

Ενεργειακή και περιβαλλοντική θεώρηση των διεργασιών παραγωγής τσιμέντου και χρήσης του σκυροδέματος.

Περίληψη.

Το σκυροδέμα είναι το κυριώτερο δομικό στοιχείο των σύγχρονων κατασκευών. Οι ιδιότητές του, που είναι αποτέλεσμα των πρώτων υλών από τις οποίες παράγεται αλλά και των μεθόδων με τις οποίες παρασκευάζεται και χρησιμοποιείται (διαστρώνεται), είναι παράγοντες ουσιαστικής σημασίας για την ποιότητα και την αντοχή των κατασκευών. Η χρήση, επίσης, του κατάλληλου σιδηροπλισμού, εξασφαλίζει στο οπλισμένο σκυροδέμα, τις ιδιότητες εκείνες, που του επιτρέπουν να ανθίσταται ικανοποιητικά στις καταπονήσεις που επιβάλλουν τα φυσικά φαινόμενα (π.χ. σεισμοί), αλλά και το περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιείται (θάλασσα, γέφυρες, φράγματα, δονήσεις, μηχανικές και στατικές καταπονήσεις κλπ.).

Στην Ελλάδα, σήμερα, εξορύσσονται εκατομμύρια κυβικά μέτρα πετρωμάτων και μεταλλευμάτων κατ'έτος, που αποτελούν τις πρώτες ύλες στην παραγωγή ενδιάμεσων προϊόντων (τσιμέντα διαφόρων τύπων), αλλά και αδρανή υλικά, για την παραγωγή του σκυροδέματος (τελικό προϊόν).

Με την παραγωγή του τσιμέντου και την εξόρυξη των αδρανών υλικών, που αποτελούν βιομηχανικά και περιβαλλοντικά εντατικές δραστηριότητες, επιβαρύνεται σημαντικά αλλά και αναπόφευκτα το περιβάλλον.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η καταγραφή των περιβαλλοντικών προβλημάτων, που έχουν σχέση με το ολοκληρωμένο κύκλωμα παραγωγής του σκυροδέματος, αλλά και οι ενεργειακές καταναλώσεις στις διαδικασίες παραγωγής του. Γίνονται επίσης προτάσεις αντιμετώπισης και μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Εισαγωγή.

Ως γνωστόν, τα βασικά συστατικά του σκυροδέματος, είναι:

1. Το τσιμέντο Πόρτλαντ,

2. Η άμμος,
3. Τα χονδρομερή αδρανή,
4. Το νερό,
5. Ο αέρας.

Η κατά βάρος συμμετοχή των παραπάνω υλικών στην παρασκευή του σκυροδέματος, δίδεται στον Πίνακα 1.

1. Τσιμέντο.

Συστατικό	Βάρος, %
Τσιμέντο Πόρτλαντ	12
Άμμος	34
Χονδρομερή αδρανή	48
Νερό	6
Αέρας	-
Σύνολο	100

Πίνακας 1. Τυπική κατά βάρος % σύνθεση σκυροδέματος [Table 1. Typical Concrete Mix]

Το τσιμέντο είναι το βασικό συστατικό στα προϊόντα σκυροδέματος και δρά σε ανάμειξη με το νερό, ως συνδετική ουσία των, παντός είδους, αδρανών στο σκυροδέμα.

Το τσιμέντο Πόρτλαντ, αντιπροσωπεύει το 95 %, περίπου, των παραγόμενων παγκοσμίως ειδών τσιμέντου. Για την παραγωγή του, απαιτεί τις παρακάτω πρώτες ύλες:

1. Αοβεστόλιθο (πηγή οξειδίου του αοβεστίου)
2. Αργιλικά πετρώματα (π.χ σχιστόλιθος) και χαλαζιακή άμμο (πηγές τριοξειδίου του αργιλίου και διοξειδίου του πυριτίου) ή
3. Σιδηρομετάλλευμα (πηγή οξειδίου του σιδήρου),
4. Βωξίτη (πηγή αλουμίνας και διοξειδίου του πυριτίου) σε ειδικού τύπου τσιμέντα.

Από την εγχώρια τσιμεντοβιομηχανία, απορροφώνται και ικανές ποσότητες σκυριών ηλεκτροκαμίνων από την παραγωγή σιδηροκυκλίου (π.χ. περίπου 250.000 tn ετησίως από την ΛΑΡΚΟ Α.Ε.), σκουριά από σιδηρο-

πυρίτη, από τις βιομηχανίες λιπασμάτων και, περίπου, 150.000 tn φωσφογύψος. Η χρησιμοποίηση των μεταλλουργικών σκυριών στην τσιμεντοβιομηχανία, είναι εφικτή λόγω των ευνοϊκών ορυκτολογικών χαρακτηριστικών τους (περιεχόμενα οξειδία απαραίτητα στην τσιμεντοβιομηχανία)[6], ταυτόχρονα όμως, συμβάλλει θετικά στο πρόβλημα που δημιουργείται από την απόθεσή της στη θάλασσα.

Το διάγραμμα ροής της παραγωγής τσιμέντου, φαίνεται στο Σχήμα 1.

Για την παραγωγή 1 tn τσιμέντου απαιτούνται περίπου 1,6 tn πρώτων υλών.

Οι παραπάνω πρώτες ύλες, θραυνώνονται και λειοτριβούνται λεπτομερώς, αναμειγνύονται για ομογενοποίηση και τροφοδοτούνται σε περιστροφική κάμνο, όπου οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, φθάνουν βαθμιαία, κατά μήκος της καμίνου, τους 1480°C. Η κάμνος περιστρέφεται με χαμηλή ταχύτητα για να εξασφαλίζεται πλήρης ανάμειξη των λεπτομερών πρώτων υλών και λαμβάνουν χώραν χημικές και φυσικές μετατροπές στις πρώτες ύλες, ώστε τα προϊόντα που προκύπτουν, να αντιδρούν μεταξύ τους κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου. Οι διαδικασίες αυτές, γίνονται κυρίως εν ξηρώ (στο 70 % των σύγχρονων εγκαταστάσεων παραγωγής τσιμέντου) είτε εν υγρώ, στις παλαιότερου τύπου εγκαταστάσεις.

Η πρώτη αντίδραση που γίνεται, είναι η *πύρωση* του αοβεστόλιθου (CaCO₃) δηλ. η μετατροπή του σε οξείδιο του αοβεστίου (CaO), σε θερμοκρασιακές περιοχές, περίπου, 600-900°C. Η δεύτερη αντίδραση που γίνεται, είναι η αντίδραση σχηματισμού από το οξείδιο του αοβεστίου και τις πυριτικές ενώσεις πυριτικού διαοβέσσιου και πυριτικού τριαοβέσσιου. Επίσης, σχηματίζονται μικρές ποσότητες αργλικού τριαοβέσσιου και αλουμινοσιδηρούχου τετραοβέσσιου. Οι αναλογίες μεταξύ των τεσσάρων ενώ-

του
Κ. Γ. Τσακαλάκη
αναπλ. καθηγητή
Τμ. Μηχανικών
Μεταλλείων
Μεταλλουργιών
Ε.Μ.Π.

σεων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθορίζουν τις ιδιότητες του τοιμέντου που προκύπτει και την ταξινόμησή του σε τύπο I, τύπο II, κλπ.

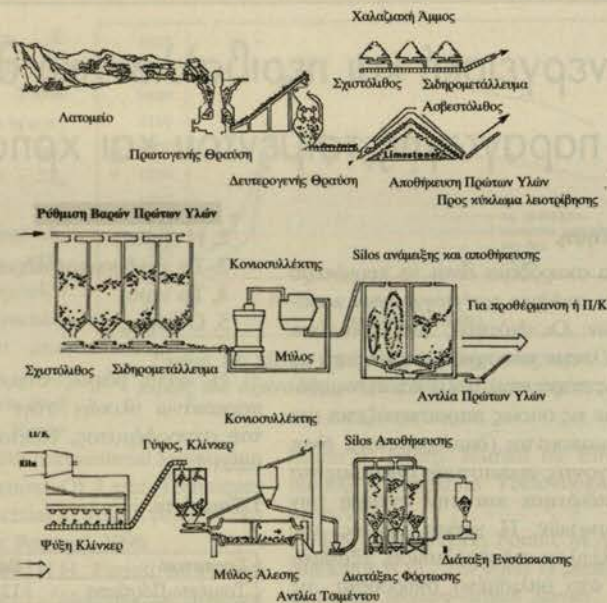
Οι αντιδράσεις σχηματισμού των παραπάνω ενώσεων, γίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ενώ τα συστατικά βρίσκονται σε μορφή τήγματος. Με την ψύξη του παραπάνω υλικού, στερεοποιούνται και σχηματίζεται, λόγω της περιστροφής, ένα υλικό σε μορφή σφαιριδίων (pellets), που καλείται να ψυχθεί και κατόπιν, αλέθεται μαζί με μικρή ποσότητα γύψου (5% κατά βάρος περίπου) και το τελικό προϊόν είναι το τοιμέντο, που ενσωματώνεται ή τροφοδοτείται χύδην, στις μονάδες παραγωγής σκυροδέματος.

2. Σκυροδέμα.

Το σκυροδέμα, παράγεται όπως αναφέρθηκε, με την ανάμιξη τοιμέντου, άμμου, χονδρομερών αδρανών, νερού (Πίνακας 1) και επίσης, μικρών ποσοτήτων χημικών πρόσθετων (admixtures or additives), που επιβραδύνουν ή επιταχύνουν τον χρόνο πήξης και σκλήρυνσης και ελέγχουν την πλαστικότητα (ιξώδες) του σκυροδέματος. Η διαδικασία της πήξης και σκλήρυνσης είναι χημική αντίδραση που καλείται ενυδάτωση και αρχίζει με την προσθήκη του νερού. Με την προσθήκη του νερού στο τοιμέντο, σχηματίζεται ένας πολφός (σιμεντόπαστα), η οποία επικαλύπτει τις επιφάνειες των αδρανών και γεμίζει τα κενά μεταξύ τους και έτσι, αρχίζει να σχηματίζεται το στερεό σκυροδέμα. Η γύψος ελέγχει τον ρυθμό πήξης της σιμεντόπαστας.

Οι ιδιότητες του σκυροδέματος, εξαρτώνται από τον τύπο του τοιμέντου που χρησιμοποιείται, από τα πρόσθετα και από τις αναλογίες μεταξύ τοιμέντου, αδρανών και νερού.

Ο ρυθμός σκλήρυνσης του σκυροδέματος, ελέγχεται λόγω της προσθήκης της γύψος κατά τη λειτουργία του clinker. Οι διαφορετικοί τύποι τοιμέντου, παρουσιάζουν διαφορετικούς χρόνους πήξης και επίσης, τα πρόσθετα στο σκυροδέμα, επιταχύνουν ή επιβραδύνουν την πήξη. Η εξωτερική θερμοκρασία (περιβάλλοντος), επιδρά στην ταχύτητα πήξης. Επειδή όμως η ενυδάτωση είναι εξώθερμη αντίδραση, αυτό επιδρά θετικά στην διάσπρωση του σκυ-



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής διαδικασιών παραγωγής τοιμέντου

ροδέματος, τους χειμερινούς μήνες.

Ο αρχικός ρυθμός της αντίδρασης ενυδάτωσης, πρέπει να είναι αρκετά αργός, ώστε να επιτρέπει στους εργαζόμενους, την διάσπρωση και την εμφανειακή κατεργασία (εξομάλυνση) στο εργοτάξιο. Αυτή η διεργασία, ελέγχεται επίσης, από τα χημικά πρόσθετα (admixtures).

Αν και ο αυξημένος ρυθμός απόκτησης της αντοχής του σκυροδέματος συμβαίνει τις πρώτες ημέρες μετά τη διάσπρωση, παρουσία της υγρασίας του περιβάλλοντος, συνεχίζεται η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος για χρόνια, επειδή συντηρείται δηλ. συνεχίζεται η αντίδραση της ενυδάτωσης. Μια από τις μεγάλες προόδους στην τεχνολογία παραγωγής σκυροδέματος, αποτέλεσε η ενσωμάτωση (εγκλεισμός) φυσσαλίδων αέρα, που δρουν ως θάλαμοι εκτόνωσης, όταν η υγρασία του σκυροδέματος μετατρέπεται σε πάγο, που προκαλεί διάγνωση. Οι φυσσαλίδες, αναλαμβάνουν τις τάσεις, που σε διαφορετική περίπτωση, θα προκαλούσαν διάρρηξη του σκυροδέματος, κατά την τήξη του πάγου.

3. Ενέργεια.

- *Ενεργειακή κατανάλωση.*

Η κατανάλωση ενέργειας, είναι το σπουδαιότερο περιβαλλοντικό πρόβλη-

μα, στην παραγωγή τοιμέντου και σκυροδέματος, επειδή η παραγωγή τοιμέντου είναι μια από τις πιο ενεργοβόρες βιομηχανικές δραστηριότητες και κατά συνέπεια και στο σκυροδέμα, ως δευτερογενές προϊόν, ενσωματώνονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Είναι γνωστό (Πίνακας 2) ότι, συμπεριλαμβανομένης και της κατανάλωσης πετρελαίου, στην εξόρυξη και μεταφορά των πρώτων υλών, η παραγωγή του τοιμέντου, απαιτεί περίπου 5,2 εκκατ. Btus ή περίπου 1528 kWh ανά τόνο παραγόμενο τοιμέντο. (Πίνακας 2). Η ποσοστιαία (%) κατανομή ενέργειας και το είδος των χρησιμοποιούμενων καυσίμων στις τοιμεντοβιομηχανίες των Η.Π.Α., δίδεται στον Πίνακα 2.

Η παραπάνω τιμή κατανάλωσης ενέργειας / τον τοιμέντο, πριν από 25 χρόνια, ήταν περίπου 1,8 MWh/tn τοιμέντο κατά τον Neville (1981), για ξηρή μέθοδο παραγωγής τοιμέντου (Dry process).

Η ισχυρή εξάρτηση όμως, όπως φαίνεται από τον άνθρακα (68.95%), έχει ως αποτέλεσμα, υψηλά επίπεδα εκπομπών CO₂, οξειδίων του αζώτου, θείου και άλλων ρυπαντών. Σημαντικό ποσοστό της απαιτούμενης ενέργειας (≈ 15/2 = 7.5%), προέρχεται επίσης από ηλεκτρική ενέργεια (Πίνακας 2).

Η μεγαλύτερη ποσότητα της ενέ-

γεια, που καταναλώνεται στην παραγωγή τοιμέntου, χρησιμοποιείται για τη λειτουργία της περιστροφικής καμίνου.

• Απορρίμματα ως καύσιμα.

Στον Πίνακα 2, φαίνεται ότι, στις Η.Π.Α. σήμερα, το 5% περίπου, της απαιτούμενης ενέργειας στην παραγωγή τοιμέntου, προέρχεται από την καύση απορριμμάτων. Τα χρησιμοποιούμενα ως καύσιμα απορρίμματα, είναι υλικά με θερμογόνο δύναμη, που είναι συμβατά με τις διεργασίες παραγωγής τοιμέntου. Τα περισσότερα απορρίμματα που καίγονται στη βιομηχανία τοιμέntου, είναι εκείνα που παράγονται από τις βιομηχανίες παραγωγής αγαθών καθημερινής χρήσης και προσφέρονται χωρίς επιβάρυνση. Τα είδη των ανακυκλιζόμενων υλικών, είναι:

1. Άχρηστα ελαστικά αυτοκινήτων,
2. Χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια,
3. Διαλυτικά χρωμάτων και υπολείμματα χρωμάτων,
4. Διαλύτες στεγνού καθαρισμού ενδυμάτων,
5. Λάσπη των διεργασιών διύλισης πετρελαίου,
6. Διλύτες και μελάνια εκτύπωσης εφημερίδων και περιοδικών,
7. Διαλύτες ανακύκλωσης χαρτιού,
8. Απόβλητα γεωργικών βιομηχανιών (τούφλια ξηρών καρπών, κοκκώδη ροδακίνων, κλπ.).

Η καύση των «άχρηστων» απορριμμάτων, δεν επηρεάζει ουσιαστικά την ποιότητα του τοιμέntου και ταυτόχρονα, απαλλάσσει το περιβάλλον από άχρηστα και βλαβερά (όταν αποτεθούν) υλικά. Το τελικό προϊόν, δεν περιέχει τοξικές οργανικές ενώσεις από την καύση των απορριμμάτων. Οι μονάδες παραγωγής τοιμέntου, συμβάλλουν θετικά στην περιβαλλοντική διαχείριση των «άχρηστων» απορριμμάτων, ενώ παράλληλα, εκμεταλλεύονται το θερμικό δυναμικό τους, στην παραγωγή ενέργειας και τελικά, στην παραγωγή χρήσιμου υλικού, του τοιμέntου.

Η υψηλή θερμοκρασία της φλόγας μέσα στην περιστροφική κάμνο ($\approx 1870^{\circ}\text{C}$) και η μεγάλη διάρκεια καύσης, προκαλεί ολοκληρωτική καταστροφή των άχρηστων υλικών. Η Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας

Είδος Καύσιμου	Ενέργεια/ tn τοιμέntου		Ενέργεια %
	Btusx10 ³	kwh	
Προϊόντα πετρελαίου (diesel, βενζίνη κλπ.)	69.5	20,36	1.23
Φυσικό αέριο	524.8	153.8	9.31
Άνθρακας & κωκ	3885.3	1138.4	68.95
Καύσιμο από απόβλητα ¹	315.3	92.4	5.60
Ηλεκτρική ενέργεια ²	840.2	246.2	14,91
Σύνολο	5215 + 420.1	1527.9 + 123.1	100

Πίνακας 2. Είδος καυσίμου και θερμική ενέργεια για την παραγωγή 1 ton τοιμέntου (κατά P.C.A.)

[Table 2. Fuel Use for 1 tn Cement Production (after P.C.A.)]

¹ Καύσιμο από απόβλητα που έχουν θερμικό δυναμικό (ορυκτέλαια, διαλύτες, άχρηστα ελαστικά αυτοκινήτων κλπ.)

² Ως ηλεκτρική ενέργεια εδώ, θεωρείται το θερμικό δυναμικό (θερμογόνος δύναμη) της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρείται ότι είναι διπλάσιο του πραγματικού αποδιδόμενου μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας ($2 \times 420.1 \times 10^3 \text{ Btus} = 2 \times 123.1 \text{ kwh}$, δηλ. απόδοση 50%).

Περιβάλλοντος (E.P.A.), απαιτεί απόδοση 99,99% (καταστροφή ή εξουδετέρωση) στους αποτεφρωτές και τις άλλες μονάδες επεξεργασίας βλαβερών αποβλήτων, πράγμα που επιτυγχάνεται εύκολα, στις περιστροφικές καμίνους, με ταυτόχρονη όμως, ανάκτηση ενέργειας.

Τα ανακυκλιζόμενα οργανικά απόβλητα, καίγονται ως καύσιμα και τα συνοδεύονται ανόργανα (π.χ. μεταλλική ενίσχυση ελαστικών) είτε δεσμεύονται στο κρυσταλλικό πλέγμα του τοιμέntου είτε ανευρίσκονται στο τέλος, στη σκόνη (παραπροϊόν) της περιστροφικής καμίνου, η οποία διαχειρί-

ζεται σχετικώς ανώδυνα για το περιβάλλον. Είναι γνωστό ότι, για ίδιο βάρος καυσίμου π.χ. ελαστικού αυτοκινήτων και άνθρακα, το ελαστικό έχει πολύ μεγαλύτερο θερμικό δυναμικό.

Η διαδικασία παραγωγής τοιμέntου, πρέπει να υπακούει στις αυστηρές προδιαγραφές εκπομπών αερίων και σκόνης στην ατμόσφαιρα και η χρήση απορριμμάτων ως καυσίμων, δεν αλλάζει ουσιαστικά το είδος των εκπομπών αυτών και συντελεί, μεταξύ άλλων, και στην υποκατάσταση ικανών ποσοτήτων ορυκτών ανθράκων (άνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο) που τα αποθέματά τους είναι πεπερασμένα.

Υλικό	Κατά βάρος, %	Btus/tn πρώτης ύλης		Ενέργεια / m ³ σκυροδέματος		Βάρος πρώτων υλών σε tn/m ³ σκυροδέματος	Ενέργεια, %
		Πρώτες ύλες	Μεταφορά	Btus	kwh		
Τσιμέντο	12	5215x10 ³	555678	1716200	502.8	0,2974	91.0
Άμμος	34	5513	40794	39018,3	11.43	0,8426	2.07
Χονδρομερή αδρανή	48	51455	58434,4	130724,4	38,3	1,1896	6.93
Νερό	6	0	0	0	0	0,1487	0
Αέρας	-	0	0	0	0	0	0
Σκυροδέμα	100	760982.4		1885942.7	552.53	2,4783 tn/m ³	100

Πίνακας 3. Ενέργεια στη διαδικασία παραγωγής τοιμέntου και σκυροδέματος. [Table 3. Embodied Energy for Cement and Concrete Production]

Στην παραγωγή τοιμέντου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν, επίσης, και απορρίμματα (π.χ σκυροδέματα από καταδαφίσεις), που περιέχουν ικανές ποσότητες τοιμέντου.

Στον Πίνακα 3, δίδεται η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας ανά τόνο τοιμέντου και επίσης, γίνεται αναγωγή της ενέργειας ανά m^3 σκυροδέματος, σύμφωνα με τις κατά βάρος αναλογίες πρώτων υλών, μέσα στο σκυροδέμα. Η μεθοδολογία υπολογισμού των αναγκαίων πρώτων υλών, επεξηγείται παρακάτω.

Από τον Πίνακα, διαπιστώνεται ότι η ενσωματωμένη ενέργεια ανά m^3 σκυροδέματος, οφείλεται κατά 91.0% στην ενέργεια που χρειάστηκε στην παραγωγή του περιεχομένου τοιμέντου (εξόρυξη πρώτων υλών, μεταφορά, θραύση, λειοτρίβηση, περιστροφική κάμινος, άλεση του κλίνκερ κλπ.) και μόνο το 9% στα αδρανή υλικά του σκυροδέματος.

Το δεδομένο σκυροδέμα και οι ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή του, υπολογίστηκαν με τα παρακάτω δεδομένα και υποθέσεις:

1. Οι υπολογισμοί της απαιτούμενης ενέργειας, βασίστηκαν σε διαγράμματα της Portland Cement Association (P.C.A.) και σε δεδομένα του έτους 1990.

2. Οι ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή και μεταφορά, βασίστηκαν, επίσης, σε δεδομένα της P.C.A., με τις παρακάτω υποθέσεις:

- Μεταφορά του τοιμέντου σε απόσταση περίπου 80 km, στη μονάδα παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος.

- Τα αδρανή μεταφέρονται σε απόσταση 18 km, στη μονάδα παραγωγής σκυροδέματος.

- Το έτοιμο σκυροδέμα μεταφέρεται, από τη μονάδα παραγωγής σκυροδέματος 9 km, στη θέση κατασκευής του έργου.

- Οι αναλογίες πρώτων υλών για την παρασκευή $1 m^3$ σκυροδέματος, υπολογίστηκαν από την γνωστή σχέση (εξίσωση 1) και από την κατά βάρος σύσταση πρώτων υλών, που δίδονται στον Πίνακα 1, που αποτελεί υπόθεση για το δεδομένο σκυροδέμα:

$$\frac{W}{1000} + \frac{C}{1000 \cdot \rho_c} + \frac{B_1}{1000 \cdot \rho_1} + \frac{B_2}{1000 \cdot \rho_2} = 1 m^3 \text{ σκυροδέματος} \quad (1)$$

όπου :

W , είναι το βάρος σε kg (ή lt) του προστιθέμενου νερού / m^3 σκυροδέματος,

C , είναι το βάρος σε kg του χρησιμοποιούμενου τοιμέντου / m^3 σκυροδέματος,

B_1 , είναι το βάρος σε kg της χρησιμοποιούμενης άμμου / m^3 σκυροδέματος,

B_2 , είναι το βάρος σε kg των χρησιμοποιούμενων χονδρομερών αδρανών / m^3 σκυροδέματος, και

ρ_c = το ειδικό βάρος του τοιμέντου $3,10 \text{ tn}/m^3$,

ρ_1 = το ειδικό βάρος της άμμου $2,69 \text{ tn}/m^3$,

ρ_2 = το ειδικό βάρος των χονδρομερών αδρανών $2,69 \text{ tn}/m^3$.

Έτσι από την εξίσωση (1) προκύπτουν:

$C = 297,4 \text{ kg τοιμέντου}$

$W = 148,7 \text{ kg νερού,}$

$B_1 = 842,6 \text{ kg άμμου και}$

$B_2 = 1189,6 \text{ kg χονδρομερών αδρανών.}$

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι, το βάρος $1 m^3$ σκυροδέματος, είναι: $2478,3 \text{ kg}$ ή το ειδικό του βάρος $2,48 \text{ tn}/m^3$, το οποίο στην πραγματικότητα, είναι μικρότερο, λόγω του αυξημένου όγκου, από τον αέρα που περιέχεται μέσα στο σκυροδέμα.

4. Περιβαλλοντικά προβλήματα στην παραγωγή τοιμέντου και χρήση του σκυροδέματος.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα στις παραπάνω διεργασίες, αναφέρονται στην τοιμεντοβιομηχανία και στις διαδικασίες παραγωγής και χρήσης του σκυροδέματος και είναι κυρίως, επιπτώσεις στο αέριο και υδάτινο περιβάλλον.

Δεν πρέπει βέβαια να παραγνωριστούν τα προβλήματα που υπάρχουν στις διαδικασίες εξόρυξης και μεταφοράς των πρώτων υλών του τοιμέντου και των αδρανών υλικών του σκυροδέματος, όπως επίσης και αυτά που αφορούν στην οπτική ρύπανση, στις δονήσεις και στην καταστροφή των δασών. Είναι σοβαρά προβλήματα, αλλά κατά κοινή αποδοχή, ευκολότερα αντιμετωπίσιμα..

- Πηγές παραγωγής και ποσότητες CO_2 στην τοιμεντοβιομηχανία.

Το φαινόμενο του «θερμοκηπίου»

που προέρχεται από τις εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα (CO_2 , μεθάνιο, όζον, NO_x , προωθητικά αέρια στα σπρέι κλπ.), αναμένεται, σύμφωνα με υπολογισμούς, να προκαλέσει μια αύξηση στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, κατά $1,9$ έως $5,3^\circ C$.

Το πρόβλημα αυτό για να αντιμετωπιστεί, επιβάλλει τον έλεγχο των αερίων εκπομπών στην ατμόσφαιρα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει συστήσει στα μέλη, την εφαρμογή νέας φορολογικής πολιτικής των καυσίμων και της ενέργειας, ώστε οι εκπομπές του CO_2 να περιοριστούν στα επίπεδα του 1990.

Παγκοσμίως, υπολογίζεται ότι, η βιομηχανία τοιμέντου, παράγει $1,6$ δισεκατομμύρια $tn CO_2$, που αντιστοιχεί στο 8% των συνολικών εκπομπών CO_2 , από όλες τις ανθρωπίνες δραστηριότητες.

Είναι λοιπόν υπεύθυνη, για μεγάλες ποσότητες εκπομπών CO_2 στην ατμόσφαιρα.

Οι ανεπτυγμένες χώρες της Δύσης, παράγουν στις τοιμεντοβιομηχανίες τους, πολύ μικρότερες ποσότητες CO_2/tn τοιμέντου, παρά οι αναπτυσσόμενες και είναι φανερό ότι, μια προοπτική μείωσης των παραγόμενων και εκπεμπόμενων ποσοτήτων στις χώρες αυτές, θα είχε ανασταλτικά αποτελέσματα στη βιομηχανία τους.

Οι εκπομπές αυτές προέρχονται:

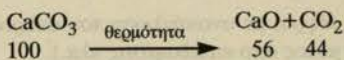
1. Από την μεταλλουργική διεργασία (πύρωση-θερμική διάσπαση) του ανθρακικού ασβεστίου $CaCO_3$ δηλ. της πρώτης ύλης (ασβεστόλιθος) σε CaO και CO_2 μέσα στις περιστροφικές καμίνους των τοιμεντοβιομηχανιών.

2. Από την καύση των ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο, φουίκο αέριο) στην παραγωγή του τοιμέντου.

Από την καύση των ορυκτών καυσίμων, προκύπτουν, σύμφωνα με υπολογισμούς, περίπου $0,63 \text{ tn } CO_2$ ανά tn παραγόμενου τοιμέντου, ενώ από την πύρωση, $0,53 \text{ tn } CO_2/tn$ παραγόμενου τοιμέντου. Συνολικά δηλαδή προκύπτουν, $1,16 \text{ tn } CO_2/tn$ παραγόμενου τοιμέντου.

- Θεωρητικός υπολογισμός των παραγόμενων ποσοτήτων CO_2

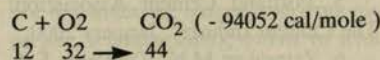
Η πύρωση του $CaCO_3$ γίνεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Είναι γνωστό όμως ότι, για την παραγωγή 1 tn τσιμέντου, απαιτούνται περίπου 1,21 tn ασβεστολίθου (CaCO₃), που σύμφωνα με την παραπάνω αντίδραση, παράγουν :

$$(44/100) \times 1,21 = 0,532 \text{ tn CO}_2$$

Η υπόλοιπη ενέργεια για την παραγωγή του τσιμέντου, προέρχεται, κατά 60 % περίπου, από καύσιμα (στερεά, υγρά και αέρια), τα οποία καίγονται και απελευθερώνουν ενέργεια, σύμφωνα με την εξώθερμη αντίδραση:



Η εκλύομενη αυτή ενέργεια, αντιστοιχεί σε $94052/12 = 7837,7 \text{ cal / g}$ άνθρακα.

Αυτή λοιπόν η ποσότητα ενέργειας εκλύεται από την καύση 1 g άνθρακα.

Οπότε, από τον Πίνακα 2 και από την εξίσωση καύσης του άνθρακα, υπολογίζεται ότι απαιτείται η καύση 0,144 kg άνθρακα/kg τσιμέντου, που αντιστοιχούν σε παραγωγή:

$$0,144 \times (44/12) = 0,528 \text{ kg CO}_2 / \text{kg τσιμέντου.}$$

Και η ηλεκτρική ενέργεια όμως, που χρησιμοποιείται στην παραγωγή τσιμέντου, παράγεται κυρίως, από ορυκτά καύσιμα (εξαερίζεται η περίπλοκη παραγωγή από πυρηνική ενέργεια ή υδατοπτώσεις), άρα συνεισφέρει και αυτή στην παραγωγή και εκπομπή CO₂.

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία, όπως παραπάνω, προκύπτει ότι, για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, καίονται:

$$0,027 \text{ kg άνθρακα/kg τσιμέντου.}$$

Η παραπάνω ποσότητα του άνθρακα, αντιστοιχεί σε παραγωγή:

$$0,027 \times (44/12) = 0,099 \text{ kg CO}_2 / \text{kg τσιμέντου.}$$

Απο τους υπολογισμούς αυτούς και δεδομένου ότι για την παραγωγή 1 m³ του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν 0,2974 tn τσιμέντου, καταστρώνεται ο Πίνακας 4.

- Μέθοδοι ελάττωσης των εκπο-

Πηγές εκπομπών CO ₂ στη βιομηχανία τσιμέντου	kg CO ₂ / tn τσιμέντου	kg CO ₂ / m ³ σκυροδέματος	Ποσοστό % συνολικού CO ₂
CO ₂ από την πύρωση του ασβεστολίθου	532	158,2	45,9
CO ₂ από την παραγωγή ενέργειας από καύσιμα	528	157,2	45,6
CO ₂ από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	99	29,3	8,5
Συνολική παραγωγή CO₂	1159	344,7	100

Πίνακας 4. Παραγωγή CO₂ στις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος (συμπεριλαμβανομένης και της ηλεκτρικής ενέργειας).

[Table.4. CO₂ emissions from Cement and Concrete Production (Electrical Power included)]

μπών CO₂.

1. Ο προσφορώτερος τρόπος ελάττωσης του παραγόμενου CO₂, είναι η αύξηση της αποδοτικότητας στην παραγωγή ενέργειας, μέσα στην περιστροφική κάμμο, κάτι που τα τελευταία χρόνια, διαπιστώνεται ότι είναι εφικτό, η χρησιμοποίηση καυσίμων (φυσικό αέριο, τσόφλια καρπών ροδακίνων, κλπ.), που παράγουν μικρότερες ποσότητες CO₂ και η χρησιμοποίησή για καύση, απορριμμάτων με θερμικό δυναμικό.

2. Μία άλλη πρακτική που μπορεί να εφαρμοστεί, είναι η χρησιμοποίηση στην παραγωγή τσιμέντου αοβέστου (CaO) αντί ασβεστολίθου, που είναι παραπροϊόν άλλων βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

3. Η υποκατάσταση, επίσης, ποσοστού του τσιμέντου στο σκυρόδεμα με ιπτάμενη τέφρα (fly ash), μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στο στόχο αυτό.

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας, που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη στερεά καύσιμα (λιθάνθρακας, λιγνίτης, κλπ.), συμβάλλει θετικά, στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων (πρόβλημα απόθεσης τέφρας) και μειώνει την συνολική κατανάλωση ενέργειας (15% προσθήκη αντί τσιμέντου στο σκυρόδεμα, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση, κατά 13,65% περίπου, της ενέργειας ανά m³ σκυροδέματος, δηλ. από 552.5 kWh/m³ σε 477.1 kWh/m³ περίπου, Πίνακας 3).

Τα πεδία χρήσης της, είναι στην παραγωγή τσιμέντου, ως πηγή SiO₂, είτε ως προσθήκη στο σκυρόδεμα για υποκατάσταση του τσιμέντου. Σήμερα,

η ιπτάμενη τέφρα ή οι ποζολάνες, μπορούν να αντικαταστήσουν το τσιμέντο στο σκυρόδεμα, σε ποσοστά που κυμαίνονται από 15-35% και σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να φτάσουν μέχρι 70%.

Η ιπτάμενη τέφρα, ως γνωστόν, αντιδρά με το Ca(OH)₂, που προκύπτει από την ενυδάτωση του τσιμέντου και σχηματίζει ένυδρο πυριτικό αοβέστιο, που έχει παρεμφερείς ιδιότητες με το πυριτικό τριαοβέστιο και διαοβέστιο. Μέσω αυτής της διεργασίας, η ιπτάμενη τέφρα συμβάλλει θετικά στην αντίσταση του σκυροδέματος, σε θεϊκές ενώσεις, μειώνει την διαπερατότητά του, συνεισφέρει στη μείωση του λόγου νερό/τσιμέντο και βελτώνει την αντλησιμότητα (ιξώδες) και το εργαίσιμο του σκυροδέματος.

Ο ρυθμός όμως απόκτησης της πρωινής αντοχής (early strength) του σκυροδέματος, εξαρτάται σημαντικά, από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης τέφρας (τύπος F, C ή άλλοι τύποι). Περισσότερο ευνοϊκή, ως προς το θέμα αυτό, συμπεριφορά, παρουσιάζει η τέφρα του τύπου C έναντι της F, ενώ μακροπρόθεσμα η αντοχή που προσδίδουν, είναι μεγαλύτερη από αυτή, του κοινού σκυροδέματος.

4. Στην παρασκευή του σκυροδέματος, χρησιμοποιούνται και άλλα άχρηστα υλικά, όπως σκυροίτες υψοκάλων, θραυσμένο σκυρόδεμα από κατεδαφίσεις κλπ., ως υποκατάστατα των φυσικών αδρανών.

5. Άλλες επιβλαβείς εκπομπές στην ατμόσφαιρα.

Η τοιμενοβιομηχανία και η παραγωγή σκυροδέματος, προκαλούν και άλλου είδους εκπομπές στην ατμό-

ΠΥΡΦΟΡΟΣ 2002

σφαιρα, εκτός του CO₂ (π.χ. σκόνη από την περιστροφική κάμνο, από την παραγωγή και ανάμιξη των πρώτων υλών, από την άλεση του κλίνκερ, από τις διαδικασίες ενσάκωσης και φρότωσης του τοιμέντου κλπ.). Ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης αυτής της ρύπανσης, είναι η δέσμευση, η συλλογή και ανακύκλωση της σκόνης, στις διαδικασίες παραγωγής του τοιμέντου. Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται σήμερα αποδοτικά, με χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων, μηχανικών διατάξεων συλλογής, σακκόφίλτρων, καταιονισμού με νερό, κάλυψης των μεταφερόμενων υλικών, κλπ.

Σημαντικό πρόβλημα, όμως, είναι, η εξουδετέρωση και αντιμετώπιση της έντονα αλκαλικής συμπεριφοράς της σκόνης της τοιμεντοβιομηχανίας. Συνήθως λοιπόν, χρησιμοποιείται για επεξεργασία εδαφών γεωργικών καλλιεργειών και η απομένουσα ποσότητα, αποτίθεται ως στείο υλικό. Η χρησιμοποίηση αυτής της σκόνης για ρύθμιση του pH όξινων λιμνών στον Καναδά, είχε αποτέλεσμα, την δημιουργία επικίνδυνων αδιάλυτων αλάτων.

Μικρότερης αλλά όχι αμελητέας σπουδαιότητας, είναι και οι εκπομπές άλλων ατμοσφαιρικών ρυπαντών (διοξειδίο του θείου οξειδία του αζώτου, τριοξειδίο του θείου κλπ.). Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, γίνεται, συνήθως, με χρήση ως καυσίμων, πρώτων υλών χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και η δέσμευση των αερίων, με τις σύγχρονες μεθόδους και με κατάλληλο εξοπλισμό περιβαλλοντικού ελέγχου.

6. Ρύπανση των νερών.

Σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα που ανακύπτει στην παραγωγή τοιμέντου και σκυροδέματος, είναι η μόλυνση των νερών, με κυριώτερο αυτό στη διαδικασία παραγωγής και χρήσης του σκυροδέματος. Η κατανάλωση νερού στις μονάδες ετοιμού σκυροδέματος είναι το υπ'αριθμόν ένα πρόβλημα.

Υπολογίζεται ότι χρειάζονται, περίπου, 2 m³ (500 gallons) νερού ανά

φορητό (μπετονιέρα) και ανά ημέρα, για έκπλυση και το pH του νερού που προκύπτει, είναι, περίπου, 12. Η ισχυρή αλκαλικότητά του, το καθιστά ιδιαίτερα τοξικό για οποιονδήποτε υδρόβιο οργανισμό. Στις σύγχρονες μονάδες ετοιμού σκυροδέματος, υπάρχουν λίμνες απόρριψης των νερών έκπλυσης, όπου τα περιεχόμενα στερεά, καθιζάνουν και το νερό επεξεργάζεται για επαχρησιμοποίηση. Πολλές φορές επίσης, υπάρχουν ειδικές εγκαταστάσεις απόρριψης του πλεονάζοντος σε μια κατασκευή σκυροδέματος, για έκπλυση και ανάκτηση των αδρανών που ξανατροφοδοτούνται στην μονάδα. Είναι φανερό ότι, σοβαρό πρόβλημα προκύπτει, από την ανεξέλεγκτη έκπλυση των φορητών μεταφορών και των αντλιών τροφοδοσίας, επί τόπου του έργου, γεγονός στο οποίο δεν έχει δοθεί η αναγκαία σημασία στη χώρα μας.

Συμπεράσματα.

Το τοιμέντο και το σκυρόδεμα, είναι υλικά μεγάλης σημασίας στην βιομηχανία δομικών κατασκευών. Το σκυρόδεμα έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως αντοχή, μεγάλη διάρκεια ζωής, μεγάλη θερμοχωρητικότητα και σχετική χημική αδράνεια. Θεωρείται ουσιώδους σημασίας δομικό στοιχείο σε παθητικές ηλιακές εφαρμογές (κατασκευές) και σε αρκετές περιπτώσεις, έχει καλύτερη συμπεριφορά από το ξύλο και τον χάλυβα.

Η τοιμεντοβιομηχανία είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα βιομηχανία και συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Είναι αναγκαίο λοιπόν, το σκυρόδεμα να χρησιμοποιείται σήμερα, με ορθολογικό τρόπο στις κατασκευές, λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που παρουσιάζουν οι διαδικασίες παραγωγής των πρώτων υλών του και η χρήση του (π.χ. ορθολογική χρήση υλικών για παραγωγή ενέργειας, αξιοποίηση απορριμμάτων, αντικατάσταση μέρους του τοιμέντου με ιπτάμενη

τέφρα, με ανακύκλωση του σκυροδέματος από κατεδαφίσεις κλπ.).

Βιβλιογραφία.

1. ENV-Cement and Concrete: Environmental Considerations, Volume 2, No 2- March/April 1993.
2. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition, Edited by Peter C. Hewlett, Arnold 1998.
3. Neville, A.M., Properties of Cement and Concrete, 3rd Edition, Pitman, 1981.
4. SME, Mineral Processing Handbook, Norman L. Weiss, Society of Mining Engineers, N.Y., 1985.
5. Portland Cement Association: The Cement Industry, January 2000.
6. Ζευγώλης Μ.Ν., Γαϊτάνος Γ.Φ. και Κοντός Γ.Λ., Η Διαχείριση των Μεταλλουργικών Σκυρών στη Γ.Μ. & Μ. Α.Ε. ΛΑΡΚΟ, Περιοδικό ΠΥΡΦΟΡΟΣ, Ε.Μ.Π., Περιοδική Έκδοση «ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ, Τεύχος 2, 1999».
7. Ισαακίδης, Α., Υπάρχουσα κατάσταση σε σχέση με τα επικίνδυνα απόβλητα στην Ελλάδα, Ημερίδα «Η διαχείριση των επικίνδυνων απόβλητων», Τεχνικά Χρονικά, Τ.Ε.Ε, 1997.
8. Νισκόπουλος, Κ., Τοιμεντοβιομηχανία: μια αξιόπιστη λύση διαχείρισης αποβλήτων, Ημερίδα «Η διαχείριση των επικίνδυνων απόβλητων», Τεχνικά Χρονικά, Τ.Ε.Ε, 1997.
9. Τσακαλάκης Κ., 2002, Η οικονομική σημασία της Ελληνικής βιομηχανίας τοιμέντου και σκυροδέματος και η ενεργειακή και περιβαλλοντική διάσταση των διεργασιών παραγωγής τους, Μεταλλειολογικά - Μεταλλουργικά Χρονικά 2/2000, σελ. 79-92.
10. Tsakalakis K. G. Frangiskos A.Z., and Karka H., Recycled Aggregates - An Environmentally friendly management for the Athens Urban area, IX Balkan Mineral Processing Congress, Intanbul, September 2001.
11. Μουτσάτσου Α. και Τοίμας Σ., 1999, Η ιπτάμενη τέφρα ως μέσο προστασίας του περιβάλλοντος, ΠΥΡΦΟΡΟΣ No2.