4/8 mm δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός της με αέρα και συνεπώς το ίδιο ισχύει κι για την κλάση μεγέθους 4/8-45,00 mm. Στο εναπομείναν υλικό περιέχεται, όμως, και παιπάλη. Το διαθέσιμο επεξεργασμένο υλικό αποτελεί το 65,00 % της αρχικής ποσότητας.

Η υγρή επεξεργασία πραγματοποιείται σε μια μονάδα όπου το υλικό, αφού κοσκινιστεί, θραύεται με σπαστήρα πολλαπλών φάσεων σε συνδυασμό με ένα θραυστήρα με σιαγόνα και ένα μύλο. Ένα άμεσο κοσκίνισμα οδηγεί το υλικό στο δεύτερο στάδιο της θραύσης. Συνεπώς, η κλάση από 16,00-45,00 mm ή περίπου το 35,00 % του συνολικού εισερχόμενου υλικού υπόκειται στην υγρή επεξεργασία. Ωστόσο, μόνο το 50,00% του τελικού προϊόντος επεξεργάζεται. Σε σχέση με τη

συνολική εισροή, εκτός από το 65,00-70,00 % του προϊόντος, περίπου το 25,00-35,00 % προκύπτει ως κλάση των αδρανών 0-8,00 mm κι επίσης περίπου το 3,00 % ως υπολείμματα και λάσπη.

8.3.3. Τοξικές ιδιότητες των απορριμμάτων κατασκευής και κατεδάφισης

Η Γενική Ευρωπαϊκή Οδηγία 91/689/EEC (1991) καθιέρωσε μια λίστα από κριτήρια για να εφαρμοστούν όταν τα απορρίμματα θεωρούνται τοξικά. Αυτή η λίστα έχει συνεπώς δημοσιευτεί ως Απόφαση Συμβουλίου 94/904/EEC (Λίστα των επικίνδυνων αποβλήτων) και πρόσφατα αναθεωρήθηκε από την Επιτροπή (2001/118/EEC).

Πολύ λίγα υλικά, τα οποία θα μπορούν να θεωρηθούν ως απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων, είναι όντως επικίνδυνα με βάση το χαρακτηρισμό τους από την Οδηγία 91/689/EEC και την Απόφαση 94/904/EEC. Ένα από τα πιο εμφανή παραδείγματα αυτής της μικρής ομάδας και σίγουρα ένα από τα οποία είναι πιο συχνά εκτεθειμένο είναι η άσβεστος. Παρόλα αυτά και κάποια άλλα υλικά μπορεί να είναι επικίνδυνα καθώς εμφανίζουν ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην Οδηγία με σκοπό να προσδιοριστεί η τοξικότητα και η καυστικότητα τους.

Επιπλέον, κάποια άλλα υλικά τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μικρές ποσότητες στα απόβλητα της κατασκευής και της κατεδάφισης, όπως μογιά κι πλαστικά, αν και δεν θεωρούνται απαραίτητα επικίνδυνα δεν είναι ούτε και αδρανή. Μεγαλύτερες, φυσικά, ποσότητες των υλικών αυτών θα αντιμετωπίζονταν διαφορετικά και ξεχωριστά.

Μερικές ομάδες των αποβλήτων προερχόμενων από τη φάση της κατασκευής και της κατεδάφισης είναι επικίνδυνες, διότι τα χρησιμοποιούμενα υλικά περιέχουν μεγάλη ποσότητα τοξικών ουσιών, όπως μόλυβδος, πίσσα, άσβεστος, μογιά και υπολείμματα. Άλλα υλικά έχουν μετατραπεί σε επικίνδυνα σαν άμεσο αποτέλεσμα της επίδρασης με τις εξωτερικές συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται εκτεθειμένα για πολλά χρόνια. Τέλος, άλλες ομάδες των αποβλήτων αυτών μπορούν να γίνουν τοξικές αν έρθουν σε επαφή με επικίνδυνα υλικά και/ή αν αναμιχθούν με αυτά.

Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η δημιουργία ενός αποτελεσματικού νομοσχεδίου ώστε να παρέχει επαρκείς λύσεις για την αποτελεσματική μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης με παράλληλη μείωση των απαιτήσεων κόστους για διάθεση. Απαιτείται να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι υπάρχουν περιοχές όπου διατίθενται ανεξέλεγκτα τα μάζα εξαιτίας της απουσίας αποτελεσματικών περιορισμών και ελλιπούς ελέγχου. Επειδή τα υλικά περιέχουν και αρκετά πρόσθετα, εκτός από την αισθητική και οικολογική βιωσιμότητα, η αυθαίρετη διάθεση των αποβλήτων στο έδαφος μπορεί να αποτελέσει σημαντική απειλή με πιθανή ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων.

Συνεπώς σε όποια έρευνα πραγματοποιείται σχετικά με την τοποθέτηση μονάδων επεξεργασίας απαιτείται να ληφθούν υπόψη τόσο περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια όσο και κοινωνικά, προκειμένου να γίνει ορθή διαχείριση.

8.3.4. Υπάρχουσα κατάσταση στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, γενικώς, χαρακτηρίζεται από την έλλειψη ενός δικτύου συλλογής και χρήσης των υλικών προς επανάχρηση που περιέχονται στα απορρίμματα της κατασκευής και της κατεδάφισης. Οι περιορισμένες δράσεις είναι εξαιρετικά εύθραυστες και εξαρτώνται από την προθυμία των υπευθύνων της κατασκευής. Για την ακρίβεια, λίγα υλικά επαναχρησιμοποιούνται αυτούσια, όπως καλώδια, γυαλιά, κάσες ανοιγμάτων. Αρκετές ποσότητες χρησιμεύουν για επιχωματώσεις ενώ η πλειονότητά τους καταλήγει σε ανεξέλεγκτες χωματερές ή σε άλλες ακατάλληλες περιοχές. Μια προσπάθεια έχει γίνει, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, για την απόρριψη των αποβλήτων αυτών σε αδρανείς περιοχές εξόρυξης ώστε να χρησιμεύσουν στην αποκατάσταση του φυσικού τοπίου. Αυτή η λύση θεωρείται εφικτή στην περίπτωση που τα αναφερόμενα απορρίμματα έχουν σωστά συλλεχθεί ώστε να χρησιμοποιηθούν ανάλογα σε κάθε μια από τις ανωτέρω περιπτώσεις.

Ο ορθός προσδιορισμός των παραγόμενων ποσοτήτων και η ακριβής μέτρηση των κατασκευαστικών αποβλήτων και αυτών από τις κατεδαφίσεις είναι δύσκολη διαδικασία. Καταρχάς, οι κατασκευαστικές εταιρείες μέχρι σήμερα δεν ήταν υποχρεωμένες να καταγράφουν και να αναφέρουν τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων που παράγουν με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτό να παρέχουν ακριβή στοιχεία. Συνεπώς, μια πλήρη εικόνα του προβλήματος δεν υπάρχει οπότε η ανεξέλεγκτη διάθεσή τους θα πρέπει να περιοριστεί για να ελαττωθούν και οι κίνδυνοί της.

8.3.6. Σχέδιο διαχείρισης των απορριμμάτων κατασκευής και κατεδάφισης στην Ελλάδα

Το 2001 εκδόθηκε ένα νέο Νομοσχέδιο (Νόμος 2939/2001) όσον αφορά στην εναλλακτική διαχείριση του packaging, δηλαδή του πακεταρίσματος των απορριμμάτων. Αυτός ο Νόμος μαζί με την Προεδρική Απόφαση 69728/824/94 για τα μέτρα και τις συνθήκες διαχείρισης στερεών αποβλήτων έθεσαν το νομοθετικό πλαίσιο στο οποίο το διαχειριστικό σχέδιο για τα κατασκευαστικά απόβλητα και αυτά της κατεδάφισης θα πρέπει να βασίζεται. Πιο συγκεκριμένα, η διαχείριση πρέπει να λαμβάνει υπόψη της τις ακόλουθες αρχές:

1. βιωσιμότητα,
2. μείωση των αποβλήτων,
3. αυτός που ρυπαίνει πρέπει να πληρώσει το ανάλογο αντίτιμο,
4. ευθύνη σε αυτόν που τα παράγει,
5. διατήρηση της ενέργειας και των φυσικών υλικών,
6. προστασία των φυσικών πόρων,
7. μείωση των επιζήμιων ιδιοτήτων των αποβλήτων,
8. μείωση των ποσοτήτων των αποβλήτων που αποθηκεύονται προσωρινά,
9. αύξηση της ποσότητας για επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και αποκατάσταση,
10. προώθηση των περιβαλλοντικών επενδύσεων,
11. ασφαλή τελική διάθεση,
12. καθιέρωση εκπαιδευτικών προγραμμάτων για την απόκτηση γνώσης.

Ιδιαίτερως στην Ελλάδα, το πρώτο σημαντικό βήμα που χρειάζεται να γίνει είναι η καταγραφή των παραγόμενων ποσοτήτων των συγκεκριμένων αποβλήτων. Αξιοσημείωτο είναι ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση δίνει έμφαση στη συλλογή ακριβών στατιστικών δεδομένων και στην εξέλιξη της συλλογής πληροφοριών. Αυτά τα αποτελέσματα θα αποτελέσουν τη βάση για τον καθορισμό των μεθόδων διαχείρισης αλλά και για την ικανότητα των μονάδων επεξεργασίας ανά περιφέρεια. Επιπλέον, όλες αυτές οι παράνομες περιοχές στις οποίες διατίθενται τα απορρίμματα των κατασκευών και των κατεδαφίσεων θα πρέπει να καταγραφούν και να συλλεχθούν ποσοτικά δεδομένα. Μια μεγάλη ποσότητα αποβλήτων παράγεται από παράνομες δραστηριότητες. Παρόλα αυτά η συνεργασία με μεγάλες οικοδομικές εταιρείες που ασχολούνται με την κατασκευή, είναι χρήσιμη για τη συλλογή ποσοτικών δεδομένων για την παραγωγή τους αλλά κι για τη μετέπειτα διάθεσή τους.

Το γεγονός ότι οι κύριες ποσότητες απορριμμάτων τέτοιου είδους παράγονται στην Αθήνα και στη Θεσσαλονίκη, δίνει προτεραιότητα στην εφαρμογή των σχεδίων διαχείρισης πρωτίστως σε αυτές τις περιοχές. Το κύριο στοιχείο των προτεινόμενων σχεδίων για τις πόλεις αυτές, όπου μεγάλες ποσότητες αποβλήτων της κατασκευής και της κατεδάφισης παράγονται, είναι η δημιουργία και η λειτουργία μιας μονάδας επεξεργασίας και ανακύκλωσης και η τελική τους διάθεση. Αυτές οι μονάδες θα πρέπει να διαθέτουν εξοπλισμό για το διαχωρισμό και τη θραύση των υλικών καθώς και τρόπους για τη διάθεση των υπολειμμάτων τους. Η μονάδα θα καταλήξει στο να παράγει οικοδομικά υλικά, μεταλλικό scrap, οικοδομική ξυλεία και αναμεμιγμένα άχρηστα υλικά.

Τα τελευταία θα πρέπει να διατεθούν σε ελεγχόμενες χωματερές ενώ τα υπόλοιπα χρήσιμα υλικά θα μπορούσαν να προωθηθούν προς πώληση. Προτείνεται και η εισαγωγή ενός προστίμου στην περίπτωση της διάθεσης χρήσιμων υλικών προς επανάχρηση όπως ξυλεία, μέταλλα κλπ. Αυτό το πρόστιμο θα αποτελέσει ένα ισχυρό κίνητρο για την ανάπτυξη διαφορετικών τεχνικών διαχωρισμού από την παραγωγή. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την επιβολή προστίμου και την εισαγωγή συγκεκριμένης τιμής για τη διάθεση, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά την καταγραφή των ποσοτήτων, τις νόμιμες περιοχές διάθεσης και τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, η ανεξέλεγκτη απόρριψη θα αποτελέσει φαινόμενο με μεγαλύτερες διαστάσεις.

Τα μπάζα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως επιχώματα μετά την εξαγωγή των επικίνδυνων ουσιών. Επιπρόσθετα, θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν και στην κατασκευή δρόμων, στην κατασκευή παρκινγκ κλπ (EC, 2000).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι σταθερές μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων έχουν υψηλότερο κόστος παροχής και εγκατάστασης απ' ό,τι η κινητή μονάδα. Ο εξοπλισμός τους είναι τελευταίας τεχνολογίας και παράγουν ανακυκλώσιμα υλικά υψηλής ποιότητας. Βεβαίως, μια σημαντική προϋπόθεση για τέτοιες εγκαταστάσεις είναι ότι πρέπει να εγκαθίστανται σε περιοχές όπου μεγάλες ποσότητες τέτοιων αποβλήτων παράγονται.

Λαμβάνοντας υπόψη τη διαχείριση στα περισσότερα ελληνικά νησιά, οι ακόλουθες ειδικές συνθήκες θα πρέπει να σημειωθούν:

1. υπάρχει περιορισμένος διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση των μονάδων επεξεργασίας, καθώς στα περισσότερα δεν υπάρχει ούτε χώρος για χωροθέτηση μονάδας επεξεργασίας λυμάτων,
2. υπάρχει ουσιώδη απόσταση από την ηπειρωτική Ελλάδα, καθώς η θαλάσσια μεταφορά συχνά παρεμποδίζεται από τις καιρικές συνθήκες,
3. οι δραστηριότητες συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένα τμήματα των νησιών,
4. η τοπική οικονομία εξαρτάται από τον τουρισμό,
5. τα νησιά χαρακτηρίζονται από μεγάλες περιόδους με υψηλές θερμοκρασίες και δυνατούς ανέμους.

Ως αποτέλεσμα, θα πρέπει να οριστούν κάποιες περιοχές έστω για προσωρινή διάθεση των προαναφερόμενων αποβλήτων. Κατόπιν, μια κινητή μονάδα επεξεργασίας που θα παρέχει τις υπηρεσίες της στην περιφέρεια των νήσων, θα επεξεργάζεται τα αναμειγμένα απόβλητα. Ακόμα, η μεταφορά των αδρανών αποβλήτων από το ένα νησί στο άλλο δεν είναι οικονομικά βιώσιμη λόγω του μεγάλου όγκου των απορριμμάτων ενώ ελλοχεύει και ο κίνδυνος κοινωνικών αντιδράσεων κατά την πραγματοποίηση της μεταφοράς. Οι ίδιες ειδικές συνθήκες υπάρχουν και στις ορεινές περιοχές και συνεπώς το πλαίσιο διαχείρισης των περιοχών αυτών θα πρέπει να σχετίζεται με το προηγούμενο.

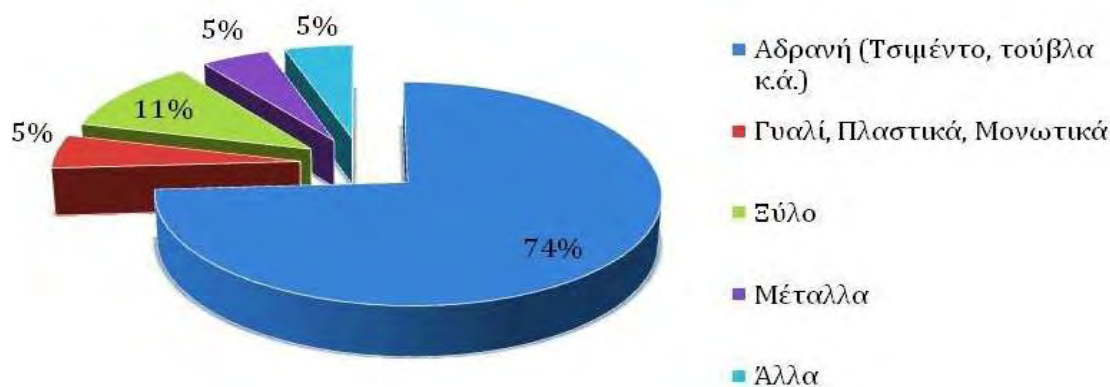
Η διαχείριση της ροής αυτής των αποβλήτων έχει τη μεγαλύτερη δυσκολία και η αντιμετώπισή της θα πρέπει να γίνει με μεθοδικότητα και άμεσες λύσεις εξυγίανσης του προβλήματος.

Τα απόβλητα κατεδαφίσεων μπορούν να μειωθούν μέσω των προσπαθειών ελεγχόμενης αποδόμησης (deconstruction). Ελεγχόμενη αποδόμηση, είναι η προσεκτική αποσυναρμολόγηση των δομών πριν (ή και αντί) της κατεδάφισης, προς μεγιστοποίηση της ανάκτησης υλικών. Συνήθως, ανακτώνται προς επαναχρησιμοποίηση τα ηλεκτρικά κυκλώματα και οι υδραυλικές εγκαταστάσεις, επαναχρησιμοποιούνται ή ανακυκλώνονται τα μέταλλα και η ξυλεία, επανατεμαχίζεται το ξύλινο δάπεδο, ενώ οι πόρτες και τα παράθυρα οδηγούνται προς επαναφινίρισμα για χρήση σε νέες κατασκευές (U.S. EPA, 1998). Οι εταιρίες ανάκτησης καταθέτουν τις προσφορές τους για κτίρια που προορίζονται για κατεδάφιση, ακολούθως και πριν την κατεδάφιση ανακτώνται υλικά, τα οποία αποθηκεύονται σε αποθήκες εμπορευμάτων για τελική μεταπώληση. Αυτή η «διάσωση» (salvage) υλικών τα εκτρέπει από την τελική διάθεση σε ΧΥΤΑ, αποτρέπει την πρόσθετη παραγωγή αποβλήτων και δημιουργεί εισόδημα μέσω της επαναχρησιμοποίησης και της μεταπώλησης των υλικών (BioCycle, 1999). Η Αμερικανική EPA ανέφερε ότι σε ένα έργο ελεγχόμενης κατεδάφισης κτιρίου διαμερισμάτων, το 76,00% κ.β. των υλικών εκτράπηκαν προς επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση. Άλλες σκέψεις σχετικά με την πρόληψη αποβλήτων στον τομέα κατασκευών και κατεδαφίσεων περιλαμβάνουν την ταυτόχρονη υλοποίηση έργων ελεγχόμενης αποδόμησης και νέων κατασκευών, προς αύξηση της επαναχρησιμοποίησης υλικών καθώς επίσης του σχεδιασμού και κατασκευής κτιρίων έχοντας ήδη υπόψη τη μελλοντική τους ελεγχόμενη αποδόμηση (Goldstein, 1999).

8.4 Διαχείριση απορριμμάτων κατεδάφισης.

Τα υλικά κατεδαφίσεων (μπάζα) είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν υλικά όπως χώμα, χαλίκι, κομμάτια ή στοιχεία από σκυρόδεμα, επιχρίσματα, πλίνθοι (τούβλα), πλάκες επιστρώσεων, γύψο, άμμο, λαξευμένες πέτρες, θρύμματα ειδών υγιεινής κ.α.. Τα υλικά κατεδαφίσεων χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανομοιογένεια και προκύπτουν από την εξ' ολοκλήρου ή επιμέρους κατεδάφιση των κατασκευών. Η σύσταση των υλικών αυτών ποικίλλει ανάλογα με το είδος, την ηλικία, τη μορφή, τη χρήση και το μέγεθος του κτιρίου / κατασκευής, ενώ για την κατεδάφιση σημαντικό ρόλο παίζει η ιστορική, πολιτιστική και οικονομική αξία της κατασκευής (www.eedsa.gr).

Η σύσταση των υλικών κατεδάφισης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι ο χρόνος κατασκευής και η μορφή της κατασκευής. Είναι φανερό ότι τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή παλαιότερων κτιρίων και τα οποία τώρα κατεδαφίζονται, καθορίζουν την τωρινή σύσταση των εν λόγω απορριμμάτων, ενώ στο μέλλον η διαφοροποίηση στην επιλογή των δομικών υλικών θα προκαλέσει και αλλαγή στη σύσταση των αποβλήτων που θα προκύπτουν. Τα υλικά κατεδαφίσεων στο μέλλον προβλέπεται να περιέχουν αυξημένες ποσότητες σκυροδέματος, το οποίο θα αντικαταστήσει τα τούβλα και το ασβεστοκονίαμα, προϊόντα από ατσάλι, περισσότερο μονωτικά υλικά και γενικότερα υλικά που θα απαιτούν εξειδικευμένη διαχείριση για τη σωστή επεξεργασία και πιθανόν ανακύκλωση αυτών. Όσον αφορά στα απορρίμματα που παράγονται στα εργοτάξια κατά την κατασκευή νέων κτιρίων, αυτά είναι κυρίως υλικά συσκευασίας, κατεστραμμένα υλικά καθώς και υλικά που δεν χρησιμοποιήθηκαν (www.eedsa.gr).



Σχήμα 8.2: Διάγραμμα μέσης ποσοστιαίας σύστασης των απορριμμάτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (Eco efficiency, 2009, ίδια επεξεργασία).

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζεται η συνηθέστερη ταξινόμηση των κατασκευαστικών αποβλήτων ανάλογα με την προέλευσή τους. Σύμφωνα με την Οδηγία 75/44/ΕΟΚ περί στερεών αποβλήτων, τα Απόβλητα από Κατασκευές και Κατεδαφίσεις ταξινομούνται ως ακολούθως:

- Σκυρόδεμα, τούβλα, πλακάκια, κεραμικά και υλικά με βάση το γύψο,
- Ξύλο, γυαλί και πλαστικό,
- Άσφαλτος, πίσσα και προϊόντα πίσσας,
- Μέταλλα (και τα κράματά τους),
- Χώματα και μπάζα εκσκαφών,

- Μονωτικά υλικά (εκτός από αυτά που περιέχουν αμιάντο)
- Απόβλητα μικτών κατασκευών και κατεδαφίσεων.
-

Πίνακα 8.2: Ταξινόμηση των κατασκευαστικών αποβλήτων ανάλογα με την προέλευσή τους (ιδία επεξεργασία).

Υλικά Εκσκαφών	Μητρικά χώματα εκσκαφών, άμμος, πετρώματα, άργιλος, ιλύς, και οποιαδήποτε άλλα υλικά παράγονται από εκσκαφές. Υλικά που προέρχονται από φυσικά φαινόμενα – υπερχειλίσεις χειμάρρων, κατολισθήσεις κλπ.
Υλικά Οδοποιίας	Άσφαλτος και οποιαδήποτε άλλα υλικά οδοστρωμάτων, βάσεων, υποβάσεων δηλ. χαλίκια, άμμος, σκύρα και τα υλικά που προκύπτουν από την ανακατασκευή και την ανακαίνιση οδών, καθώς και από έργα υπόγειων υδραυλικών και ηλεκτρικών εγκαταστάσεων στις πόλεις.
Υλικά Κατεδαφίσεων	Χώματα, χαλίκι, υλικά στραγγιστηρίων και εξυγιαντικές στρώσεις, θραύσματα, κομμάτια ή στοιχεία από σκυρόδεμα, επιχρίσματα, τούβλα, πλάκες, πλακάκια, πουρί, γύψος, άμμος, λαξευμένες πέτρες, είδη υγιεινής και θραύσματά τους.
Εργοταξιακά Απόβλητα	Ξύλο, πλαστικό, χαρτί και χαρτόνι, γυαλί, μέταλλα, καλώδια, χρώματα, βερνίκια, κόλλες, στοιχεία επικαλύψεων προσόψεων και γενικά όλα τα απορρίμματα που προέρχονται από τη λειτουργία εγκαταστάσεων κατασκευής, κατεδάφισης, επισκευής, ενίσχυσης, προσθήκης, επέκτασης και ανακαίνισης.

Τα τελευταία 10 χρόνια έχει γίνει αλματώδεις πρόοδος σχετικά με την ανακύκλωση των ΑΚΚ. Προβλέπεται ότι μεγαλύτερες ποσότητες τους θα ανακυκλωθούν στο μέλλον λόγω του υψηλού τέλους, της νομοθετικής απαγόρευσης διάθεσής τους σε ΧΥΤΑ και των δυνατοτήτων επεξεργασίας τους. Σε πολλούς χώρους διάθεσης, τα ΑΚΚ ήδη χρησιμοποιούνται, τόσο για την κατασκευή δρόμων όσο και ως υλικό χωματοκάλυψης. Τα προγράμματα ανακύκλωσης ΑΚΚ (όπως και όλων των άλλων συστατικών των στερεών Αποβλήτων) δίνουν τη δυνατότητα αύξησης της διάρκειας ζωής των ΧΥΤΑ και της επίτευξης των στόχων ανάκτησης υλικών. Θέματα άμεσου ενδιαφέροντος είναι: (1) οι πηγές, τα χαρακτηριστικά και οι ποσότητες, (2) η σχετική νομοθεσία και διατάξεις, (3) οι εναλλακτικές δυνατότητες διαχείρισης, (4) οι προδιαγραφές για τα ανακτημένα ΑΚΚ και (5) η διαχείριση των ΑΚΚ από φυσικές και ανθρωπογενείς καταστροφές.

Τα κατασκευαστικά απόβλητα είναι ογκώδη, βαριά και αδρανή. Δεν είναι κατάλληλα για καύση ούτε για επεξεργασία σε συνήθεις εγκαταστάσεις μηχανικής διαλογής και ανακύκλωσης υλικών. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος για την διάθεσή τους

είναι η υγειονομική ταφή και η απόθεση σε εγκεκριμένους και μη χώρους. Στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ), τα κατασκευαστικά απόβλητα θεωρούνται συχνά χρήσιμα υλικά, καθώς χρησιμοποιούνται για την διαμόρφωση των πρανών, την κατασκευή εσωτερικών δρόμων και την ημερήσια κάλυψη των απορριμμάτων. Οι ΧΥΤΑ χρειάζονται για την λειτουργία τους ορισμένες ποσότητες αδρανών υλικών και αν δεν δεχτούν κατασκευαστικά απόβλητα θα αγοράσουν πρωτογενή αδρανή υλικά (χώμα, άμμο, χαλίκι), αυξάνοντας τόσο το λειτουργικό τους κόστος όσο και την κατανάλωση φυσικών πόρων. Ωστόσο, οι ποσότητες των κατασκευαστικών αποβλήτων που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες από αυτές που είναι απαραίτητες για την κάλυψη των λειτουργικών αναγκών τους. Συχνά τα κατασκευαστικά απόβλητα καταλαμβάνουν ένα σημαντικό μέρος του ωφέλιμου – και ακριβού – χώρου ενός ΧΥΤΑ. Η Ευρωπαϊκή και η Ελληνική νομοθεσία προβλέπουν την δυνατότητα δημιουργίας ΧΥΤΑ αποκλειστικά για κατασκευαστικά απόβλητα (ΧΥΤΑ αδρανών), οι οποίοι οφείλουν να πληρούν ελαστικότερες προδιαγραφές από τους ΧΥΤΑ αστικών αποβλήτων (ΚΥΑ 114218/97, ΦΕΚ 1016(Β) 17/11/97), καθώς τα κατασκευαστικά απόβλητα επιβαρύνουν λιγότερο το περιβάλλον.

Η απόσταση των χώρων ταφής αποβλήτων από τις πόλεις αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στην η αυξανόμενη έλλειψη κατάλληλων χώρων και η αντίθεση του κοινού. Αποτέλεσμα είναι η αύξηση του οικονομικού και του περιβαλλοντικού κόστους για την μεταφορά και την διάθεση των αποβλήτων.

Ήδη, το κόστος αυτό αποτελεί υπολογίσιμο μέρος του συνολικού κόστους ενός οικοδομικού έργου, ιδιαίτερα αν πρόκειται για κατεδάφιση. Το κόστος που απαιτεί η μεταφορά και η διάθεση των κατασκευαστικών αποβλήτων αναμένεται να αυξηθεί καθώς, σε όλες τις βιομηχανικές χώρες, αυξάνεται το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος των ΧΥΤΑ. Σε πολλές χώρες, όπως η Γερμανία, η Δανία, η Βρετανία, επιβάλλονται ήδη φόροι υγειονομικής ταφής.

Η παραγωγή αδρανών υλικών (άμμος, χαλίκι, αργιλικά) που απαιτούνται σε όλα τα κατασκευαστικά έργα από πρωτογενείς πηγές έχει το δικό της οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση οικοδομικών αποβλήτων για την παραγωγή δευτερογενών αδρανών υλικών μπορεί να μειώσει την πίεση και στα δύο αυτά συστήματα. Ήδη, σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες και στις ΗΠΑ εφαρμόζονται εκτεταμένα προγράμματα για την ανακύκλωση των κατασκευαστικών αποβλήτων σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Το υψηλό κόστος της ταφής και οι περιβαλλοντικοί φόροι στην ταφή και τα πρωτογενή αδρανή συμβάλλουν στην ανάπτυξη της ανακύκλωσης.

Το 1996 τα απόβλητα που σχετίζονται με την κατασκευή, ανακαίνιση και κατεδάφιση κτιρίων στις ΗΠΑ ανήλθαν σε 123,00 εκατομμύρια τόνους. Η μισή περίπου από αυτήν την ποσότητα προέρχεται από κατεδαφίσεις, 8,00 % από την κατασκευή νέων κτιρίων και το υπόλοιπο από ανακαινίσεις. Στη Δανία, ο υψηλός φόρος ταφής (16.500 δρχ/ton) σε συνδυασμό με μια ήπια φορολόγηση των πρωτογενών αδρανών υλικών (220,00 δρχ/m³) έχει δημιουργήσει τα απαραίτητα κίνητρα για τους κατασκευαστές για την χρήση ανακυκλωμένων υλικών. Σήμερα στη Δανία ανακυκλώνεται το 90,00 % των κατασκευαστικών αποβλήτων. Μέσα σε

λιγότερο από μία δεκαετία το ποσοστό που καταλήγει σε ΧΥΤΑ μειώθηκε από 84,00 % σε 1,00 %. Στο ίδιο διάστημα, το ποσοστό των ανακυκλωμένων υλικών που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές αυξήθηκε από 1,00 % σε 25,00 %.

Ωστόσο δεν αρκεί η εισαγωγή περιβαλλοντικών φόρων για την εκτροπή των αποβλήτων από την ταφή. Τα οικονομικά μέτρα πρέπει να συνοδεύονται από τη ύπαρξη επαρκούς υποδομής επεξεργασίας των αποβλήτων, αλλιώς θα θεωρηθούν ως ένα ακόμη μέσο για την αύξηση των εσόδων του κρατικού προϋπολογισμού και μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση των παράνομων χωματερών. Στην Κοπεγχάγη, για παράδειγμα, λειτουργεί από το 1996 στο χώρο του νέου ΧΥΤΑ ένα κέντρο επεξεργασίας και ανακύκλωσης κατασκευαστικών αποβλήτων ετήσιας δυναμικότητας 700.000 τόνων. Τα τέλη εισόδου αντανακλούν την δυσκολία και το κόστος της επεξεργασίας και κυμαίνονται από 85,00 €/ton για καθαρό σκυρόδεμα και 117,00 €/ton για ενισχυμένο σκυρόδεμα, έως 500,00 €/ton για γυψοσανίδες και 920,00 €/ton για ανάμεικτα υλικά.

Στην Ελλάδα η έλλειψη στατιστικών στοιχείων και μετρήσεων για τα κατασκευαστικά απόβλητα δυσχεραίνει τον προσδιορισμό της ποσότητάς τους. Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία η ποσότητα των κατασκευαστικών αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους ελεγχόμενης ταφής αποτελεί το 3,00 % των συνολικών αποβλήτων που δέχονται οι χώροι αυτοί, δηλαδή 180.000-200.000 τόνοι ανά έτος ή 18,00-20,00 kg/κάτοικο ανά έτος. Η ποσότητα αυτή βρίσκεται σε πλήρη ασυμφωνία με τα δεδομένα για άλλες χώρες, όπου υπάρχουν καλύτερα οργανωμένα συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής. Στην Αγγλία αντιστοιχούν 1.194 χιλιόγραμμα κατασκευαστικών αποβλήτων ανά κάτοικο και ανά έτος, ενώ στις ΗΠΑ μόνο από την οικοδομική δραστηριότητα αντιστοιχούν 465,00 kg ανά κάτοικο και ανά έτος. Η ασυμφωνία οφείλεται στην παράνομη απόθεση των κατασκευαστικών αποβλήτων σε κοίτες χειμάρρων, σε ρέματα, σε άκτιστα οικόπεδα, παραπλεύρως των εθνικών και επαρχιακών δρόμων και οπουδήποτε αλλού διευκολύνεται ο οδηγός του οχήματος μεταφοράς.

Σε μια σχετικά πρόσφατη μελέτη (Αλαβέρας και Παπαχρήστου, 1999) εκτιμάται ότι η ποσότητα των κατασκευαστικών αποβλήτων από οικοδομικές δραστηριότητες στην Ελλάδα θα πρέπει να είναι περίπου 1.100.000 τόνοι ανά έτος. Το σύνολο των κατασκευαστικών αποβλήτων (συμπεριλαμβανομένων και των υλικών εκσκαφής) είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί, καθώς δεν υπάρχουν στοιχεία και μετρήσεις. Σύμφωνα με διαφορετικές εκτιμήσεις, η συνολική ποσότητα κυμαίνεται από 1.500.000 τόνοι ανά έτος έως 8.500.000 τόνοι ανά έτος, δηλαδή από 7,50 % έως 30,80 % του συνόλου των στερεών αποβλήτων που παράγονται στην Ελλάδα.

Μια βασική προϋπόθεση για τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στην Ελλάδα είναι, επίσης, η ύπαρξη εθνικής και τοπικής πολιτικής για τη διαχείριση των απορριμμάτων της κατασκευής και της κατεδάφισης, που θα πρέπει να περιέχει βασικές οδηγίες, όπως: το σύστημα ελέγχου απόθεσης των ανωτέρω απορριμμάτων, ο καθορισμός των περιοχών αυτών, η δημιουργία οργανισμών για την υποστήριξη αυτής της τάσης, τα πρόστιμα σε περίπτωση μη συμμόρφωσης κ.α..

Συνεπώς, κατά τον σχεδιασμό ενός νέου κτιρίου θα πρέπει οι παραγγελίες των υλικών να υπολογίζονται με ακρίβεια και να χρησιμοποιούνται τυποποιημένα μεγέθη και προκατασκευασμένα στοιχεία. Έτσι αποφεύγονται τα επί τόπου κοψίματα και η δημιουργία αποβλήτων, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι κατά την κατασκευή αυτών των προϊόντων λαμβάνεται υπόψη η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών και υλικών εισροών. Η χρήση υψηλής ποιότητας υλικών μειώνει τις απώλειες και την δημιουργία αποβλήτων, εξοικονομώντας πόρους και χρήματα για τον κατασκευαστή και τον ιδιοκτήτη. Η ανάπτυξη οικοδομικών προϊόντων, δομικών στοιχείων και κτιρίων με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και με χρήση λιγότερων υλικών, είναι νέοι τομείς έρευνας που εξετάζονται σήμερα εντατικά σε ερευνητικά ινστιτούτα και στη βιομηχανία.

Για την αποτελεσματική μείωση και ανακύκλωση των οικοδομικών αποβλήτων απαιτείται καλός σχεδιασμός και μια στρατηγική για την διαχείριση της ροής των υλικών πριν από την έναρξη των εργασιών. Βέβαια, ο καλύτερος τρόπος για την μείωση των αποβλήτων από κατεδαφίσεις είναι να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής των κτιρίων. Αυτό απαιτεί καλή κατασκευή, σεβασμό των διαχρονικών αισθητικών αξιών, και καλό σχεδιασμό του κτιρίου ώστε να είναι ευέλικτο και να μπορεί εύκολα να αλλάξει χρήση (π.χ. από γραφείο σε κατοικία).

Υπάρχουν τέσσερις επιλογές για τη διαχείριση των ΑΚΚ: (1) μείωση στην πηγή, (2) επαναχρησιμοποίηση, (3) ανακύκλωση και (4) τελική διάθεση. Τα τελευταία χρόνια, τα προγράμματα διαχείρισης ΑΚΚ σε όλη τη χώρα επικεντρώνονται στις πρώτες τρεις, δηλ. μείωση στην πηγή, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση. Υπολογίζεται ότι επί του παρόντος στις ΗΠΑ λειτουργούν τουλάχιστον 3-500 εγκαταστάσεις για την ανάκτηση και ανακύκλωση ΑΚΚ (Brichner, 1997).

- Μείωση στην πηγή.

Η μείωση στην πηγή αφορά στη μείωση της ποσότητας των υλικών που καταναλώνονται μέσω προσεκτικότερης πρόβλεψης για αποφυγή της παραγωγής ΑΚΚ. Η αύξηση (σύμφωνα με τους κανονισμούς) του κόστους διάθεσης των ΑΚΚ εξακολουθεί να παρέχει ένα ερέθισμα για τη μείωση της ποσότητας των αποβλήτων.

- Επαναχρησιμοποίηση.

Με κατάλληλο διαχωρισμό ένα μεγάλο μέρος των αποβλήτων από τις κατεδαφίσεις και τις ανακαινίσεις είναι δυνατόν να ανακτηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Στην Ελλάδα αυτό γίνεται άτυπα από μαστόρους και πλανόδιους εμπόρους που μαζεύουν υλικά υψηλής σχετικά αξίας, όπως δομικά στοιχεία αρχιτεκτονικού ενδιαφέροντος, πόρτες, παράθυρα, περισσέυματα υλικών, συσκευές και συσκευασίες, και τα πωλούν σε μάντρες ή σε επιχειρήσεις ανακύκλωσης. Είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια η ποσότητα των κατασκευαστικών αποβλήτων που ανακτώνται με αυτόν τον τρόπο, αλλά γενικά πρόκειται για μικρό ποσοστό του συνόλου των παραγομένων αποβλήτων. Σε άλλες χώρες έχουν αναπτυχθεί κατάλογοι και δίκτυα ανταλλαγής πληροφοριών στο διαδίκτυο, για την προσφορά και ζήτηση υλικών από κατεδαφίσεις για ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση.

Στις κατασκευές και τις κατεδαφίσεις υπάρχει μεγάλη ποικιλία επαναχρησιμοποιήσιμων και αχρησιμοποίητων τεμαχίων από διάφορα υλικά. Ως

παραδείγματα αναφέρονται τεμάχια ξύλου διαφόρων διαστάσεων, κοντραπλακέ, ασφαλικά υλικά, μονωτικά, χρώματα, σωλήνες θέρμανσης και σωληνώσεις.

Επιπρόσθετα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα απόβλητα (π.χ. σπασμένα τμήματα σκυροδέματος και τούβλα) σε μια πλειάδα εφαρμογών (π.χ. ως υλικό πλήρωσης). Μικρά τεμάχια από συστήματα ξηρής δόμησης (π.χ. γυψοσανίδες) μπορούν να κρατηθούν και να χρησιμοποιηθούν, π.χ. όταν θα χρειασθεί ένα μικρότερο τεμάχιο. Σκοπός εδώ δεν είναι να παρατεθούν οι πολλοί τρόποι με τους οποίους τα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, αλλά περισσότερο να υπογραμμισθεί ότι χρειάζεται μια αλλαγή προτύπων για να επιφέρει την επαναχρησιμοποίηση υλικών.

Η επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση υλικών και αντικειμένων είναι δυνατόν να διευκολυνθούν με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός κτιρίου. Στο πλαίσιο αυτό, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση σύνθετων υλικών που δεν μπορούν να διαχωριστούν στο τέλος του κύκλου ζωής τους, καθώς και η τοποθέτηση και συγκόλληση στοιχείων έτσι ώστε να μην μπορούν να αποσυναρμολογηθούν χωρίς να καταστραφούν. Ολόκληρο το κτίριο πρέπει να σχεδιάζεται με την λογική της αποσυναρμολόγησης και όχι της κατεδάφισης στο τέλος της ζωής του.

- Ανακύκλωση.

Η τελευταία φάση στον κύκλο ζωής ενός προϊόντος μπορεί να γίνει η πρώτη, εάν η κατεδάφιση ακολουθείται από ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση. Όταν η αειφορία αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα, η κατεδάφιση θα πρέπει να είναι το τελευταίο καταφύγιο, αλλά αν είναι αναπόφευκτη, μπορούν να μελετηθούν διάφορες επιλογές. Τα κτίρια πρέπει να σχεδιάζονται με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ζωή. Αυτό συνιστά μια αποτελεσματικότερη χρήση των κτιρίων και των υλικών και μειώνει την ποσότητα των απορριμμάτων κατεδάφισης.

Η ανακύκλωση του σκυροδέματος είναι μια εξελισσόμενη μέθοδος, η οποία αξιοποιεί τα παλαιά σκυροδέματα, που προέρχονται από κατεδαφίσεις, σεισμούς ή άλλες καταστρεπτικές ενέργειες (καταρρεύσεις). Είναι απαραίτητα από οικονομική αλλά και περιβαλλοντική άποψη. Συνήθως στο παρελθόν τα μάζα των οικοδομών μεταφερόντουσαν σε χωματερές ως υλικό πλήρωσης, με τα γνωστά προβλήματα λόγω έλλειψης χώρου αποθήκευσης. Η ανακύκλωση έχει πολλά πλεονεκτήματα, έτσι ώστε με την αυξημένη ευαισθησία για την προστασία του περιβάλλοντος, τους αυστηρότερους περιβαλλοντολογικούς νόμους και την προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί το κόστος των κατασκευών, να αποτελεί αναγκαιότητα και καθήκον.

Ένα μεγάλο ποσοστό των κατασκευαστικών αποβλήτων μπορεί να ανακυκλωθεί και ήδη ανακυκλώνεται σε πολλές βιομηχανικές χώρες. Από τις διάφορες κατηγορίες των κατασκευαστικών αποβλήτων, τα υλικά οδοποιίας είναι τα ευκολότερα να ανακυκλωθούν και μάλιστα με οικονομικό όφελος. Στη Γερμανία ανακυκλώνεται ήδη το 90,00 % των υλικών οδοποιίας. Στην Αγγλία ανακυκλώνεται περίπου το 30,00 % από την συνολική ποσότητα των 70,00 εκατομμυρίων τόνων κατασκευαστικών αποβλήτων τον χρόνο, ενώ ο στόχος της Εθνικής Στρατηγικής για την Διαχείριση των Στερεών Αποβλήτων είναι το ποσοστό ανακύκλωσης να φτάσει

το 75,00 % μέχρι το έτος 2006. Στην Ολλανδία και το Βέλγιο το 25,00 % περίπου των αδρανών στο προκατασκευασμένα μετόν προέρχονται από ανακυκλωμένα αδρανή.

Οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης ΑΚΚ εξαρτώνται τόσο από την ύπαρξη αγοράς για τα επιμέρους συστατικά που θα ανακτηθούν, όσο και από τη δυνατότητα επεξεργασίας των ανάμεικτων ΑΚΚ προς διαχωρισμό των επιμέρους υλικών – συστατικών τους. Τα σπουδαιότερα συστατικά που ανακτώνται προς ανακύκλωση από τα ΑΚΚ είναι: σκυρόδεμα, ξύλο, ασφαλτικά, υλικά οροφής, τμήματα ξηρής δόμησης (γυψοσανίδες), μέταλλα και χώμα.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η παραγωγή άμμου ελεγχόμενης κοκκομετρικής διαβάθμισης και ποσοστού παιπάλης, το οποίο οφείλεται στις σύγχρονες μεθόδους πλύσεως του λεπτόκοκκου υλικού. Οι περιοριστικές διατάξεις προστασίας του περιβάλλοντος για την εγκατάσταση νέων λατομείων δυσχεραίνουν το πρόβλημα της παραγωγής αδρανών υλικών για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών. Το αποτέλεσμα είναι η παραβίαση των νομοθετημένων διατάξεων και η ανεπανόρθωτη καταστροφή του περιβάλλοντος ακόμη και σε «προστατευόμενες» περιοχές.

Σήμερα το μεγαλύτερο μέρος των ανακυκλωμένων κατασκευαστικών αποβλήτων θρυμματίζεται και χρησιμοποιείται σε χαμηλής αξίας χρήσεις, όπως επιχωματώσεις και διαμόρφωση χώρων. Ένας σημαντικός τομέας έρευνας είναι η ανάπτυξη μεθόδων και τεχνολογιών για την ανακύκλωση οικοδομικών αποβλήτων σε νέα, οικοδομικά κυρίως, υλικά υψηλής αξίας, όπως επίσης και η ανάπτυξη προτύπων και κανονισμών σχετικά με τις δυνατές χρήσεις για κάθε κατηγορία κατασκευαστικών αποβλήτων. Ήδη υπάρχουν αρκετά παραδείγματα κατασκευής δομικών στοιχείων από ανακυκλωμένα υλικά.

Ενδεικτικές μέθοδοι επεξεργασίας και οι δυνατότητες της επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 8.3. Οι μέθοδοι επεξεργασίας ΑΚΚ είναι σχετικά απλές και περιλαμβάνουν: (1) χειροδιαλογή για μια ποικιλία συστατικών όπως ξύλο, κομμάτια σκυροδέματος, τούβλα, μέταλλα κ.λπ., (2) υποβίβαση μεγέθους, άλεση, κοκκοποίηση και κοσκίνισμα για το σκυρόδεμα, (3) άλεση ή/και κονιοποίηση για την άσφαλτο, (4) άλεση ή/και κονιοποίηση και κοσκίνισμα για το ξύλο, (5) μαγνητικό διαχωρισμό και (6) διαχωρισμό του χώματος με πολυβάθμιο κοσκίνισμα.

Πίνακας 8.3: Τυπικές δυνατότητες επεξεργασίας και ανακύκλωσης ΑΚΚ. (Tchobanoglous et al., 1993, ίδια επεξεργασία).

Υλικό	Επεξεργασία	Δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης / ανακύκλωσης
Ξύλο	Χειρονακτική διαλογή, τεμαχισμός σε κάδο ή κάποιο άλλο εμπορικό τεμαχιστή ξύλου, διέλευση από διαχωριστή ή τύμπανο όπου διαχωρίζονται τα υπερμεγέθη τεμάχια. Τα σιδηρούχα μέταλλα ανακτώνται μαγνητικά και το λεπτό κλάσμα (υλικά μικρού μεγέθους που	Το τεμαχισμένο ή/και τριμμένο ξύλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη ριζών σε αναπλάσεις τοπίου, στο κομποστ, ως καύσιμο σε λέβητες, σε επεξεργασμένα προϊόντα για κτίρια ή ως υλικό ενδιάμεσης επικάλυψης σε ΧΥΤΑ.

	πωλούνται συχνά για κάλυψη ριζών ή ως βελτιωτικό εδάφους) διαχωρίζονται με κοσκίνισμα.	
Σκυρόδεμα	Τα κομμάτια σκυροδέματος συνθλίβονται και αφαιρούνται τα σιδηρούχα υλικά όπως βίδες ή οπλισμός σκυροδέματος. Το προκύπτουν μίγμα κοσκινίζεται σε μεγέθη που είναι κατάλληλα για διάφορες εφαρμογές.	Το σπασμένο και διαβαθμισμένο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό για νέες κατασκευαστικές εφαρμογές. Το υλικό αυτό θα πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές όπως αυτές της ASTM ή EN. Το σπασμένο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό βάσης στην οδοποιία. Περισσότερο χονδρόκοκκο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κρηπίδωμα σε δρόμους και λιμνούλες.
Ξηρολιθοδομ ή (γύψος)	Ο εσωτερικός γύψος κοκκοποιείται. Το χάρτινο υπόστρωμα επανα-πολτοποιείται και ανακυκλώνεται.	Ο κοκκοποιημένος γύψος μπορεί: 1.) να αναμιχθεί με πρωτογενή γύψο και να επαναχρησιμοποιηθεί, όπως επίσης 2.) να χρησιμοποιηθεί ως στρώμη ζώων, ως βελτιωτικό εδάφους (υποκατάστατο του ασβέστη στις πρασιές). Το επανα-πολτοποιημένο χαρτί μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή νέου υποστρώματος για ταπετσαρίες και σοβατέπι.
Μέταλλα	Διαχωρισμός ανά κατηγορία (δηλ. σιδηρούχα, αλουμίνιο, χαλκός, ορείχαλκος)	Ανακυκλώνονται από τους κατεργαστές μετάλλων.
Χώμα	Κοσκίνισμα για αφαίρεση ξύλου, μετάλλων, βράχων και άλλων διαφόρων υλικών.	Το κοσκινισμένο χώμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάπλαση τοπίου, ως υλικό πλήρωσης σε αγροτικές και οικιακές εφαρμογές, όπως επίσης και ως κάλυμμα ΧΥΤΑ.

Οι εταιρίες ανακύκλωσης, οι οποίες αναλαμβάνουν την επεξεργασία απορριμμάτων κατεδάφισης από διάφορες άλλες κατασκευαστικές εταιρίες, πρέπει να διαθέτουν κατάλληλο εξοπλισμό για τον διαχωρισμό και την θραύση των αδρανών, καθώς και ειδικό χώρο για την προσωρινή αποθήκευση των υπολειμμάτων. Παραγόμενα προϊόντα πρόκειται να είναι τα υλικά οικοδομών, μεταλλικά

υπολείμματα, οικοδομική ξυλεία, ανάμικτα μη χρήσιμα υλικά και υπολείμματα αδρανών.

Ο διαχωρισμός των υλικών κατά κατηγορία και μέγεθος μέσα στο ίδιο το εργοτάξιο είναι η σημαντικότερη παράμετρος για την αποτελεσματική ανακύκλωση οικοδομικών αποβλήτων, καθώς η εκ των υστέρων επεξεργασία ανάμεικτων υλικών είναι συνήθως οικονομικά ασύμφορη. Ο επί τόπου διαχωρισμός απαιτεί καταρχήν κατάρτιση του προσωπικού και οπωσδήποτε μια επιπλέον προσπάθεια. Όταν όμως ενσωματωθεί στις εργασιακές συνήθειες έχει ελάχιστο ή και μηδενικό πρόσθετο κόστος. Η βελτιωμένη διαχείριση και ο σχεδιασμός για την ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων μπορούν να εξοικονομήσουν χρήματα, καθώς αποφεύγεται η παραγγελία περιττών υλικών. Τέλος, καθώς οι πολίτες ευαισθητοποιούνται όλο και περισσότερο σε θέματα περιβάλλοντος, ο κατασκευαστής που θα εφαρμόσει ένα πρόγραμμα ανακύκλωσης βελτιώνει την εικόνα του απέναντι στον πελάτη.



Σχήμα 8.3: Διάγραμμα ροής διαχείρισης απορριμμάτων κατεδάφισης τεχνικών έργων. (<http://www.diaamath.gr/?p=72>, επεξεργασία ίδια).

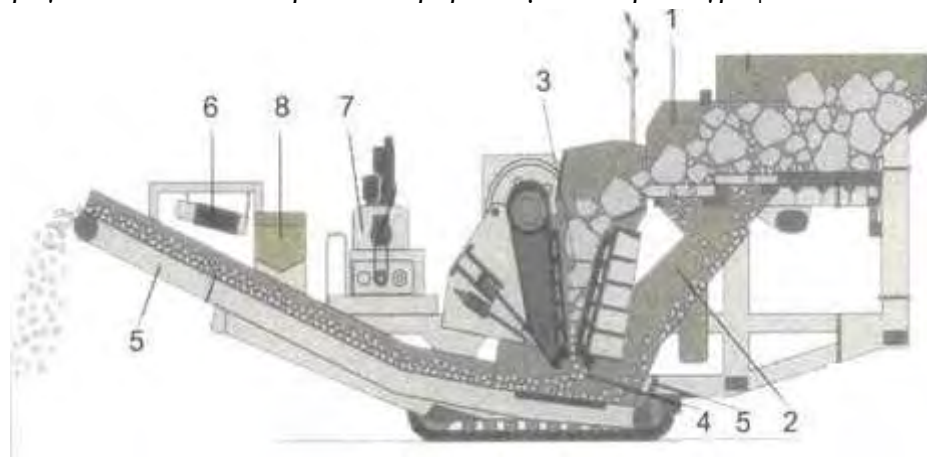
Οι εισερχόμενες ποσότητες αδρανών υλικών που μεταφέρονται στα κέντρα ανακύκλωσης ζυγίζονται, επιθεωρούνται και τοποθετούνται σε μια σειρά ξεχωριστών κατηγοριών που είναι για παράδειγμα:

- Σπασμένα τούβλα και κεραμίδια.
- Ενισχυμένο σκυρόδεμα.
- Μη – ενισχυμένο σκυρόδεμα.
- Ανάμικτα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων.
- Μικτά ή «καθαρά» υλικά εκσκαφών.

Τα σπασμένα τούβλα, πλακάκια, ενισχυμένο σκυρόδεμα και μη – ενισχυμένο σκυρόδεμα εξετάζονται μέσω μηχανικής διαδικασίας, έτσι ώστε να αφαιρεθεί το κλάσμα υλικών που έχει μέγεθος 0-45,00 mm. Το κλάσμα αυτό χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, σε υλικά διαστάσεων 0-4,00 mm και σε υλικά διαστάσεων 4,00-45,00 mm. Το υπόλοιπο υλικό πάει σε μηχανήματα κρούσης και συντριβής. Το κλάσμα με διαστάσεις μεγαλύτερες των 45,00 mm τοποθετείται σε μια προσωρινή στοίβα αποθεμάτων για επανατριβή, ενώ το κλάσμα των 4,00-45,00 mm μειώνεται σε υπο-

κλάσματα των 0-4,00 mm, 4,00-8,00 mm, 8,00-16,00 mm, 16,00-32,00 mm και 32,00-45,00 mm.

Το υλικό περνάει μέσα από ένα μαγνητικό διαχωριστή για να αφαιρεθούν τα ιδηρούχα μέταλλα πριν διαιρεθούν σε κατηγορίες των 0-45,00 mm και μεγαλύτερων των 45,00 mm. Σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχει και χειρονακτική διαλογή υλικών, πριν τον μαγνητικό διαχωρισμό τους. Υπάρχει, επίσης, αυτοματοποιημένη ή ημι-αυτοματοποιημένη ή χειρονακτική διαλογή και άλλων υλικών, όπως είναι τα πλαστικά, το χαρτί, το ξύλο και άλλα μη-σιδηρούχα υλικά. Σε ορισμένες μονάδες υπάρχει διαχωρισμός ελαφριών υλικών (χαρτί, πλαστικά) με την χρήση αεροδιαχωριστών. Η επιλογή ενός μηχανήματος συντριβής και κρούσης οφείλεται στο ότι έτσι παράγονται υλικά σταθερών και προβλεπόμενων προδιαγραφών.



Εικόνα 8.1: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας επεξεργασίας απορριμμάτων κατεδαφίσεων. Όπου, 1: τμήμα τροφοδοσίας, 2: παράκαμψη λεπτόκοκκων υλικών, 3: θραυστήρες, 4: προστατευτικό χώρισμα, 5: μεταφορική ταινία, 6: μαγνητικός διαχωριστής, 7: κινητήρας, 8: δεξαμενή καυσίμων (www.eedsa.gr).

Η υλοποίηση των διαδικασιών κατεδάφισης κτιρίων και ανακύκλωσης των παραγόμενων απορριμμάτων απαιτούν και τον αντίστοιχο εξοπλισμό. Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει οχήματα όπως, οι εκσκαφείς κατεδαφίσεων ισχύος 316,00 kWatt (424,00 HP), οι φορτωτές ισχύος 239,00 kWatt (320,00 HP) και τα φορτηγά αυτοκίνητα ισχύος 397,00 kWatt (540,00 HP).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, από τη συνολική ποσότητα των απορριμμάτων ενός τεχνικού έργου, το σημαντικότερο ποσοστό αποτελούν τα απορρίμματα σκυροδέματος.

Η αξιοποίηση του σκυροδέματος στο τέλος της ωφέλιμης ζωής του είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος αφορά στη θραύση και επαναχρησιμοποίησή του σε κατασκευές ως έχει, ενώ ο δεύτερος αφορά στην ανακύκλωση του σκυροδέματος για την παραγωγή άλλων υλικών, είτε ως πρόσθετο, είτε ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου. Η ανάκτηση όμως του υλικού αυτού, δεν θεωρείται εύκολη στην πράξη, καθώς ο διαχωρισμός των επιμέρους υλικών που περιέχονται στο σκυρόδεμα είναι πολύ δύσκολος. Με βάση την διεθνή πρακτική, οι συνηθέστερες πρακτικές αξιοποίησης του σκυροδέματος στο τέλος της ωφέλιμης ζωής του (συνήθως έχει προηγουμένως υποστεί κάποια επεξεργασία, όπως η θραύση) αποτελούν:

- Η τοποθέτησή του γύρω από τσιμεντοσωλήνες για όμβρια ύδατα.
- Η χρήση του σαν αδρανή υλικά, σε αντικατάσταση των χαλικιών και της άμμου.
- Η χρήση του σαν υλικό για βάσεις και υποβάσεις κάτω από τον ασφαλτικό τάπητα σε έργα οδοποιίας, εφόσον όμως εξεταστούν τα βασικά χαρακτηριστικά και τα όρια αντοχής του.
- Η χρήση του σε προσωρινή οδοποιία και χωματόδρομους ή και δασικούς δρόμους.
- Η χρήση του σαν αδρανή υλικά για την παραγωγή σκυροδέματος και ασφάλτου.
- Η χρήση του στην κατασκευή υλικών για πεζοδρόμια.
- Η χρήση του σαν υλικό ημερησίας κάλυψης των απορριμμάτων των Χ.Υ.Τ.Α..
- Η χρήση του σαν υλικό επιχώσεων σε οικοδομικά έργα.
- Σε έργα επεξεργασίας και βιολογικού καθαρισμού λυμάτων. Το σκυρόδεμα είναι δυνατό να αντικαταστήσει φυσικά υλικά, όπως η άμμος ή / και τα χαλίκια, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεγάλες ποσότητες για το σκοπό αυτό (Μουσιόπουλος κ.α., 2008β)

8.5 Μονάδες ανακύκλωσης σκυροδέματος.

Τα συγκροτήματα ανακύκλωσης σκυροδέματος διακρίνονται σε συγκροτήματα παραγωγής αυτοφερόμενα τα οποία χρησιμοποιούνται εντός του εργοταξίου και σε μόνιμα εγκατεστημένα συγκροτήματα σε οργανωμένες κεντρικές μονάδες δημόσιες ή ιδιωτικές, οι οποίες ανταποκρίνονται στις νέες τεχνολογικές εξελίξεις. Πολλοί παραγωγείς αδρανών υλικών εφαρμόζουν την ανακύκλωση σκυροδέματος με τον ακόλουθο τρόπο.

Τα υλικά τα οποία συλλέγονται από την καθαίρεση σκυροδέματος μεταφέρονται στο κέντρο ανακύκλωσης και αρχικά τροφοδοτούνται στο θραυστήρα πρόθραυσης. Μπορεί οι πέτρες και τα συντρίμια σκυροδέματος να περιέχουν διάφορα άλλα υλικά όπως άσφαλτο, ξύλα, τούβλα, χαρτιά, πλαστικά και ακαθαρσίες. Τα μηχανήματα θραύσεως επεξεργάζονται μόνο σκυροδέματα που είναι απαλλαγμένα από τα ακατάλληλα αυτά υλικά, τα οποία απομακρύνονται με ειδικές διατάξεις. Μέταλλα, όπως κομμάτια από ράβδους οπλισμού γίνονται δεκτά, αφού μπορεί να αφαιρεθούν με μαγνήτες ή άλλες διατάξεις διαχωρισμού και στη συνέχεια να ανακυκλωθούν με τήξη ή άλλες χρήσεις.

Στο λατομείο έχουν εγκατεστημένο το μόνιμο συγκρότημα, ενώ στο εργοτάξιο με το οποίο συνεργάζονται το κινητό. Ο εργολάβος του έργου αναλαμβάνει τη μεταφορά των απορριμμάτων σκυροδέματος στο λατομείο από το οποίο επιστρέφει στο εργοτάξιο του με πρωτογενή ή ανακυκλωμένα αδρανή. Στην περίπτωση αυτή, ο εργολάβος έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την απόθεση/πώληση των απορριμμάτων σκυροδέματος σε ένα λατομείο/κέντρο ανακύκλωσης και να επιστρέψει τα φορτηγά του με πρωτογενή ή ανακυκλωμένα αδρανή, αντί άδεια από τους χώρους απόθεσης μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο και το λειτουργικό του κόστος. Το κινητό συγκρότημα έχει το πλεονέκτημα της συγκριτικά χαμηλής επένδυσης, αλλά δεν έχει την ικανότητα με μηχανικά μόνο μέσα να παράγει την κατάλληλη διαβάθμιση στα

λεπτόκοκκα υλικά και να απομακρύνει διάφορες άλλες ρυπαρές προσμίξεις (Εφραιμίδης, 2008).

8.5.1. Αυτοφερόμενα συγκροτήματα ανακύκλωσης.

Η θραύση του σκυροδέματος μπορεί να εφαρμοστεί στο εργοτάξιο κατεδάφισης με αυτοφερόμενα θραυστικά συγκροτήματα, μειώνοντας το κόστος κατασκευής και την ατμοσφαιρική ρύπανση που δημιουργείται από τη μεταφορά υλικών προς και από το λατομείο. Τα κινητά συγκροτήματα ανακύκλωσης εγκαθίστανται μέσα στο εργοτάξιο του προς κατεδάφιση έργου. Το κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό, γεγονός που συμβάλει στην απόσβεσή τους σε σύντομο χρονικό διάστημα, αλλά και με τη δυνατότητα ακόμα να μπορούν να αποσβεστούν με τη χρήση τους και σε ένα μεγάλο έργο. Τα μεγάλα αυτοφερόμενα συγκροτήματα μπορούν να επεξεργαστούν μέχρι 400,00 κυβικά μέτρα/ώρα απορρίμματα σκυροδέματος.

Τα συγκροτήματα αυτά αποτελούνται από ένα θραυστήρα απορριμμάτων σκυροδέματος, πλευρικό μεταφορέα απόθεσης ακατάλληλων υλικών, θραυστήρα δευτερογενούς θραύσης, συγκρότημα κοσκινίσματος και ταινιόδρομο επαναφοράς του υπερδιάστατου υλικού από το κόσκινο στο θραυστήρα για συμπληρωματική θραύση. Σε περίπτωση μικρών ποσοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρά αυτοφερόμενα συγκροτήματα μέχρι 100,00 κυβικά/ώρα, τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν σε στενούς χώρους μέσα στις πόλεις (Εφραιμίδης, 2008).

Τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης κατάλληλων αυτοφερόμενων συγκροτημάτων ανακύκλωσης απορριμμάτων σκυροδέματος είναι:

- Το μηδενικό κόστος απομάκρυνσης των απορριμμάτων σκυροδέματος προς τους χώρους αποθήκευσης και της μεταφοράς αδρανών από τα λατομεία προς το εργοτάξιο.
- Η μείωση του εργατικού κόστους που θα απαιτούνταν για την εκτέλεση των παραπάνω διαδικασιών οι οποίες παρά τον καλό προγραμματισμό, συνήθως περιλαμβάνουν και κάποια διαστήματα αεργίας.
- Η αποσυμφόρηση των δρόμων από τα οχήματα που θα χρησιμοποιούνταν τόσο για την απομάκρυνση των απορριμμάτων σκυροδέματος, όσο και για τον εφοδιασμό του εργοταξίου με αδρανή υλικά.

8.5.2. Μόνιμα συγκροτήματα ανακύκλωσης

Τα μόνιμα συγκροτήματα των κέντρων ανακύκλωσης είναι ολοκληρωμένα εργοστάσια παραγωγής με εξελιγμένα μηχανήματα καθαρισμού, θραύσεως, μηχανικής ή με μαγνήτες διαλογής, διαχωρισμού, κοσκινίσματος, πλύσεως του λεπτόκοκκου υλικού και ελέγχου παραγωγής. Η ποιότητα των παραγόμενων από την ανακύκλωση αδρανών υλικών στα συγκροτήματα αυτά είναι ίσης ή ακόμα και ανώτερης ποιότητας, καθώς στο τελευταίο στάδιο παραγωγής γίνεται πλύσιμο της άμμου, με αποτέλεσμα το λεπτόκοκκο υλικό να είναι εντός των προδιαγραφών της παραγωγής.

8.5.3. Εγκαταστάσεις παραγωγής ανακυκλωμένων αδρανών

Η ανάγκη για την παραγωγή και τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών από σκυρόδεμα είναι σήμερα ιδιαίτερος σοβαρή. Το ζήτημα αυτό θεωρείται πολύ σημαντικό ιδιαίτερα για την Ελλάδα, καθώς υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες για την κατασκευή μεγάλων υποδομών. Με την παραγωγή και χρήση ανακυκλωμένων αδρανών από σκυρόδεμα:

- Υπάρχει η αναγνώριση των προϋποθέσεων για την ουσιώδη προστασία των φυσικών πόρων της χώρας, που δεν είναι ούτε ανεξάντλητοι αλλά ούτε και ουσιώδεις.
- Υπάρχει σημαντική μείωση των ποσοτήτων των απορριμμάτων του νωπού σκυροδέματος, που παράνομα καταλήγουν σε ανεξέλεγκτους χώρους απόθεσης.
- Ο σκοπός της βιώσιμης ανάπτυξης ακολουθείται και η συνεπώς τίθενται οι βάσεις για μια συνύπαρξη ανθρώπου κι φύσης χωρίς πλήγματα.

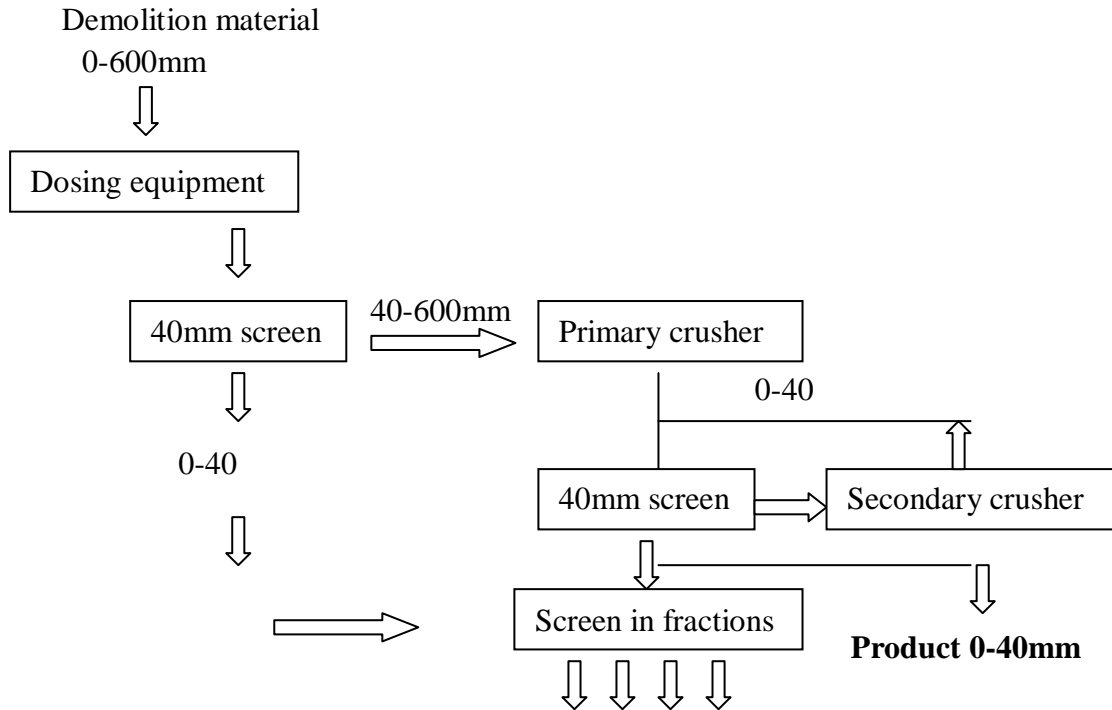
Οι εγκαταστάσεις παραγωγής ανακυκλωμένων αδρανών είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αδρανών από φυσικές πηγές. Περιλαμβάνουν διάφορους τύπους θραυστήρων, οθόνες, εξοπλισμούς μεταφοράς και συσκευές για την αφαίρεση των ξένων υλικών. Η βασική μέθοδος ανακύκλωσης είναι αυτή της μεθόδου θραύσης των ερειπίων για την παραγωγή ενός κοκκομετρικά διαβαθμισμένου προϊόντος με συγκεκριμένες διαστάσεις κόκκων. Ο βαθμός επαναεπεξεργασίας του κοκκομετρικά διαβαθμισμένου προϊόντος καθορίζεται από το επίπεδο μόλυνσης των αρχικών ερειπίων και το σκοπό για τον οποίο προσδιορίζεται να χρησιμοποιηθεί (υλικό πλήρωσης, νέο εργοστασιακό σκυρόδεμα, υλικό υπόβασης οδοστρώματος κ.α.) (Torben, 2002).

Αρκετοί επιστήμονες έχουν ασχοληθεί με το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων της ανακύκλωσης για τα απορρίμματα της κατεδάφισης και ειδικότερα με θέματα όπως η ανακύκλωση των οδοστρωμάτων συμπεριλαμβανομένης της θραύσης, της απομάκρυνσης του οπλισμού, της διαλογής, της αποθήκευσης, των αναλογιών μίξης κ.α.. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν είναι ότι η ανακύκλωση του σκυροδέματος, απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, όπως οι θραύστες των οδοστρωμάτων και οι ηλεκτρομαγνήτες για την απομάκρυνση του οπλισμού. Ωστόσο, όλοι οι άλλοι εξοπλισμοί και οι διαδικασίες είναι συνήθως εκείνοι που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κατασκευών. Για απορρίμματα σκυροδέματος με ελαφρύ οπλισμό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικές διαδικασίες.

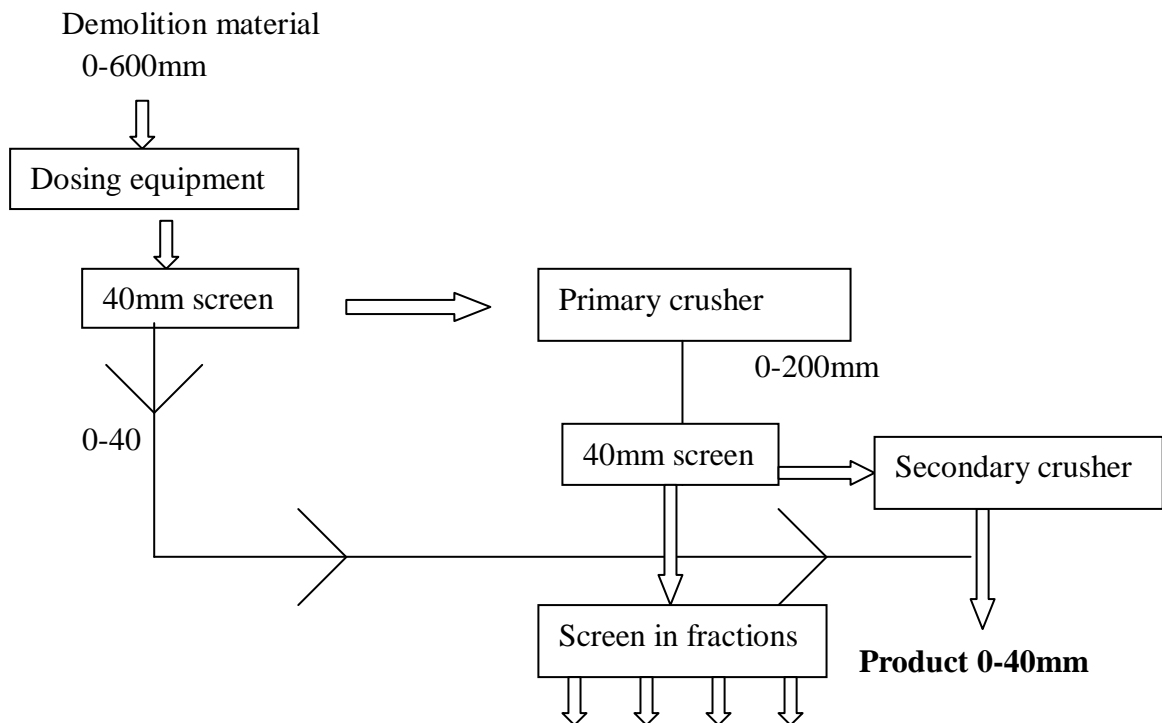
Μερικές από αυτές τις δυνατότητες δίνονται στα διαγράμματα που παρουσιάζονται ακολούθως (Σχήμα 8.4 & 8.5). Οι εγκαταστάσεις αυτές θεωρούνται πρώτης γενιάς και χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι δεν υπάρχει καμιά εγκατάσταση για την αφαίρεση των ξένων σωμάτων εκτός από το μαγνήτη που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του οπλισμού. Αυτού του τύπου εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανακύκλωση οδοστρωμάτων.

Στο Σχήμα 8.4 έχουμε το κλειστό σύστημα ανακύκλωσης ενώ στο Σχήμα 8.5 το ανοιχτό. Παρόλο που και τα δυο συστήματα χρησιμοποιούν τον ίδιο βασικό εξοπλισμό, στο δεύτερο υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες το προϊόν παραγωγής να

μην έχει καλή διαβάθμιση λόγω το ότι το μέγιστο μέγεθος κόκκων δεν προσδιορίζεται επαρκώς.



Σχήμα 8.4: Διάγραμμα ροής για την παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών από μάζα σκυροδέματος, το οποίο δεν περιέχει ξένες προσμίξεις. Κλειστό σύστημα. (Torben, 2002, επεξεργασία ίδια).



Σχήμα 8.5: Διάγραμμα ροής για την παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών από μάζα σκυροδέματος, το οποίο δεν περιέχει ξένες προσμίξεις. Ανοιχτό σύστημα. (Torben, 2002, επεξεργασία ίδια).

Το πρόβλημα είναι ότι το σκυρόδεμα που προέρχεται από καθαιρέσεις τις περισσότερες φορές έχει και ξένα υλικά όπως ξύλο, μέταλλο, πλαστικά και πολλά άλλα υλικά που βρίσκονται στην κατασκευή. Για αυτό το λόγο προτού ξεκινήσει η θραύση του σκυροδέματος, προτείνεται να γίνεται απομάκρυνση των υλικών αυτών είτε μηχανικά είτε χειρονακτικά, ενώ το τέλος μπορεί να γίνει καθαρισμός των προϊόντων με τη βοήθεια της ξηρής ή υγρής ταξινόμησης. Οι εγκαταστάσεις που λειτουργούν σύμφωνα με τέτοιες αρχές θεωρούνται ως εγκαταστάσεις επεξεργασίας δεύτερης επιλογής. Ένα πλαστικό έργο που εκτελέστηκε στη Δανία έδειξε ότι, όταν οργανωθεί κατάλληλα η επιτόπου χειρονακτική ταξινόμηση των προϊόντων κατεδάφισης και η πώληση των επαναχρησιμοποιήσιμων στοιχείων μπορεί να είναι οικονομικά συμφέρουσα.

Στη δύσκολη και επίπονη αυτή εργασία της διαλογής μπορεί να εφαρμοστεί και το οπτικό σύστημα. Το σύστημα αυτό έχει δοκιμαστεί με επιτυχία στη διαλογή μικτών υλικών, όπως ξύλα, χαρτιά, πλαστικά υλικά, PVC, γύψος, χρώμα, κ.α.. Το οπτικό σύστημα εντοπίζει τα ακατάλληλα υλικά και τα διαχωρίζει έτσι ώστε το συγκρότημα ανακύκλωσης να τροφοδοτείται μόνο με καθαρά υλικά.

Οι εγκαταστάσεις της δεύτερης επιλογής βασίζονται στον παρακάτω σχεδιασμό. Μεγάλα κομμάτια των συντριμμιών που φτάνουν από τις περιοχές κατεδάφισης μειώνονται σε 0,40-0,70 m μέγιστο μέγεθος με τη βοήθεια σφαιρών κατεδάφισης και με μια υδραυλική ψαλίδα γίνεται η κοπή του οπλισμού. Τα μεγάλα κομμάτια του οπλισμού, του ξύλου, των πλαστικών και των χαρτιών αφαιρούνται με το χέρι. Το εισερχόμενο υλικό συντρίβεται έπειτα σε έναν αρχικό θραυστήρα και στη συνέχεια περνάει από κόσκινα των 10,00 mm. Τα κομμάτια που είναι μικρότερα από 10,00 mm απορρίπτονται ώστε το τελικό προϊόν να μην περιέχει μολυσματικούς παράγοντες.

Τεμάχια μεγαλύτερα των 40,00 mm περνάνε μέσω ενός δευτεροβάθμιου σαγονιού ή κώνου ή σφυριού, ώστε το μέγιστο μέγεθος κόκκου να είναι τα 40,00mm. Όλα τα υλικά πλένονται ή κοσκινίζονται με αέρα προκειμένου να αφαιρεθεί το παραμένον ελαφρύ υλικό και το καθαρό υλικό να διαβαθμιστεί σε μεγέθη σύμφωνα με τις επιθυμητές προδιαγραφές. Ο σίδηρος και ο χάλυβας απομακρύνονται με τη βοήθεια αυτό-καθαριζόμενων μαγνητών που τοποθετούνται σε μια ή περισσότερες κρίσιμες θέσεις πάνω από τις ταινίες μεταφοράς.

Ανακυκλωμένα αδρανή που προέρχονται από τα μικτά ερείπια κτιρίων περιέχουν συνήθως λιγότερο από 1,00 % ακαθαρσίες, ποσοστό αποδεκτό για συγκοινωνιακές κατασκευές αλλά όχι για την παραγωγή σκυροδέματος. Εντούτοις, όταν τα αδρανή προέρχονται από πρώτες ύλες που περιέχουν περισσότερο από 95% του παλαιού σκυροδέματος, το τελικό προϊόν θα είναι συνήθως αρκετά καλό για να ανταποκριθεί στις προδιαγραφές για αδρανή για σκυρόδεμα χωρίς να υπάρχει η ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας.

Στις υπό μελέτες μελλοντικές εγκαταστάσεις τρίτης γενιάς όλο το κατεδαφισμένο υλικό θα μπορεί να διαχωριστεί, να επεξεργαστεί και να αποτελέσει προϊόν εκμετάλλευσης και μεταπώλησης, ελαχιστοποιώντας τα απορρίμματα των κατεδαφίσεων. Αυτό θα είναι και μια ιδανική λύση για τα απορρίμματα των κατεδαφίσεων τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική άποψη. Οι πρώτες

εγκαταστάσεις τρίτης γενιάς έχουν ήδη κατασκευαστεί στο Ρότερνταμ της Ολλανδίας.

Σε πολλές περιπτώσεις συναντάμε δυο τύπους εγκαταστάσεων ανακύκλωσης, εκείνους που παράγουν αδρανή μόνο με την αρχική θραύση και εκείνους που περιλαμβάνουν και την αρχική και τη δευτεροβάθμια θραύση. Στην πρώτη περίπτωση μπορεί να είναι πιο οικονομική από πλευράς κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας, το παραγόμενο όμως προϊόν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του κατεδαφιστέου υλικού.

Στη Δυτική Γερμανία, έχουν κατασκευαστεί περισσότερες από 100 εγκαταστάσεις ανακύκλωσης. Οι περισσότερες από αυτές είναι μικρές με δυνατότητα μόνο για θραύση και διαλογή των επιλεγμένων κατεδαφιστέων υλικών. Αυτές οι απλές εγκαταστάσεις δεν είναι σε θέση να απομακρύνουν τους μολυσματικούς παράγοντες, με εξαίρεση το σίδηρο και το χάλυβα, οι οποίοι απομακρύνονται με τη βοήθεια αυτό-καθαριζόμενων μαγνητών και τα λεπτόκοκκα μέσω διαλογής με κόσκινα. Μόνο μερικές μεγαλύτερες εγκαταστάσεις σε αστικές περιοχές εφαρμόζουν την πλύση ή το κοσκίνισμα με αέρα, διαδικασίες για την αφαίρεση των ελαφριών κόκκων. Έτσι μπορεί να παραχθεί υλικό πιο ανθεκτικό σε παγετό ή χονδρόκοκκο υλικό υποστρώσεων και να δικαιολογηθούν υψηλότερες τιμές.

Ο καλύτερος καθαρισμός των ανακυκλωμένων αδρανών προφανώς παράγει υψηλότερης ποιότητας σκυροδέμα, αλλά αυτό απαιτεί υψηλότερο κόστος παραγωγής και έτσι χαμηλότερη οικονομική απόδοση του συστήματος.

Θραυστήρες

Διάφοροι τύποι θραυστήρων όπως π.χ. θραυστήρες σαγονιών, σφυριά αντίκτυπου, σφαιρόμυλοι και θραυστήρες κανονικοί, μελετήθηκαν σε μια Ολλανδική έρευνα προκειμένου να καθοριστεί πόσο καλά εκτέλεσαν τη συντριβή του παλαιού σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Οι θραυστήρες σαγονιών παρέχουν την καλύτερη διαβάθμιση των ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος. Ο κανονικός θραυστήρας είναι κατάλληλος ως δευτεροβάθμιος θραυστήρας, με μέγιστο μέγεθος εισαγωγής υλικών τα 200,00 mm. Οι σφαιρόμυλοι ταλάντευσης χρησιμοποιούνται σπάνια. Οι τυπάδες παρέχουν την καλύτερη διαβάθμιση αδρανών για συγκοινωνιακές κατασκευές, αλλά είναι λιγότερο ευαίσθητοι στο υλικό που δεν μπορεί να θραυστεί, όπως ο οπλισμός.

Σχετικά με άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή, εκτός της διαβάθμισης, οι θραυστήρες σαγονιών είναι καλύτεροι από τους τυπάδες, επειδή οι θραυστήρες σαγονιών ρυθμίζονται με άνοιγμα 1,20-1,50 φορές του μέγιστου μεγέθους των αρχικών αδρανών και θα συντρίψουν μόνο ένα μικρό ποσοστό των αρχικών κόκκων των αδρανών παλιού σκυροδέματος. Οι θραυστήρες τυπάδες, αφετέρου, θα συντρίψουν το παλαιό τσιμετολίθωμα και τα αρχικά αδρανή με όμοιο τρόπο και θα παράγουν έτσι ένα χονδρόκοκκο προϊόν με χαμηλότερη ποιότητα. Ένα άλλο μειονέκτημα των θραυστήρων τυπάδων είναι η υψηλή φθορά τους λόγω χρήσης και επομένως σχετικά υψηλές δαπάνες συντήρησης.

Όλοι οι θραυστήρες που ερευνήθηκαν παρήγαγαν περίπου ίδιο ποσοστό κυβικών κόκκων ανακυκλωμένων αδρανών και φαίνεται ότι οι ιδιότητες του

σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή βελτιώνονται όταν ακολουθεί δευτεροβάθμια θραύση.

Ένα μεγάλο ποσοστό του τελικού προϊόντος με μέγεθος μικρότερο από 40,00mm στις εγκαταστάσεις σύνθλιψης και κοσκινίσματος προέρχεται κατευθείαν από τον αρχικό θραυστήρα. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα, αν ο αρχικός θραυστήρας παρέχει ένα προϊόν που δεν ικανοποιεί τις προδιαγραφές του παραγόμενου προϊόντος. Επομένως, πρέπει να είναι εφικτό να ρυθμιστεί ο αρχικός θραυστήρας, έτσι ώστε στο τελικό προϊόν η αναλογία μεταξύ των χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων προϊόντων να μπορεί να μειωθεί. Αυτό σημαίνει ότι ο δευτεροβάθμιος θραυστήρας πρέπει να έχει σχετικά μεγάλη χωρητικότητα.

Η οικονομία της παραγωγής των χονδρόκοκκων αδρανών μπορεί να μεγιστοποιηθεί με την εξισορρόπηση των θραυστήρων. Στον αρχικό θραυστήρα πρέπει να τεθεί ως στόχος να μειωθεί το υλικό στο μεγαλύτερο μέγεθος που θα ταιριάζει στο δευτεροβάθμιο θραυστήρα χωρίς απαίτηση τριτογενούς συντριβής.

Τα αποτελέσματα από τις διάφορες χώρες είναι δύσκολο να συγκριθούν, επειδή οι έρευνες έχουν γίνει με διάφορους τύπους αρχικών σκυροδεμάτων. Εντούτοις, φαίνεται ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο ποσοστό της άμμου που παράγεται από τους διαφορετικούς θραυστήρες. Για το ίδιο μέγιστο μέγεθος κόκκου ανακυκλωμένων αδρανών (25,00 mm), ο τεμαχισμός αποδίδει διπλάσια ποσότητα ή 40,00 % των ανεπιθύμητων λεπτόκοκκων κάτω των 4,80 mm, συγκρινόμενα με το 20,00 % για τους θραυστήρες σαγονιών. Φαίνεται ότι οι θραυστήρες σαγονιών πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία του άοπλου ή ελαφριά ωπλισμένου σκυροδέματος, ενώ οι βαριοί θραυστήρες τυπάδες διάφορων σχεδίων είναι η καλύτερη επιλογή για το κανονικά ή βαριά οπλισμένο σκυρόδεμα.

Εφόσον τα προϊόντα κατεδάφισης πρόκειται να ανακυκλωθούν, οι μέθοδοι κατεδάφισης που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να μειώσουν τα μεμονωμένα κομμάτια των συντριμμιών σε ένα μέγεθος, που θα είναι αποδεκτό για την εισαγωγή στον αρχικό θραυστήρα στις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης. Το μέγιστο μέγεθος για τις μεγάλες μόνιμες εγκαταστάσεις είναι τα 1.200,00 mm, ενώ για τις κινητές εγκαταστάσεις είναι τα 400,00-700,00 mm. Κατά συνέπεια, η ανακύκλωση των απορριμμάτων κατεδάφισης απαιτεί λεπτομερή προγραμματισμό εκ μέρους όλων των συμβαλλόμενων μερών που συμμετέχουν σε μια τέτοια επιχείρηση.

8.5.4. Ταξινόμηση συσκευών στη διαδικασία της ανακύκλωσης

Κατά τα αντίστοιχα των προδιαγραφών για τα φυσικά και θραυστά αδρανή, τα ανακυκλωμένα αδρανή πρέπει να είναι απαλλαγμένα από ρύπους, κομμάτια αργίλου, γύψο, άσφαλτο, ξύλα, πλαστικά, χρώμα κι άλλες ακαθαρσίες.

Το πρώτο στάδιο όπου τα συντρίμια της κατεδάφισης μπορούν να ταξινομηθούν, είναι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της κατεδάφισης. Κατά συνέπεια, εφόσον δίνεται το κίνητρο, ο ανάδοχος της κατεδάφισης μπορεί, κάνοντας χρήση επιλεγμένων μεθόδων, να ανακτήσει μεγάλο μέρος του υλικού σε μια σχετικά μη ρυπαρή μορφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τέτοιες διαδικασίες κατεδάφισης δεν είναι βιώσιμες, λαμβάνοντας υπόψη τους χρονικούς περιορισμούς. Επομένως, η επιλεκτική κατεδάφιση πραγματοποιείται μόνο όπου το επιτρέπουν οι συνθήκες και ο

χρόνος και όπου, σαφώς, η επιχείρηση θα έχει και οικονομικά οφέλη. Έτσι είναι ιδιαίτερος επιθυμητές οι συμβάσεις κατεδάφισης που περιλαμβάνουν αποσυναρμολόγηση δομών που αποτελούνται από ένα μόνο τύπου υλικού, όπως π.χ. οδοστρώματα από σκυρόδεμα, δεδομένου ότι παρέχουν μια άριστη πηγή καθαρών υλικών καθαιρέσεων που απαιτούν ελάχιστη επεξεργασία.

Μόλις ολοκληρωθεί η κατεδάφιση και τα συντρίμια οδηγηθούν στο κέντρο ανακύκλωσης, η διαλογή περιορίζεται στην αποθήκευση σε σιλό και την αρχική διαλογή.

Η αποθήκευση σε σιλό είναι απλά η αποθήκευση του εισερχόμενου υλικού σε χωρισμένους χώρους ανάλογα με τον τύπο και το βαθμό ρύπανσης. Αυτό δίνει στο χειριστή της εγκατάστασης την ευκαιρία να δουλέψει ξεχωριστά το υπερμέγεθες και το πολύ λεπτό υλικό. Επιπλέον, με τη συγκέντρωση ενός ικανοποιητικού αποθέματος ενός ενιαίου καθαρού υλικού είναι ευκολότερη η ρύθμιση των θραυστήρων για το συγκεκριμένο υλικό, ώστε να συντρίψουν με ένα ενιαίο ρυθμό. Τέτοια συσσώρευση είναι πρακτική μόνο σε περιπτώσεις όπου υπάρχει επάρκεια χώρου.

Στις περισσότερες εγκαταστάσεις ανακύκλωσης τα μεγαλύτερα αντικείμενα, όπως π.χ. ξύλινοι δοκοί, κομμάτια ασφάλτου, χαλαροί οπλισμοί, υφάσματα, πλαστικά, αφαιρούνται με το χέρι πριν την κατεδάφιση. Μετά την αρχική φάση της κατεδάφισης της κατασκευής, η σκόνη, ο γύψος, το ασβεστοκονίαμα και άλλες λεπτόκοκκες ουσίες αποβάλλονται περνώντας τα σπασμένα υλικά από ένα σύνολο εξονυχιστικού κοσκινίσματος και καταστρέφοντας όλα τα υλικά κάτω των 10,00 mm. Αυτοκαθαριζόμενοι μαγνήτες που τοποθετούνται σε διάφορα σημεία καίριων θέσεων πάνω από μεταφορικούς ιμάντες, χωρίζουν αποτελεσματικά τα κομμάτια του σκυροδέματος από τις ράβδους οπλισμού και άλλα σιδερένια κομμάτια από τα θραυσμένα αδρανή.

Το απλό ξηρό κοσκίνισμα χωρίζει μόνο με βάση τις διαφορές στο μέγεθος και στη μορφή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς μόνο στο να ξεχωρίσει υλικό που συντρίβεται με θραυστήρα σαγονιών, επειδή ένας θραυστήρας τυπάδα θα συντρίψει κατά τρόπο μη επιλεκτικό. Ο διαχωρισμός των χονδρόκοκκων υλικών είναι αποτελεσματικότερος όταν χρησιμοποιούνται κεκλιμένα κόσκινα που δονούνται με χαμηλή ταχύτητα, σε αντίθεση με το διαχωρισμό των λεπτόκοκκων αδρανών όπου πιο αποτελεσματικός είναι ο διαχωρισμός τους όταν τα κόσκινα είναι οριζόντια. Για το διαχωρισμό του ελαφριού υλικού τα προσαρμοσμένα επίπεδα κόσκινα είναι καλύτερα, δίνοντας λίγη απώλεια του πετρώδους υλικού ενώ ταυτόχρονα αφαιρείται περίπου το 80,00 % του ξύλου.

Επιπλέον, τα ερείπια κάνοντας χρήση αέρα μπορούν να καθαριστούν από την όποια σκόνη έχουν. Πολύ συχνά χρησιμοποιείται η μέθοδος του ξηρού κοσκινίσματος, διαδικασία που μπορεί να πραγματοποιηθεί και κάθετα και οριζόντια. Μια προϋπόθεση για ικανοποιητικό βαθμό διαχωρισμού είναι ότι το θραυσμένο προϊόν πρέπει να διαιρεθεί σε μέρη μεγέθους μεταξύ 0 και 40,00 mm. Το μειονέκτημα του ξηρού κοσκινίσματος είναι ότι παράγει αρκετή σκόνη που θα πρέπει να ελεγχθεί. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει και χρήση νερού υπό πίεση σε συνδυασμό με τεχνικές επίπλευσης.

Με την εφαρμογή των υγρών τεχνικών ταξινόμησης, όμως, το ξύλο, το νοβοπάν, τα πλαστικά και τα υλικά των στεγνών καθώς επίσης και τα ύποπτα θειικά (γύψος) και οι ασβεστοϊνες μπορούν να αφαιρεθούν αποτελεσματικά από υλικά μεγέθους 10,00 - 40,00 mm. Συνίσταται το κοσκίνισμα με ένα κόσκινο των 10,00 mm πριν την πλύση, επειδή τα υλικά με διάμετρο μεταξύ 0 - 10,00 mm προκαλούν μεγάλες ποσότητες ανεπιθύμητης λάσπης στο νερό πλύσης.

8.5.5. Διαδικασία παραγωγής

Το συγκρότημα ανακύκλωσης πρέπει να είναι κατάλληλο για την επεξεργασία μεγάλου εύρους μικτών υλικών που μπορεί να περιέχουν χαρτιά, πλαστικά, πολυστερίνες και σκουπίδια, όπως χώμα, άργιλο και ξύλα. Όταν το συγκρότημα δεν πλένει ανακυκλωμένα υλικά σε ποσότητα της τάξεως των 75,00 m³/h, τότε χρησιμοποιείται για το πλύσιμο των αποθεμάτων του εργοταξίου και για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων λεπτόκοκκων προσμίξεων από την άμμο. Με τη μέθοδο αυτή ελέγχεται η ποιότητα της εργοταξιακής άμμου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του παραγομένου σκυροδέματος.

Τα μικτά υλικά διαφόρων συστατικών φτάνουν στο εργοτάξιο ανακύκλωσης με φορτηγά οχήματα. Με την άφιξή τους στη γεφυροπλάστιγγα το φορτίο εξετάζεται με μια ευρυγώνιο κάμερα για τον έλεγχο της καταλληλότητας επεξεργασίας από το συγκρότημα πλύσεως. Τα ακατάλληλα φορτία οδηγούνται σε χωματερή για απόρριψη, ενώ τα κατάλληλα οδηγούνται στο συγκρότημα πλύσεως. Μεγάλα κομμάτια από κατεδαφίσεις τεμαχίζονται με κρουστικό σφυρί ή «ψαλίδι» που είναι προσαρμοσμένο στην άκρη του προβόλου υδραυλικού εκσκαφέα κατάλληλου μεγέθους. Το μεγαλύτερο μέρος των υλικών μεταφέρεται με φορτωτή σε σιαγονοφόρο θραυστήρα. Το τροφοδοτούμενο υλικό περνάει πρώτα από ένα δονητικό διαχωριστή πρώτης βαθμίδας για την αφαίρεση των υπερδιάστατων υλικών > 100,00 mm.

Ο θρυμματιστής σκυροδέματος είναι κατάλληλος για την κατάτμηση σκυροδέματος σε μικρά κομμάτια στο δάπεδο του εργοταξίου. Με κατάλληλη διαμόρφωση των εσωτερικών οδόντων κόβει και διαχωρίζει το χαλύβδινο σπλισμό. Η εργασία αυτή αυξάνει την παραγωγικότητα του συγκροτήματος ανακύκλωσης.

Τα μεταλλικά αντικείμενα απομακρύνονται με ένα μαγνήτη που είναι τοποθετημένος πάνω από τον τροφοδοτικό ιμάντα. Ο ιμάντας μεταφέρει το υλικό σε κόσκινο αποπλύσεως με καταιονισμό νερού. Πολτός υλικού < 5,00 mm οδηγείται σε ένα συγκρότημα πλύσεως και επεξεργασίας άμμου με ενσωματωμένο υδροκυκλώνα, ο οποίος αφαιρεί τα αιωρούμενα υλικά, όπως παιπάλη και άργιλο. Η άμμος αφυδατώνεται σε ποσοστό υγρασίας μικρότερο του 12,00 % και είναι απαλλαγμένη από μικροϋλικά κάτω των 0,04 mm. Η διαδικασία αυτή δίνει εμπορεύσιμη λεπτή άμμο χωρίς της ανάγκη προκοσκινίσματος ή αφαίρεσεως φυτικής γης από το τροφοδοτούμενο υλικό, έτσι ώστε να βελτιώνεται σημαντικά ή ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων, ιδιαίτερα της λεπτόκοκκης άμμου.

Όπως σε όλα τα συγκροτήματα πλύσεως, η ορθή διαχείριση του νερού αποπλύσεως είναι κρίσιμη για τη λειτουργία και την οικονομία της παραγωγής. Στα συγκροτήματα ανακύκλωσης αυτό είναι ένα τεχνικό πρόβλημα που οφείλεται στη

μεταβαλλόμενη σύνθεση ή και ρύπανση του τροφοδοτούμενου υλικού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι μεταξύ των οποίων επικρατέστερη είναι η μέθοδος του «πυκνωτή λάσπης» με ενσωματωμένη πολύ-ηλεκτρολυτική διάταξη οργανικής βάσης, η οποία υποστηρίζει τη διαχωριστική ικανότητα. Η διάταξη αυτή προκαλεί ταχύτατη καθίζηση των πλεοναζόντων στερεών υλικών (φαινόμενο θρόμβωσης), τα οποία ως πυκνή λάσπη μεταφέρονται με αντλίες λάσπης σε μια εξωτερική απόθεση σε απόσταση 300,00-400,00 m από το συγκρότημα. Το καθαρό νερό υπερχειλίζει τη δεξαμενή του πυκνωτή και φιλτράρεται για την αφαίρεση των υπόλοιπων αιωρούμενων ανεπιθύμητων προσμίξεων, όπως ελαιώδεις αφροί και στη συνέχεια μεταφέρεται στη δεξαμενή νερού του συγκροτήματος. Από τη θέση αυτή το νερό επανακυκλοφορεί στην απαιτούμενη καθαρότητα και ποσότητα στο συγκρότημα πλύσεως. Με τον πυκνωτή λάσπης δεν χρειάζονται πλέον οι υπαίθριες δεξαμενές καθίζησης.

Τα αδρανή υλικά και οι ανεπιθύμητοι κόκκοι περνάνε κατ' ευθείας από το πρωτογενές κόσκινο καταιονισμού σε ένα πλυντήριο με δίδυμους άξονες μήκους 8,00 m, οι οποίοι φέρουν πτερύγια από χρομομολυβδένιο μεγάλης διαμέτρου περίπου 1,50 m. Η ταχύτητα περιστροφής των αξόνων ρυθμίζεται εύκολα, έτσι ώστε να προσαρμόζεται στα μεταβλητά χαρακτηριστικά του υλικού. Διάφορα ελαφρά μολυσματικά υλικά, όπως σκουριά, πλαστικά και οργανικά υλικά, ξύλα και χόρτα αιωρούνται και μετακινούνται προς ένα κόσκινο αφαίρεσης απορριμμάτων, το οποίο επανακτά το νερό και τα λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία οδηγούνται στη μονάδα πλύσεως άμμου. Τα λεπτόκοκκα υλικά που απελευθερώνονται, και το νερό οδηγούνται σε ένα φρεάτιο με υποβρύχια αντλία. Το φρεάτιο συλλέγει επίσης νερά αποπλύσεως και υπόγεια νερά, τα οποία τελικά αντλούνται στο κόσκινο καταιονισμού.

Τα πλυμένα και αποστραγγισμένα αδρανή υλικά > 5,00 mm μεταφέρονται από το κόσκινο αποστραγγίσεως σε ένα κόσκινο δύο πλεγμάτων χωρίς νερό για την τελική κοκκομετρική διαβάθμιση. Η διεργασία παράγει πέντε εμπορεύσιμα προϊόντα: άμμος < 5,00 mm, 5,00-10,00 mm, 10,00-20,00 mm, 20,00-40,00 mm, 40,00-100,00 mm, τα οποία ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές παραγωγής σκυροδέματος.

Ακόμη και τα προϊόντα της πρέσας σε μορφή πίτας, τα οποία είναι συμπιεσμένη λάσπη και άργιλος, θεωρούνται εμπορεύσιμα προϊόντα ως αργλικό επίχρισμα για την επάλειψη καναλιών και οχετών νερού. Τα μεταλλικά υλικά, τα οποία συλλέγονται από το μαγνήτη πωλούνται ως παλιοσίδηρα (scrap).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται τους μαγνήτες αφαίρεσης των μετάλλων από το ρεύμα του υλικού. Οι μαγνήτες δεν χρησιμεύουν μόνο για την ανάκτηση μετάλλων αλλά και για να συμβάλλουν στην παραγωγή καθαρών υλικών, όπως αδρανών και ξύλων. Το κόσκινο της πρώτης βαθμίδας διαχωρίζει υλικά μεγέθους < 30,00 cm. Το κόσκινο της δεύτερης βαθμίδας αφαιρεί από το υλικό αυτό τα ανεπιθύμητα λεπτά υλικά. Το υπόλοιπο υλικό οδηγείται με ταινιόδρομο στο μαγνήτη, ο οποίος εκτρέπει τα μεταλλικά αντικείμενα από το ρεύμα του υλικού. Με μαγνήτες δινορευμάτων είναι δυνατή και η εκτροπή μη μεταλλικών υλικών, όπως αλουμίνιο, χαλκός και μπρούντζος.

Χρησιμοποιούνται μόνιμοι και ηλεκτρικοί μαγνήτες. Οι μόνιμοι μαγνήτες δεν απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια, γι' αυτό προτιμώνται στα αυτοφερόμενα κινητά συγκροτήματα. Στα μόνιμα κέντρα ανακύκλωσης χρησιμοποιούνται ηλεκτρικοί μαγνήτες, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη μαγνητική ισχύ, επομένως έχουν τη δυνατότητα να ανυψώνουν βαρύτερα και μεγαλύτερα αντικείμενα.

Το πλύσιμο των αδρανών υλικών προσθέτει υψηλή αξία στο τελικό προϊόν από ότι ο «ξηρός» διαχωρισμός. Η ικανότητα της παραγωγής άμμου υψηλής ποιότητας, η οποία αλλιώς θα πεταγόταν σε χωματερή, είναι ακόμη ένα σοβαρό πλεονέκτημα. Οι νέες εγκαταστάσεις με την εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας πλύσεως, δείχνει ότι η διαθεσιμότητα νερού και η διαχείριση των λεπτόκοκκων υλικών δεν αποτελούν πλέον σοβαρά εμπόδια για την αποδοτική πραγματοποίηση εμπορεύσιμων υλικών από υλικά που στο παρελθόν θεωρούντο σκουπίδια. Εναπόκειται τώρα στους διαχειριστές της ανακύκλωσης και των κατεδαφίσεων να αποφασίσουν πως θα επενδύσουν στις νέες αυτές τεχνολογίες για τις οποίες η πράξη δείχνει ότι είναι κερδοφόρες.

8.5.6. Οικονομική θεώρηση

Η ανακύκλωση σκυροδεμάτων έχει αποδειχθεί, ότι είναι κερδοφόρα επιχείρηση αλλά έχει ορισμένα όρια, τα οποία απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Αυτά είναι:

1. το κόστος μεταφοράς, το οποίο υποχρεώνει την αγορά να προσανατολίζεται προς τις αστικές περιοχές και πρέπει να διατηρείται σε χαμηλές τιμές.
2. η αγορά για ανακυκλωμένα υλικά επηρεάζεται από τις προδιαγραφές των χρηστών και από διάφορες προκαταλήψεις και επιφυλάξεις.
3. η διαθεσιμότητα των τροφοδοτούμενων στο συγκρότημα υλικών προσδιορίζεται από το μέγεθος των κατεδαφίσεων, η οποία κατά κανόνα γίνεται μέσα σε παλαιότερες και μεγαλύτερες πόλεις.

Οι τιμές κόστους διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τις συνθήκες, που επικρατούν στην περιοχή. Η τεχνολογική βελτίωση της παραγωγής και τα κίνητρα που πρέπει να παρέχει η διοίκηση για την τόνωση της ανακύκλωσης θα συντελέσουν στη μείωση του κόστους εκμετάλλευσης.

Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι με την ανακύκλωση εξασφαλίζονται οικονομικά οφέλη και η προστασία του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να μην αποτελεί πλέον υποχρέωση προς τη φύση αλλά μια κερδοφόρο επιχείρηση.

8.6. Στόχοι για την βελτίωση του σκυροδέματος ως υλικού

- Διαδικασία παραγωγής και χρήσης σκυροδέματος με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

Η παραγωγή τσιμέντου είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα. Στις ΗΠΑ υπολογίζεται ότι το 80% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και το 66,00 % της κατανάλωσης πετρελαίου στην βιομηχανία καταναλώνονται στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου. Ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 μέχρι σήμερα η κατανάλωση αυτή ενέργειας έχει μειωθεί κατά 30,00 %. Υπάρχουν όμως και άλλα περιθώρια μείωσης

της κατανάλωσης μέχρι του ποσοστού 50,00 % σε όλο τον κύκλο παραγωγής και χρήσης σκυροδέματος. Άμεσα:

1. Με τη μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων και τη μερική αντικατάστασή τους με βιομηχανικά απόβλητα όπως χρησιμοποιημένα λάδια και διαλυτικά, ελαστικά αυτοκινήτων, πλαστικά ή με αγροτικά απόβλητα όπως κελύφη καρπών φοίνικα στη Μαλαισία, κελύφη καφέ στην Ουγκάντα, περιβλήματα ρυζιού στις Φιλιππίνες καθώς και ζωικά άλευρα.

2. Με την βελτίωση της τεχνολογίας παραγωγής τσιμέντου.

Έμμεσα:

1. Με την αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με παραπροϊόντα της βιομηχανίας όπως ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη ή ποζολάνη. Το κέρδος είναι διπλό : Χρησιμοποιώντας αυτά τα παραπροϊόντα αποφεύγεται η ρύπανση του περιβάλλοντος και από την εναπόθεσή τους στη φύση.

2. Με την επίτευξη μεγαλύτερης ανθεκτικότητας και αντοχής του σκυροδέματος συνεπώς λιγότερης ανάγκης επισκευών.

- Διαδικασία παραγωγής τσιμέντου με λιγότερη ρύπανση δηλ. λιγότερη εκπομπή μονοξειδίου του αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα και λιγότερη παραγωγή σκωρίας.

Το CO₂ που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα κατά την παραγωγή τσιμέντου αντιστοιχεί στο 1,50–2,00 % της συνολικής εκπομπής CO₂ που προέρχεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα στον πλανήτη. Στην Κίνα, που από το 2006 είναι η πρώτη χώρα στον κόσμο σε εκπομπή αερίων CO₂ και στην οποία η κατασκευαστική δραστηριότητα είναι το ήμισυ της παγκόσμιας, χρησιμοποιείται το 43,00 % του παγκόσμια παραγομένου τσιμέντου. Ο αρμόδιος υπουργός ανακοίνωσε τον Φεβρουάριο του 2009, ότι στόχος της κινεζικής κυβέρνησης είναι να καταστήσουν τον κατασκευαστικό τομέα πιο πράσινο, αντικαθιστώντας τις πεπαλαιωμένες τσιμεντοβιομηχανίες με καινούργιες προηγμένης τεχνολογίας.

Ήδη, εδώ και πολλά χρόνια η τσιμεντοβιομηχανία και τα ερευνητικά κέντρα εργάζονται με στόχο το πράσινο σκυρόδεμα που εκπέμπει όσο γίνεται λιγότερο CO₂ κατά την παρασκευή του τσιμέντου, ικανοποιώντας έτσι και το πρωτόκολλο του Κιότο, και έχει παράλληλα βελτιωμένες ιδιότητες. Μεταξύ άλλων, γίνεται ερευνητική προσπάθεια να ελαττωθεί η περιεκτικότητα σε τσιμέντο ανά m³ σκυροδέματος που είναι σήμερα γύρω στα 300,00 kg/m³ χωρίς να επηρεαστούν οι ιδιότητες του παραγομένου υλικού.

Η γαλλική εταιρεία Lafarge, πρώτη παγκοσμίως σε παραγωγή τσιμέντου, ανέλαβε την υποχρέωση να μειώσει το εκπεμπόμενο CO₂ ανά τόνο τσιμέντου κατά 20,00 % μεταξύ των ετών 1990 και 2010. Τέλος του 2007, είχε επιτύχει την μείωση κατά 16,00 %.

Για να γίνει κατανοητό το εύρος των μεγεθών, ενδεικτικά αναφέρεται πως αυτή η προσπάθεια έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση 100,00 kg CO₂/τον τσιμέντου, και συνολικά την εξοικονόμηση 14,00 εκατομμυρίων τόνων CO₂ , δηλ. όσο CO₂ εκπέμπει όλη η πόλη του Παρισιού σε ένα χρόνο.

Η ίδια εταιρεία έχει εφεύρει το υλικό Ductal, που περιέχει τσιμέντο, θρυμματισμένο χαλαζία και ίνες χάλυβα διαμέτρου 120,00 μικρών. Μια γέφυρα κατασκευασμένη με Ductal, επιτυγχάνει οικονομία 35,00 % σε πρώτες ύλες, 46,00 % σε ενέργεια και 53,00 % σε εκπομπή CO₂ σε σχέση με μια αντίστοιχη γέφυρα κατασκευασμένη με κλασσικό σκυρόδεμα.

Η αγγλική εταιρεία Novacem, διατείνεται ότι έχει εφεύρει ένα τσιμέντο που χρησιμοποιεί το πυριτικό μαγνήσιο κατά την παραγωγή του, το οποίο δεν εκπέμπει CO₂ κατά την καύση του, που γίνεται και σε χαμηλότερη θερμοκρασία, εξόν ταυτόχρονα και εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, το σκυρόδεμα που παράγεται με τη χρήση αυτού του τσιμέντου δεσμεύει πολύ περισσότερο CO₂ από την ατμόσφαιρα κατά την διαδικασία της σκλήρυνσής του.

Η εταιρεία Calera με έδρα την Καλιφόρνια, διατείνεται ότι πέτυχε να αντιστρέψει την διαδικασία εκπομπής CO₂ κατά την παραγωγή τσιμέντου. Δηλαδή, κατά την διάρκειά της, αντί να παράγεται CO₂, αντίθετα παγιδεύεται από την ατμόσφαιρα το CO₂ που προέρχεται από ρυπογόνες βιομηχανίες και έτσι το παραγόμενο τσιμέντο αποτελεί κατά κάποιο τρόπο, αποθήκη του CO₂ της ατμόσφαιρας!

- Παραγωγή σκυροδέματος με χρήση και υλικών κατεδαφίσεων ή παραγώνων υλικών βιομηχανιών ως αδρανών (ανάπτυξη νέων μεθόδων ανακύκλωσης).

Ο στόχος είναι διττός: η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος από στερεά απόβλητα (μπαζα). Στην Ευρώπη, σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της περιόδου 1996-1997, υπολογίζεται ότι παράγονται από την κατασκευή 180 εκατομμύρια τόνοι στερεά απόβλητα το χρόνο τα οποία εναποτίθενται κατά 78,00 % και ανακυκλώνονται κατά 22,00 % σε μέσο ευρωπαϊκό όρο. Η δυνατότητα ανακύκλωσης είναι πολύ μεγαλύτερη και απόδειξη οι τρεις χώρες της Ε.Ε. (Δανία, Κάτω Χώρες και Βέλγιο) που επιτυγχάνουν ποσοστά ανακύκλωσης από 80,00 % έως και 90,00 %. Ουραγός σε αυτά τα ποσοστά η Ελλάδα που μαζί με την Ισπανία και την Ιρλανδία έχουν ποσοστά ανακύκλωσης κάτω του 5,00 %.

- Ανακύκλωση του σκυροδέματος μετά την κατεδάφιση κατασκευών για χρήση σε βάσεις οδοστρωμάτων ή για την προστασία ακτογραμμών.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Το σκυρόδεμα λόγω των διαφόρων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει (σταθερότητα, αντοχή στο χρόνο, μορφοποίηση κ.α.), αποτελεί παγκοσμίως το δημοφιλέστερο δομικό υλικό και χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις κατασκευές (κτίρια, δρόμους, γέφυρες κ.λπ.). Για την παραγωγή όμως του σκυροδέματος, αλλά και των πρώτων υλών του, απαιτείται κατανάλωση ενέργειας γεγονός που συνεπάγεται την δημιουργία CO₂.

Μια αξιοπρόσεχτη παρατήρηση είναι ότι, η ενσωματωμένη ενέργεια του σκυροδέματος εκτιμάται περίπου 3,00 - 4,00 MJ/kg και καθίσταται μικρότερη από το άθροισμα των ποσών των ενσωματωμένων ενεργειών των συστατικών υλικών του. Η κατάσταση αυτή δικαιολογείται αν αναλογιστεί κανείς ότι η περιεκτικότητα του καθαρού τσιμέντου στο σκυρόδεμα κυμαίνεται από 15,00 – 20,00 % στον όγκο του. Με άλλα λόγια, τα επιμέρους ποσά της ενσωματωμένης ενέργειας των υλικών από το οποίο αποτελείται το σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα αυξημένα και γι' αυτό το καθιστούν ένα από τα δομικά υλικά με τη μεγαλύτερη ενσωματωμένη ενέργεια. Την επιβαρυνόμενη ενεργειακά παρουσία του συμπληρώνει και το γεγονός ότι, κατά την παραγωγή του, χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες πρώτων υλών που δύσκολα ανανεώνονται.

Κατά την παραγωγή σκυροδέματος δεν εκπέμπονται σημαντικές ποσότητες CO₂, αλλά η παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας και κατά συνέπεια και την δημιουργία CO₂. Για κάθε 1 τόνο τσιμέντου που παράγεται, οι αντίστοιχες εκπομπές CO₂ ανέρχονται περίπου στους 0,90 τόνους. Τα ποσοστά CO₂ που εκπέμπονται από τις υπόλοιπες διεργασίες για την παραγωγή τσιμέντου, όπως είναι η εξόρυξη και η μεταφορά των πρώτων υλών, είναι σχετικά μικρά. Από την άλλη, το τσιμέντο που περιέχεται στο σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ του 7,00 – 15,00 % του βάρους του σκυροδέματος, ανάλογα βέβαια με τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος. Η μέση χρησιμοποιούμενη ποσότητα τσιμέντου στο σκυρόδεμα είναι περίπου 250,00 kg/m³. Ένα κυβικό μέτρο (m³) σκυροδέματος ζυγίζει κατά προσέγγιση 2.400,00 kg. Κατά συνέπεια, περίπου 100,00 – 300,00 kg CO₂ ενσωματώνονται σε κάθε m³ σκυροδέματος που παράγεται ή περίπου το 5,00–13,00 % του βάρους του παραγόμενου σκυροδέματος αντιστοιχεί στο ενσωματωμένο CO₂, αναλόγως με την σύνθεση του μίγματος. Σε 1 τόνο δηλαδή σκυροδέματος, αντιστοιχούν εκπομπές CO₂ που κυμαίνονται από 0,05–0,13 τόνους.

Δεδομένης της τιμής της ενσωματωμένης ενέργειας κατά την παραγωγή του σκυροδέματος αλλά και των ανυπολόγιστων ποσοτήτων σκυροδέματος που απορρίπτονται, η ανάγκη για ανακύκλωση καθίσταται αυξανόμενη. Ο διαχωρισμός, όμως, του οπλισμού από το σκυρόδεμα αποτελεί μεν εφικτή αλλά και χρονοβόρα διαδικασία. Επιπλέον, τόσο τα αυτοφερόμενα αλλά και τα μόνιμα συγκροτήματα ανακύκλωσης μειώνουν το κόστος κατασκευής και την ατμοσφαιρική ρύπανση μεταφοράς των υλικών από το έργο στο λατομείο και αντίστροφα. Το συγκριτικά χαμηλό κόστος τους δύναται να αποσβεστεί σε ένα μεγάλο έργο. Τέλος, πλεονεκτήματα της ανακύκλωσης είναι η εξοικονόμηση των εξόδων μεταφοράς των δομικών αποβλήτων στους χώρους ενταφιασμού και μεταφοράς αδρανών στο εργοτάξιο και η μείωση των «νεκρών» χρόνων του έργου.

Το σκυρόδεμα, όπως και όλα τα δομικά υλικά, απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή του και κατ' επέκταση παρατηρούνται οι αντίστοιχες εκπομπές CO₂. Το ποσό όμως της εκπεμπόμενης ποσότητας CO₂ που προκύπτει από την παραγωγική διαδικασία του σκυροδέματος, είναι σχετικά μικρό σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ποσά CO₂ που εκπέμπονται από την παραγωγική διαδικασία άλλων δομικών υλικών και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως είναι η θέρμανση και η ψύξη των κατοικιών και η χρήση των αυτοκινήτων. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το σκυρόδεμα το καθιστούν μία επιλογή για την κατασκευή έργων, φιλική προς το περιβάλλον και αποτελεί δομικό υλικό με ένα από τα χαμηλότερα αποτυπώματα άνθρακα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

- ACI Committee E – 701, (2007), «*Aggregates For Concrete*», American Concrete Institute, U.S.A..
- BioCycle, (1999), «*Waterbury, Vermont: Waste Prevention Projects Receive State Grants*», Biocycle, vol 41, no. 7, pp. 24-25,
- BioCycle, (2000), «*San Jose California, Deposit Would Insure C&D Debris Recycling*», BioCycle, vol. 41, no. 2, p. 27.
- Blasing, T.J., (2010), «*Recent Greenhouse Gas Concentrations*», Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC).
- Brickner, R.H. (1997), «*Overview of C & D Debris Recycling Plants*», C & D Debris Recycling, January/ February.
- Corneliu B., Dencsak T., Balcu I., (2011). *Sustainability Of RC Structures*. fib Symposium Prague.
- Dorsthorst B. te & Kowalczyk T., (2000), «*State of the art Deconstruction in the Netherlands*», Overview of Deconstruction in Selected Countries, CIB report Publication 252 (95-143), University of Florida, USA.
- Eco Efficiency, (2009). *Εναλλακτική Διαχείριση Των Αποβλήτων Από Εκσκαφές, Κατασκευές Και Κατεδαφίσεις (Α.Ε.Κ.Κ.)*. Αθήνα.
- Environmental Technologies Action Plan, (2007), «*The Carbon Trust Helps UK Business Reduce their Environmental Impact*», Press Release.
- European Commission, (2001), «*Integrated Pollution Prevention And Control (IPPC) Reference Document On Best Available Techiques In The Cement And Lime Manufacturing Industries*», European Commission – Joint Research Centre, Institute For Environment and Sustainability.
- European Commission, (2007), «*CARBON FOOTPRINT – What Is And How To Measure It. European Platform On Life Cycle Assessment*», European Commission – Joint Research Centre, Institute For Environment and Sustainability.
- Fricker A., (1998), «*Measuring up to sustainability*», Futures, vol. 30, no. 4, pp. 367–375.
- Fuglestvedt J.S., Berntsen T.K., Godal O., Sausen K.P., Skodvin T., (2003), «*Metrics of Climate Change: Assessing Radiative Forcing and Emission Indices*», Climatic Change, 58: 267-331.
- Gartner E., (2004), «*Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements*», Cement Concrete Researches, vol 34, pp 1489-1498.
- Glenn J., (1999), «*The stage of Garbage in America*», Biocycle, vol. 40, no. 4, pp. 60-71.
- Glenn J., Riggle D., (1998), «*Where does the waste go*», BioCycle, vol. 30, no. 4, pp. 34-39,
- Global Footprint Network, (2007), «*Ecological Footprint Glossary*», Global Footprint Network, Oakland, CA, USA.
- Goldstein G., (1999), «*Waste Not, Want No, Architecture*», vol. 88, no. 3, p. 131.
- Hammond, G. P., Jones C. I. , (2008), «*Inventory of Carbon and Energy (ICE)*», Version 1.6a', University of Bath.
- Hirschi T., Knauber H., Lanz M., Schlumpf J., Schrabach J., Spring C., Waeber U., (2007), «*Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος*», Sika.

- International Panel on Climate Change, (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 4th Assessment Report (AR4)*. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, N.Y., U.S.A.
- Khanna P., Ram Babu P., Suju George M., (1999), «*Carrying capacity as a basis for sustainable development: A case study of National Capital Region in India*», *Progress in Planning*, vol. 52, pp 101-166.
- Malla S., (2009), «*CO₂ emissions from electricity generation in seven Asia-Pacific and North American countries: A decomposition analysis*», *Energy Policy*, 37: 1-9.
- National Ready Mixed Concrete Association, (2008). *Concrete CO₂ Fact Sheet*. NRMCA Publication number 2PCO2.
- Obla K.H., (2009). *What Is Green Concrete?*. Concrete in focus magazine.
- Parliament Office of Science and Technology, (2006), «*Carbon footprint of electricity generation*», POSTnote 268, October 2006, London UK.
- Parrott, L., (2002), «*A report on the Progress of the UK Cement and Concrete Industry towards Sustainability*», British Cement association, Pages 1-17.
- Quadrelli R., Peterson S., (2007), «*The Energy – Climate Challenge: Recent Trends In CO₂ Emissions From Fuel Combustion*», *Energy Policy*, 35: 5938 – 5952.
- Struble L., Godfrey J., (2002), «*International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*», pages 201-211, 2002.
- Tchobanoglous, G., H Theisen, and S. A. Vigil, (1993), «*Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*», McGraw-Hill, New York.
- Torben C. H., (2002), «*Demolition and Reuse of Concrete*», Recycling of demolished concrete and masonry, Report of Technical Committee 37-DRC.
- U.S. Department of transportation, (2007), «*Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: a State – of – the – Practice Manual* », U.S. Department of transportation, Washington.
- U.S. EPA, (1998), «*Characterization of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States*», EPA/530-R-98-010, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC,
- Wackernagel M. Rees W., (1996), «*Our ecological Footprint – Reducing Human Impact on the Earth*». New Society Publishers Gabriola Island, B.C., Canada.
- Wackernagel M., Kitzes J., Moran D., Goldfinger S., Thomas M., (2006), «*The Ecological Footprint of cities and regions: comparing resource availability with resource demand*», *Environment and Urbanization*, vol. 18, no. 1. 103-112.
- Wiedmann T., Minx J., (2007), «*A Definition of ‘Carbon Footprint’*», United Kingdom.
- Αλαβέρας Π., Παπαχρήστου Ε., (1999), «*Μέθοδοι για τον προσδιορισμό της ποσότητας κατασκευαστικών και οικοδομικών απορριμμάτων στην Ελλάδα*», Πρακτικά συνεδρίου HELECO.
- Γιάμα Ε., (2009), «*Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Για Την Ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Αξιολόγηση Κτιρίων Στην Ελλάδα*», Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ., Τμήμα Μηχανολόγων, Θεσσαλονίκη.

- ΔΕΗ, (2009), «Περιβάλλον, ο κόσμος μας!, Η ΔΕΗ στο δρόμο της Βιώσιμης Ανάπτυξης», Περιβαλλοντική Έκθεση, Αθήνα.
- Εμπορικό και Βιομηχανικό Επιμελητήριο Αθηνών, (2010). *Καλές Πρακτικές Σε Τομείς Που Βοηθούν Ή Συμβάλλουν Στην Ελαχιστοποίηση Των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Από Τη Λειτουργία Των Μικρομεσαίων Επιχειρήσεων*. Αθήνα.
- Εγχειρίδιο Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος, (2010), Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα.
- Εφραμίδης Χ., (2008), «Παραγωγή αδρανών υλικών από ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, Αθήνα.
- *Η Οδηγία 96/61/ΕΚ Για Την Ολοκληρωμένη Πρόληψη Και Έλεγχο Της Ρύπανσης (IPPC) Και Οι Ελληνικές Προτάσεις Για Τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές – Μη Μεταλλικά Ορυκτά*. (2001), Αθήνα.
- Καβουρίδης Κ.Β., Χαλούλος Κ., Λεοντίδης Μ., Ρούμπος Χ., (2005), «Η εκμετάλλευση του λιγνίτη στην Ελλάδα με οικονομικά και περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια», Δημερίδα «Λιγνίτης και φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ), 9-10 Ιουνίου 2005, Αθήνα.
- Καλκάνης Γ., Χατήρης Ι., Σταθουπούλου Χ., (2004), «Τεχνολογία Των Δομικών Υλικών», Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
- Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 1997, Αθήνα.
- Κεχαγιά Φ., Obbliger M., Τσώχος Γ., (2008), «Χημικά Πρόσμικτα Σκυροδέματος», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Κορωναίος Α., Πουλάκος Γ., (2006), «Τεχνικά Υλικά, Τόμος 1», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Κορωναίος Α., Σαργέντης Φ., (2005), «Δομικά Υλικά Και Οικολογία», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Κούγκολος Α., (2007), «Εισαγωγή Στην Περιβαλλοντική Μηχανική», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Λεγάκης Α., (1997), «Τεχνολογία Δομικών Υλικών», Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα.
- Μάτκαρης Πέτρος, (2009), «Εγχρωμο Σκυρόδεμα», Πτυχιακή εργασία, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Έργων Υποδομής, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Μιγάλης Π., Δημητρίου Σ., (2007), «Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος», Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Τομέας Τεχνικών έργων, Θεσσαλονίκη.
- Μοροπούλου Α., (2007), «Ενεργειακή Αποδοτικότητα στο Σχεδιασμό την Κατασκευή και την Λειτουργία ενός Κτηρίου», Ημερίδα ΚΑΠΕ.
- Μουσιόπουλος Ν., Ιακώβου Ε., Παπαδόπουλος Α., Αχίλλας Χ., Αηδόνης Δ., Αναστασέλος Δ., Μπανιάς Γ., (2008α) «Αξιοποίηση Αποβλήτων Εκσκαφών Κατασκευών Και Κατεδαφίσεων», Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Μουσιόπουλος Ν., Ιακώβου Ε., Παπαδόπουλος Α., Αχίλλας Χ., Αηδόνης Δ., Αναστασέλος Δ., Μπανιάς Γ., (2008β), «Εφαρμογές Επαναχρησιμοποίησης Και Ανακύκλωσης Δομικών Υλικών Στο Τέλος Της Ωφέλιμης Τους Ζωής», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.

- Μπανιάς Γ., Μουσιόπουλος Ν., Αχίλλας Χ., Βλαχοκόστας Χ.. *Διαχείριση Αποβλήτων Από Την Κατασκευαστική Δραστηριότητα Στην Κεντρική Μακεδονία Με Τη Χρήση Διαδικτυακής Εφαρμογής*. Θεσσαλονίκη, Α.Π.Θ..
- Νουσιοπούλου Θ., (2010), «*Βέλτιστες Τεχνικές Αντιρρύπανσης (IPPC) Στις Βιομηχανίες Και Εφαρμογή Σε Τσιμεντοβιομηχανία*», Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Νταφαλιάς Ε., (2009), «*Έλεγχος Υδατοπερατότητας Τσιμέντου*». Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα.
- Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, (1999), «*Τεχνολογία Δομικών Υλικών*», Υ.Ε.Π.Θ., Αθήνα.
- Τσακαλάκης Κ., (2010), «*Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου Και Σκυροδέματος*», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., (2010), «*Επιστήμη Και Τεχνολογία Τσιμέντου*», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- <http://bp.com/liveassets> [Πρόσβαση Αύγουστος 2011]
- <http://www.controls.it>. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- <http://www.diaamath.gr/?p=72>. [Πρόσβαση Αύγουστος 2011]
- <http://www.ecologicalfootprint.org/>. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- <http://www.eds.gr>. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- <http://www.eedsa.gr>. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- <http://www.ele.com> [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- www.helma.gr. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- <http://www.hcia.gr>. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- <http://www.nl-test.com>. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- www.ntua.gr [Πρόσβαση Ιούλιος 2011].
- <http://pavementinteractive.org>. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- www.sika.gr. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- www.tee.gr [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- www.teicrete.gr. [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]
- <http://timeforchange.org/CO2-cause-of-global-warming> [Πρόσβαση Αύγουστος 2011]
- www.titan.gr [Πρόσβαση Ιούλιος 2011].
- http://www.titan.gr/userfiles/File/csr2010/CSR_GR.pdf [Πρόσβαση Ιούλιος 2011].
- www.wwf.com [Πρόσβαση Ιούλιος 2011]