



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΙΧΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



ΠΕΡΥΣΙΝΑΚΗ Δ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

Επιβλέπων: Πουλάκος Γεώργιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΙΧΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΠΕΡΥΣΙΝΑΚΗ Δ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

Επιβλέπων: Πουλάκος Γεώργιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	11
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	11
1.1.1 Η παραγωγική διαδικασία του σκυροδέματος	11
1.1.2 Η μεταλλευτική δραστηριότητα στην Ελλάδα για την παραγωγή τσιμέντου και αδρανών υλικών σκυροδέματος.....	15
1.1.3 Η οικονομική σημασία της ελληνικής βιομηχανίας τσιμέντου και σκυροδέματος	16
1.1.4 Η σύνθεση του σκυροδέματος και η επίδρασή της στις ιδιότητές του	17
1.1.5 Ανθεκτικότητα τσιμέντου - σκυροδέματος στις συνθήκες περιβάλλοντος....	28
1.1.6 Ευρωπαϊκά πρότυπα και παραγόμενοι τύποι τσιμέντου	30
1.2 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	34
1.2.1 Κατανάλωση ενέργειας στην τσιμεντοβιομηχανία και τη βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος	35
1.2.2 Περιβαλλοντικά προβλήματα από την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος.....	37
2 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	41
2.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΦΙΛΙΚΩΝ / ΗΠΙΩΝ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	41
2.1.1 Γενικά.....	41
2.1.2 Κατανάλωση ενέργειας στη δόμηση.....	42
2.1.3 Φυσικοί Πόροι.....	43
2.1.4 Κατανάλωση ενέργειας κατά τα στάδια παραγωγής δομικών υλικών	45
2.1.5 Ανακύκλωση.....	51
2.1.6 Θερμική συμπεριφορά κτιρίου	52
2.2 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	53
2.2.1 Δομικά προϊόντα και τοξικότητα.....	53
2.2.2 Πηγές αέριας ρύπανσης εσωτερικών χώρων, ανώτατα όρια και έλεγχος – εναλλακτικές λύσεις.....	59
2.2.3 Ακτινοβολία - ραδιενέργεια	61
2.2.4 Οικολογικές και βιο-οικολογικές ιδιότητες δομικών υλικών	67
2.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΦΙΛΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	73

2.3.1	Γενικά για την περιβαλλοντική αξιολόγηση δομικών υλικών	73
2.3.2	Μέθοδοι περιβαλλοντικής αξιολόγησης δομικών υλικών	81
2.3.3	Οικολογική σήμανση.....	85
3	ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΣ / ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	89
3.1	ΓΕΝΙΚΑ	89
3.2	ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ.....	95
3.2.1	Μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στην περιστροφική κάμινο	95
3.2.2	Εναλλακτικά καύσιμα ή απορρίμματα με υψηλή θερμογόνο δύναμη	98
3.2.3	Βελτιστοποίηση των διεργασιών παραγωγής αδρανών υλικών	102
3.3	ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ – ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	105
3.3.1	Γενικά.....	105
3.3.2	Συναφή ερευνητικά αποτελέσματα	106
3.4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ «ΠΡΑΣΙΝΩΝ» ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΜΙΚΤΩΝ	111
3.4.1	Η επίδραση των πληρωτικών υλικών στο σκυρόδεμα	112
3.4.2	Η επίδραση των συνδετικών ουσιών στο σκυρόδεμα.....	117
3.4.3	Παραδείγματα – Εφαρμογές οικολογικού σχεδιασμού σκυροδέματος.....	118
3.5	ΈΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΔΙΑ ΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	148
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	151
5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	155

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διατριβή τεκμηριώνεται η ανάγκη για την αειφόρο κατασκευή στο σύνολό της αλλά και ειδικότερα η ανάγκη για παραγωγή οικολογικού σκυροδέματος και παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους αυτό μπορεί να επιτευχθεί. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η εξέλιξη του σκυροδέματος όσον αφορά τόσο θέματα αντοχής / διάρκειας ζωής του, όσο και θέματα προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία **εισαγωγή στο σκυρόδεμα**, στην οποία παρουσιάζονται η τεχνολογία παραγωγής του και η οικονομική σημασία της βιομηχανίας σκυροδέματος στην Ελλάδα, οι παράγοντες που καθορίζουν τη σύνθεσή του, οι ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή του και τα ευρωπαϊκά πρότυπα που έχουν υιοθετηθεί και εφαρμόζονται στην Ελλάδα ως Ελληνικά Πρότυπα. Δίνεται τέλος, ιδιαίτερη έμφαση σε ό,τι αφορά τις εναλλακτικές μεθόδους βελτιστοποίησης της κατανομής μεγέθους σωματιδίων αδρανών καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους όσον αφορά τη βελτιστοποίηση του οικολογικού μίγματος σκυροδέματος.

Ακολούθως, το επόμενο κεφάλαιο εστιάζει στα **οικολογικά δομικά υλικά**, παρουσιάζοντας τα κριτήρια αξιολόγησης περιβαλλοντικά φιλικών οικοδομικών τεχνικών και δομικών υλικών και εξετάζοντας θέματα τοξικότητας δομικών υλικών και προστασίας της ανθρώπινης υγείας από ακτινοβολία / ραδιενέργεια με έμφαση στο ραδόνιο. Παράλληλα παρατίθενται ορισμένα «εγγυημένα» οικολογικά δομικά υλικά και παρουσιάζεται το σκυρόδεμα ως προς τις οικολογικές και βιο-οικολογικές ιδιότητές του. Τέλος, περιγράφονται οι υπάρχουσες μέθοδοι περιβαλλοντικής αξιολόγησης δομικών υλικών που βασίζονται είτε στη μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής είτε στη μεθοδολογία της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Συγκεκριμένα για το σκυρόδεμα εξετάζονται οι αδυναμίες της ανάλυσης κύκλου ζωής και παρουσιάζεται και ένα λογισμικό σύστημα περιβαλλοντικής διαχείρισης το οποίο φαίνεται να καλύπτει τις αδυναμίες αυτές.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι **δυνατότητες βελτίωσης του σκυροδέματος ώστε αυτό να καταστεί οικολογικό** ή «πράσινο» δομικό υλικό. Για το σκοπό αυτό, εξετάζονται α) τροποποιήσεις της παραγωγικής διαδικασίας, όπως η αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων ή απορριμμάτων με υψηλή θερμογόνο δύναμη, β) οι δυνατότητες ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης του σκυροδέματος, γ) ο σχεδιασμός σύνθετων τσιμέντων με την αξιοποίηση προσμίκτων και δ) ο περιορισμός της μεταφοράς ραδονίου διαμέσου του σκυροδέματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον σχεδιασμό οικολογικών σύνθετων τσιμέντων. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι τρόποι αντικατάστασης του τσιμέντου Portland στο οικολογικό σκυρόδεμα και προτείνονται σχεδιαστικά μίγματα που στοχεύουν στη μείωση του περιεχόμενου τσιμέντου με την αντικατάστασή του με πληρωτικές ή συνδετικές ουσίες (fillers ή binders), αναλύεται η επίδραση της αντικατάστασης του τσιμέντου στις ιδιότητες του σκυροδέματος καθώς επίσης και οι σημαντικότεροι παράγοντες στον σχεδιασμό οικολογικού σκυροδέματος που βασίζεται στη θεωρία πακεταρίσματος των σωματιδίων των αδρανών (particle packing). Επιπρόσθετα, περιγράφονται αρκετά ενδιαφέροντα projects στον τομέα του οικολογικού σκυροδέματος παγκοσμίως.

Τέλος στο κεφάλαιο 4 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας ως προς τις δυνατότητες σχεδιασμού οικολογότερου σκυροδέματος.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στον Τομέα Συνθέσεων Τεχνολογικής Αιχμής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Αντικείμενο της διπλωματικής μου εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των οικολογικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος, ώστε να εξεταστεί κατά πόσον το σκυρόδεμα του αύριο έχει τη δυνατότητα όχι μόνο να έχει μεγαλύτερη αντοχή / διάρκεια ζωής, αλλά και να καλύπτει τις κοινωνικοοικονομικές ανάγκες με το μικρότερο δυνατό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το έτος 2011-2012 υπό την επίβλεψη του κ. Γεωργίου Πουλάκου, Καθηγητή του Ε.Μ.Π. της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα για τη βοήθειά του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τις κυρίες Ελευθερία Τσακανίκα και Ελένη Αλεξάνδρου για τη βοήθεια και τις συμβουλές τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξή της όλο αυτό το διάστημα, και ιδιαίτερα την αδελφή μου Μηχανικό Περιβάλλοντος, Περυσινάκη Αγάπη, για τις πολύτιμες συμβουλές της.

Περυσινάκη Παρασκευή

1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το σκυρόδεμα είναι το κυριότερο 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 ουσιαστικής σημασίας παράγοντες στην ποιότητα και την αντοχή των κατασκευών.

Στην Ελλάδα εξορύσσονται εκατομμύρια κυβικά μέτρα πετρωμάτων και μεταλλευμάτων κάθε χρόνο, που αποτελούν τις πρώτες ύλες στην παραγωγή ενδιάμεσων προϊόντων (τσιμέντα διαφόρων τύπων), αλλά και αδρανών υλικών για την παραγωγή του σκυροδέματος (τελικό προϊόν).

Στο παρόν κεφάλαιο, αφενός περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής του σκυροδέματος, η οικονομική σημασία της ελληνικής βιομηχανίας τσιμέντου και σκυροδέματος και οι ιδιότητες του σκυροδέματος και τα πρότυπα τσιμέντου και σκυροδέματος, και αφετέρου αναλύονται οι ενεργειακές απαιτήσεις της βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος καθώς και τα περιβαλλοντικά προβλήματα που συνδέονται με αυτές.

1.1.1 Η παραγωγική διαδικασία του σκυροδέματος

Τα βασικά συστατικά του σκυροδέματος είναι τσιμέντο, λεπτομερή αδρανή (άμμος), χονδρομερή αδρανή, νερό και αέρας. Η κατά βάρος συμμετοχή των παραπάνω υλικών στην παρασκευή του σκυροδέματος δίνεται στον Πίνακα 1.1. Η αναλογία είναι περίπου 80% αδρανή και 20% τσιμέντο. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο είναι περίπου 0,5. Όταν τα αναμεμειγμένα υλικά πήξουν και στεγνώσουν, παράγουν ένα συμπαγές και ανθεκτικό τεχνητό πέτρωμα, που είναι γνωστό με το όνομα σκυρόδεμα και χρησιμοποιείται ευρέως σαν δομικό υλικό στις κατασκευές.

Πίνακας 1.1 Τυπική κατά βάρος (% κ.β.) σύνθεση του σκυροδέματος (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

<i>Συστατικό</i>	<i>Κατά βάρος, %</i>
Τσιμέντο Πόρτλαντ	12
Άμμος (λεπτομερή αδρανή)	34
Χονδρομερή αδρανή	48
Νερό	6
Αέρας	–
<i>Σύνολο</i>	<i>100</i>

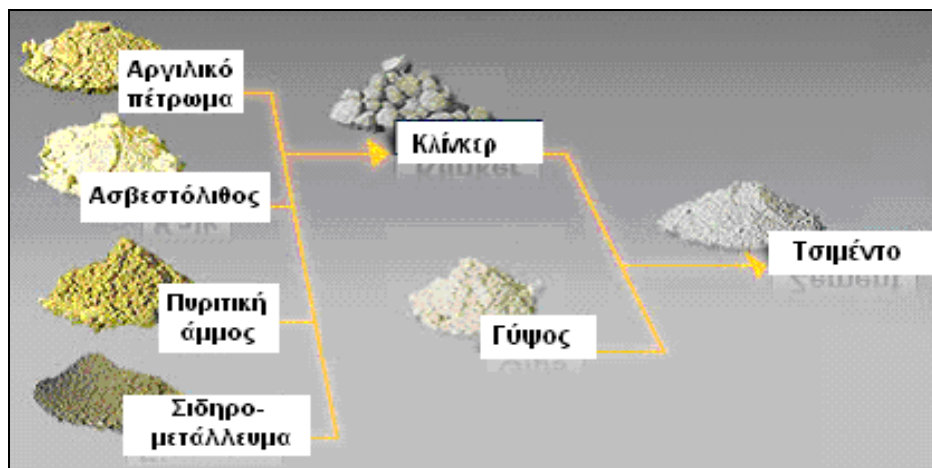
Το τσιμέντο είναι το βασικό συστατικό του σκυροδέματος και δρα σε ανάμειξη με το νερό ως συνδετική ουσία των παντός είδους αδρανών στο σκυρόδεμα. Το τσιμέντο Πόρτλαντ αντιπροσωπεύει το 95% περίπου των παγκοσμίως παραγόμενων ειδών τσιμέντου. Για την παραγωγή του, απαιτούνται οι παρακάτω πρώτες ύλες:

1. ασβεστόλιθος (πηγή οξειδίου του ασβεστίου),
2. αργιλικά πετρώματα (π.χ. σχιστόλιθος) και χαλαζιακή άμμος (πηγές τριοξειδίου του αργιλίου και διοξειδίου του πυριτίου),
3. σιδηρομετάλλευμα (πηγή οξειδίου του σιδήρου) ή
4. βωξίτης (πηγή τριοξειδίου του αργιλίου και διοξειδίου του πυριτίου) σε ειδικού τύπου τσιμέντα.

Η επιλογή των αδρανών για τη χρήση τους στο σκυρόδεμα είναι καθοριστικής σημασίας, προκειμένου να παραχθεί ένα δομικό υλικό που θα εξασφαλίζει τη καλή συμπεριφορά μιας κατασκευής σε δεδομένες συνθήκες. Τα ανθρακικά πετρώματα συγκαταλέγονται μεταξύ των πετρωμάτων που θεωρούνται ως τα πλέον κατάλληλα για την παραγωγή σκυροδέματος, αρκεί να μην περιέχουν βλαπτικά συστατικά (προσιμίξεις). Σαν βλαπτικά συστατικά χαρακτηρίζονται ορισμένα ορυκτά ή ουσίες τα οποία, ανάλογα με την ποσότητα και την κατανομή τους, μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την παραγωγή ενός καλού σκυροδέματος, γιατί εμποδίζουν την ομαλή εξέλιξη της πήξης και της σκλήρυνσης, μειώνουν την πυκνότητα, προκαλούν διογκώσεις, ρηγματώσεις, αποκολλήσεις, ή ευνοούν τη διάβρωση του οπλισμού (Κ. Τσακαλάκης, 2010, Τεχνικό Επιστημονικό Περιοδικό Σκυρόδεμα και Χάλυβας).

Στην Ελλάδα, η τσιμεντοβιομηχανία απορροφά επίσης ικανές ποσότητες **πυριτικών πετρωμάτων** (ποζολάνη), και απορροφούσε μέχρι πριν από μερικά χρόνια **σκωρίες ηλεκτροκαμίνων** από την παραγωγή σιδηρονικελίου (περίπου 250.000 t ετησίως από τη ΛΑΡΚΟ ΑΕ), **σκουριά από σιδηροπυρίτη** από τις βιομηχανίες λιπασμάτων και περίπου 150.000 t **φωσφογύψο**. Η χρησιμοποίηση των μεταλλουργικών σκωριών στην τσιμεντοβιομηχανία είναι εφικτή λόγω των ευνοϊκών ορυκτολογικών χαρακτηριστικών τους (περιεχόμενα οξείδια συμβατά με το τσιμέντο), ταυτόχρονα όμως συνέβαλε θετικά στο πρόβλημα που δημιουργούνταν από την απόθεση της σκωρίας στη θάλασσα (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Οι πρώτες ύλες, τα ενδιάμεσα προϊόντα και το τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1 Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

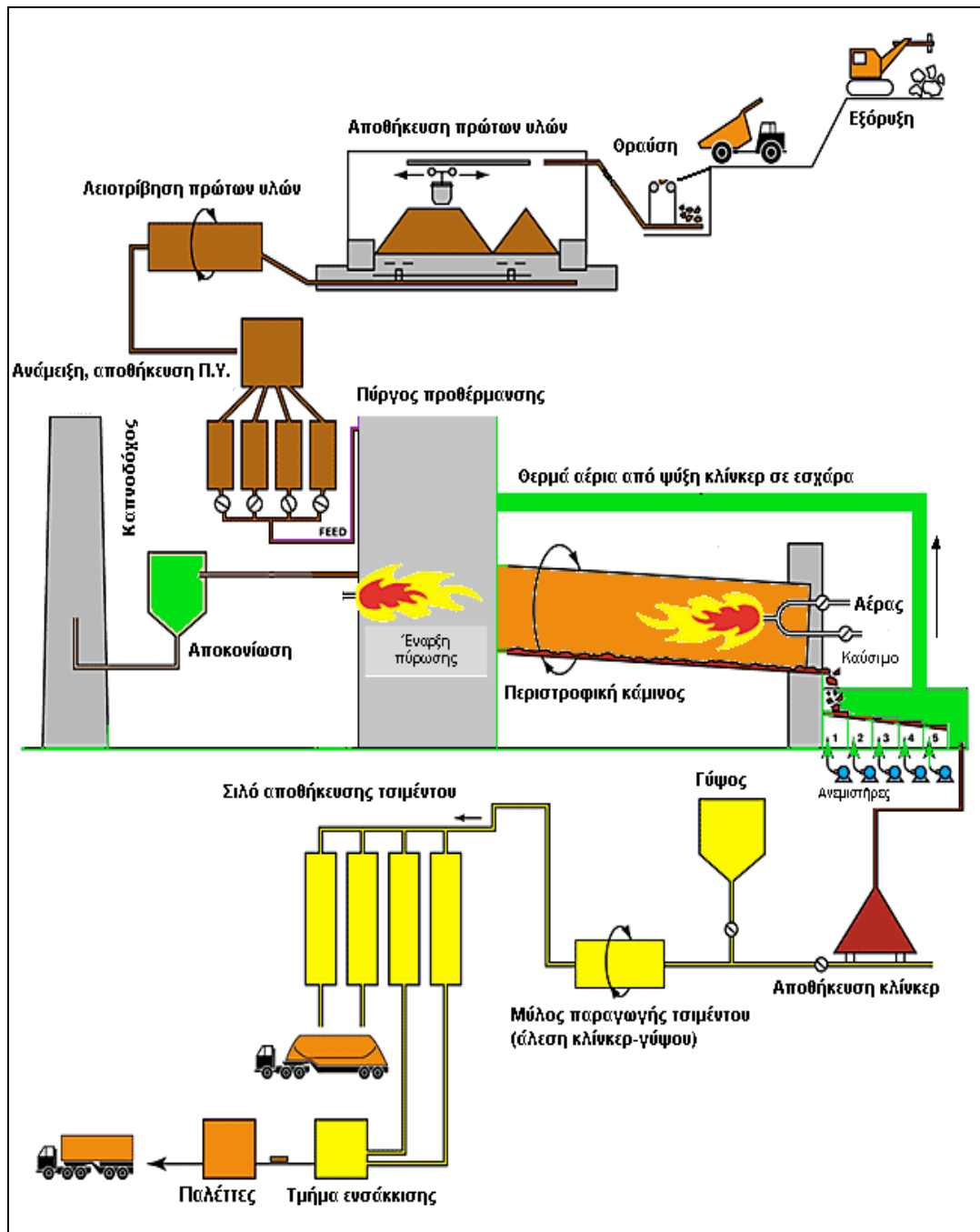
Το αναλυτικό διάγραμμα ροής των διεργασιών παραγωγής τσιμέντου παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.2. Από αυτό το διάγραμμα ροής γίνεται αντιληπτό ότι η διεργασία

παραγωγής τσιμέντου είναι, σε πρώτο στάδιο, καθαρά μεταλλευτική δραστηριότητα που περιλαμβάνει τις εξής επιμέρους διεργασίες:

1. εξόρυξη πρώτων υλών, και
2. μηχανική ελάττωση μεγέθους (θραύση, λειοτρίβηση)

και σε δεύτερο στάδιο μεταλλουργική δραστηριότητα και ελάττωση μεγέθους που περιλαμβάνει:

1. την καθαυτό μεταλλουργική διεργασία παραγωγής του κλίνκερ τσιμέντου και
2. την άλεσή του (λεπτομερή λειοτρίβηση του κλίνκερ) για την παραγωγή τσιμέντου.



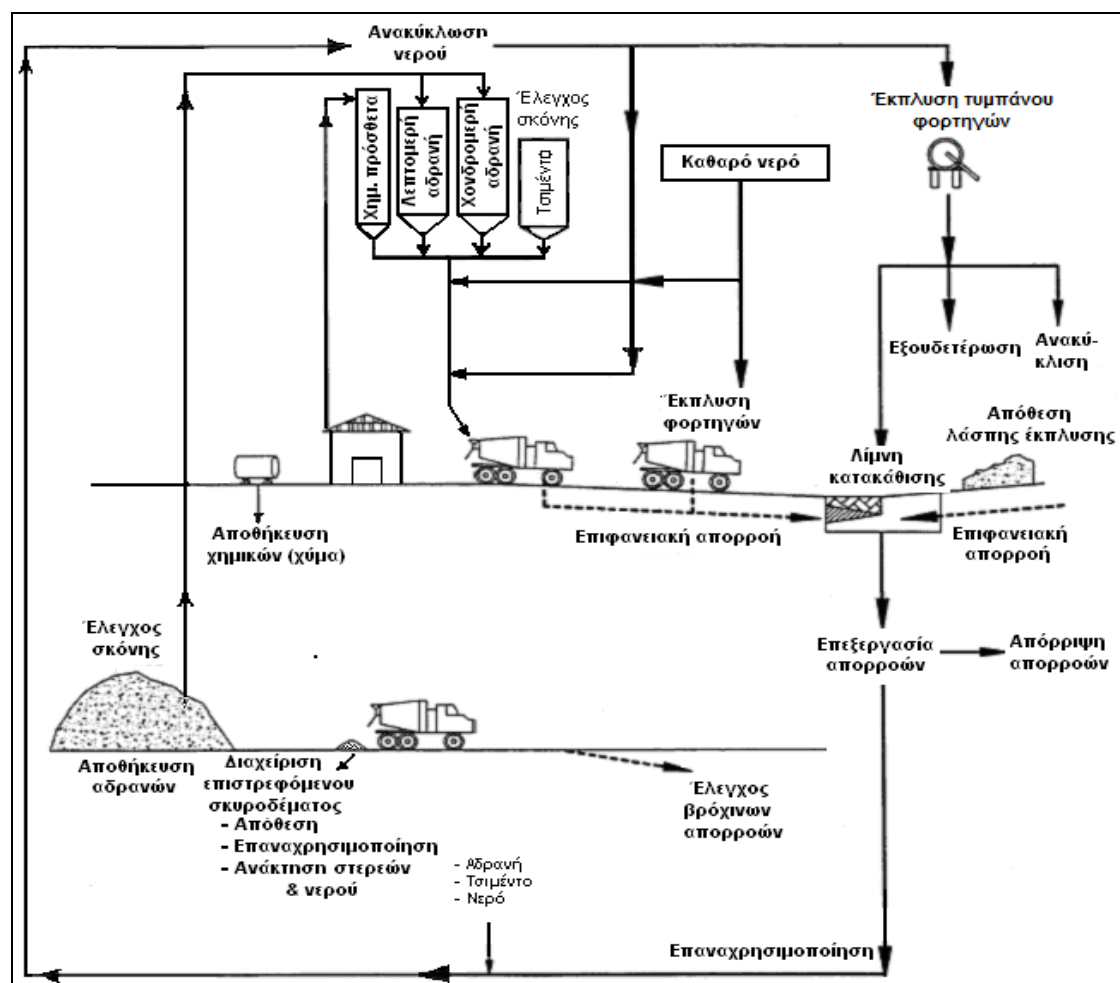
Εικόνα 1.2 Διάγραμμα ροής διαδικασιών παραγωγής τσιμέντου (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Είναι επίσης γνωστό ότι 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 και πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή την αναμόρφωση του εξορυγμένου χώρου.

Την παραγωγή τσιμέντου ακολουθεί η παραγωγή του σκυροδέματος που απαιτεί, εκτός από τη χρήση τσιμέντου και νερού, αδρανών υλικών με κατάλληλα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και επίσης διάφορα χημικά πρόσθετα για τον έλεγχο και τη ρύθμιση των αντοχών του. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι παρασκευής έτοιμου σκυροδέματος (Κ. Τσακαλάκης, 2010):

- η υγρή αυτοτελής (batch) 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 αναμικτήρα. Το προϊόν της διεργασίας ανάμιξης, που είναι το έτοιμο σκυρόδεμα (ready mixed concrete) μεταφέρεται κατόπιν με ειδικά φορτηγά (συνεχώς αναδευόμενο ως ρευστό μεγάλου ιξώδους) στη θέση (έργο), όπου θα χρησιμοποιηθεί. Εκεί το σκυρόδεμα χύνεται σε καλούπια και δονείται ώστε να συμπκνωθεί και να πάρει τη μορφή του στοιχείου του έργου.



Εικόνα 1.3 Διάγραμμα ροής διεργασιών σε μονάδα παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Κατά την ξηρή μέθοδο παρασκευής, οι ακριβώς υπολογισμένες ποσότητες των στερεών πρώτων υλών τροφοδοτούνται μαζί με την αναγκαία (λόγος W/C) ποσότητα νερού στο περιστρεφόμενο τύμπανο του οχήματος (π.χ. φορτηγού) παρασκευής-μεταφοράς. Ταυτόχρονα επίσης, προστίθενται στο τύμπανο οι αναγκαίες ποσότητες χημικών πρόσθετων και η ανάμιξη όλων των συστατικών γίνεται εντός του περιστρεφόμενου κάδου, κατά τη μετακίνηση του οχήματος και τη μεταφορά του σκυροδέματος στο κατασκευαζόμενο έργο.

Στην Εικόνα 1.3 φαίνεται ένα αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών σύγχρονης μονάδας παραγωγής έτοιμου στο οποίο φαίνονται επίσης και οι απαραίτητες συμπληρωματικές διεργασίες που πρέπει να περιλαμβάνονται στο κύκλωμα, ώστε η παραγωγή του σκυροδέματος να γίνεται με τον πιο οικονομικό αλλά και «περιβαλλοντικά» φιλικό τρόπο. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται ο τρόπος διαχείρισης του αχρησιμοποίητου (περίσσειμα) σκυροδέματος, το οποίο πρέπει στην πλειονότητα των περιπτώσεων να επιστρέφεται στη μονάδα και επίσης υποδεικνύεται ο τρόπος διαχείρισης των παντός είδους στερεών και υγρών αποβλήτων που προκύπτουν, τα οποία σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να απορρίπτονται στο περιβάλλον χωρίς προηγουμένως να έχουν υποστεί την απαραίτητη επεξεργασία.

Η περιβαλλοντική διάσταση της παραγωγής του σκυροδέματος είναι μια παράμετρος η οποία πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά την κατασκευή και τη λειτουργία μονάδων παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος. Λεπτομερέστερη ανάλυση του παραπάνω προβλήματος γίνεται στο υποκεφάλαιο 1.2.

1.1.2 Η μεταλλευτική δραστηριότητα στην Ελλάδα για την παραγωγή τσιμέντου και αδρανών υλικών σκυροδέματος

Σε δημοσίευση (1998) του Ινστιτούτου Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών (IOBE) αναφερόταν ότι, η ετήσια παραγωγή της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας το 1997 ήταν 14.8 εκατ. τόνοι τσιμέντου. Το 52% της παραγωγής (7.7 εκατ. τόνοι) εξάγονταν σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τις ΗΠΑ και το 48% (7.1 εκατ. τόνοι) παρέμενε στην ελληνική αγορά. Από το διατιθέμενο τσιμέντο στην ελληνική αγορά, ποσοστό 68% ήταν χύμα και 32% ενσακκισμένο. Το 80% του διατιθέμενου στην ελληνική αγορά «χύμα» τσιμέντου το απορροφούσαν οι εταιρείες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος, το 12-15% οι κατασκευαστικές εταιρείες και το 5-8% οι μονάδες παραγωγής προϊόντων τσιμέντου (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Ποσότητα πρώτων υλών για την παραγωγή τσιμέντου

Είναι γνωστό ότι για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου απαιτούνται περίπου 1.6 τόνοι πρώτων υλών. Από αυτές, το 75% δηλ. περίπου $0.75 * 1.6 * 14.8$ εκατ. τόνοι = **17.8 εκατ. τόνοι ετησίως**, ήταν ασβεστολιθικά πετρώματα που χρησιμοποιούνταν στην Ελλάδα για την παραγωγή τσιμέντου.

Ποσότητα πρώτων υλών για την παραγωγή σκυροδέματος

Αν υποθεθεί ότι το 75% του διατιθέμενου στην ελληνική αγορά τσιμέντου (δηλαδή $0.75 * 7.1$ εκατ. τόνοι = 5.3 εκατ. τόνοι) χρησιμοποιείται για την παραγωγή

σκυροδέματος, τότε δεδομένου ότι για κάθε m^3 σκυροδέματος απαιτούνται περίπου 300 kg τσιμέντου, παράγονται $(5.3/0.3) * 10^6 = 17.8 * 10^6 m^3$ σκυροδέματος. Επειδή όμως απαιτούνται περίπου 2 τόνοι αδρανών υλικών/ m^3 σκυροδέματος, τότε απαιτούνται επίσης **35.6 εκατ. τόνοι αδρανών υλικών για σκυρόδεμα.**

Οι 35.6 εκατ. τόνοι αδρανών υλικών είναι προϊόν εξόρυξης και **το αξιοποιήσιμο υλικό** (κατάλληλα κοκκομετρικά κλάσματα μετά τη θραύση) **είναι κατά μέγιστο περίπου 75% αυτού που εξορύσσεται, δηλαδή πρέπει να εξορυχθούν τουλάχιστον $35.6 * 10^6/0.75 = 47.4$ εκατ. τόνοι αδρανών υλικών για σκυρόδεμα.**

Συνολική ποσότητα ασβεστολιθικών πρώτων υλών για την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος

Οι συνολικοί τόνοι ασβεστολιθικού υλικού για τσιμέντο και σκυρόδεμα ετησίως είναι: $(17.8 + 47.4) * 10^6 = 65.2$ εκατ. τόνοι. Με λόγο αποκάλυψης (υπερκείμενα: ασβεστολιθικό υλικό) 1:5 σύμφωνα με μέτριους υπολογισμούς, η ποσότητα αυτή προσ αυξάνεται 20% δηλ. η συνολική ποσότητα του εξορυσσόμενου υλικού ανέρχεται σε $(65.2 * 10^6) * 1.2 = 78.2$ εκατ. τόνοι ή περίπου $30 * 10^6 m^3$ ασβεστολιθικών πετρωμάτων (ειδικό βάρος ασβεστολίθου περίπου 2.65 τόνοι/ m^3)

Σ' αυτήν την ποσότητα δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι μη ασβεστολιθικές πρώτες ύλες στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου, οι οποίες είναι το 25% περίπου των ασβεστολιθικών δηλαδή $18 * 10^6$ εκατ. τόνοι ή $7-7.5 * 10^6 m^3$ επιπλέον.

1.1.3 Η οικονομική σημασία της ελληνικής βιομηχανίας τσιμέντου και σκυροδέματος

Αξία εξαγόμενου τσιμέντου

Αν ληφθεί υπόψη ότι η τιμή του εξαγόμενου τσιμέντου ήταν περίπου 70\$/τόνο δηλ. περίπου 28.000 δρχ./τόνο, τότε τα έσοδα από την πώληση του τσιμέντου ανέρχονταν ετησίως σε: $7.7 * 10^6$ τόνοι * 28.000 δρχ./τόνο = 215.6 δισ. δρχ. ετησίως ή **632.7 εκατ. ευρώ ετησίως.**

Αξία παραγόμενου σκυροδέματος

Η μέση τιμή του σκυροδέματος στην ελληνική αγορά (συμπεριλαμβανομένου και του ΦΠΑ) ήταν 17.000 δρχ./ m^3 . Άρα τα ακαθάριστα έσοδα από την πώληση των $17.8 * 10^6 m^3$ σκυροδέματος ανέρχονταν σε: $17.8 * 10^6 m^3$ σκυροδέματος * 17.000 δρχ./ m^3 = 302.3 δισ. δρχ. ετησίως ή **887.2 εκατ. ευρώ ετησίως.**

Συνολικά έσοδα βιομηχανίας τσιμέντου και σκυροδέματος

Οι συνολικές πωλήσεις τσιμέντου και σκυροδέματος απέφεραν ακαθάριστα έσοδα περίπου 518 δισ. δρχ. ή **1.52 δισ. ευρώ** ετησίως. Αν ληφθούν δε υπόψη και τα προϊόντα τσιμέντου που παράγονταν, δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα η υπόθεση ότι ο ετήσιος κύκλος εργασιών των βιομηχανιών τσιμέντου και σκυροδέματος ήταν 600 δισ. δρχ. ή **1.8-2.0 δισ. ευρώ** περίπου.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι τομείς του τσιμέντου και του σκυροδέματος είναι από τους δυναμικότερους της ελληνικής βιομηχανίας με σημαντική συμμετοχή στο ΑΕΠ. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των κατασκευών τα τελευταία 50 χρόνια αποδεικνύει πως ο τομέας αυτός της βιομηχανίας παραμένει σταθερά σε ανοδική τροχιά. Επομένως το μέλλον προβλέπεται ευοίωνο για τα επόμενα χρόνια, δεδομένης της αύξησης της παραγωγικής δυναμικότητας με την εξαγορά ομοειδών επιχειρήσεων του εξωτερικού και την αύξηση του αριθμού των κέντρων διανομής των προϊόντων της κατασκευαστικής βιομηχανίας.

1.1.4 Η σύνθεση του σκυροδέματος και η επίδρασή της στις ιδιότητές του

Οι αναλογίες των συστατικών του σκυροδέματος προσδιορίζονται και «επιβάλλονται» κάθε φορά από το έργο το οποίο θα κατασκευαστεί, δηλαδή εξαρτώνται από τις **απαιτήσεις σε εργασιμότητα (workability), αντοχή σε θλίψη (compressive strength), ανθεκτικότητα στη διάρκεια του χρόνου (durability), πυκνότητα (density)** και τελική **επιφανειακή εμφάνιση**, που επιβάλλονται από τις προδιαγραφές του έργου. Σημαντική επίδραση στο σχεδιασμό παίζουν οι καιρικές - περιβαλλοντικές συνθήκες, που αναμένεται να επικρατούν κατά την εποχή της διάστρωσης, όπως επίσης και καθ'όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής από σκυρόδεμα (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Η χρήση βασικών μαθηματικών σχέσεων και εργαστηριακές δοκιμές δίνουν τη δυνατότητα σύνθεσης σκυροδέματος ικανοποιητικών ιδιοτήτων. Από πολυάριθμες παρατηρήσεις έχει διαπιστωθεί ότι οι **βασικοί παράγοντες** που επηρεάζουν τη διαδικασία αυτή είναι:

1. Ο λόγος νερού / τσιμέντου (W/C)
2. Τα υλικά του σκυροδέματος
3. Η παραγωγή και χρήση σκυροδέματος με ή χωρίς αερακτικό
4. Η απαιτούμενη κάθιση (slump) ή εξάπλωση του παραγόμενου μείγματος

Στη συνέχεια αναλύονται αυτοί οι παράγοντες:

1. Ο λόγος νερού / τσιμέντου (W/C)

Για την παραγωγή σκυροδέματος πολύ καλής ποιότητας, ο ρόλος του νερού, που μετριέται μέσω του λόγου νερού προς τσιμέντο (W/C), είναι πολύ σημαντικός:

$$(W/C, \text{ Water-Cement ratio}) = \frac{\text{Μάζα νερού}}{\text{Μάζα τσιμέντου}}$$

Το σκυρόδεμα, που θα προκύψει, πρέπει να είναι εργάσιμο, δηλαδή να έχει κατάλληλο ιξώδες που να του επιτρέπει να ρέει, να μορφοποιείται μέσα στον ξυλότυπο (καλούπι) και αποκτά αντοχή μετά την πάροδο κάποιου χρόνου.

Το νερό προκαλεί μέσω της αντίδρασης ενυδάτωσης (hydration) πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος. Η πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος διατηρεί τα αδρανή υλικά συγκολλημένα μεταξύ τους. Το νερό πρέπει να είναι καθαρό για να μη γίνονται εκτός της ενυδάτωσης και άλλες αντιδράσεις που παράγουν τελικά ασθενές (χαμηλής αντοχής) σκυρόδεμα.

Ο λόγος νερού προς τσιμέντο (W/C) καθορίζεται από διάφορους παράγοντες που εξαρτώνται από την απαιτούμενη αντοχή του σκυροδέματος, από το είδος του

σκυροδέματος που σχεδιάζεται να παραχθεί και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος οι οποίες αναμένεται να επικρατήσουν μετά τη διάστρωσή του. Η διαμόρφωση της τιμής του (W/C) καθορίζεται με τη βοήθεια στοιχείων από Πίνακες (π.χ. Πίνακας 1.2).

Πίνακας 1.2 Λόγος νερού προς τσιμέντο (W/C) ως συνάρτηση του είδους του σκυροδέματος (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Συνθήκες έκθεσης σκυροδέματος	Κανονικό σκυρόδεμα (Απόλυτος λόγος νερού προς τσιμέντο W/C κατά βάρος)
Σκυρόδεμα προστατευμένο από συνθήκες παγώματος και τήξης του πάγου (freezing and thawing) ή από αντιπαγωτικά χημικά	Επιλογή του λόγου W/C ανάλογα με την αντοχή του, την εργασιμότητά του και τις ανάγκες φινιρίσματος
Στεγανό σκυρόδεμα*	
<ul style="list-style-type: none"> • Σε φυσικό νερό • Σε θαλασσίνο νερό 	<p style="text-align: right;">0.50</p> <p style="text-align: right;">0.45</p>
Σκυρόδεμα ανθεκτικό στον παγετό	
<ul style="list-style-type: none"> • Σκυρόδεμα πάχους μικρότερου από 5 cm πάνω από τον οπλισμό ή εκτεθειμένο σε αντιπαγωτικά χημικά • Όλες οι υπόλοιπες κατασκευές 	<p style="text-align: right;">0.45</p> <p style="text-align: right;">0.50</p>
Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε θεϊκές ενώσεις*	
<ul style="list-style-type: none"> • Μέτρια έκθεση • Έντονη έκθεση 	<p style="text-align: right;">0.50</p> <p style="text-align: right;">0.45</p>
Σκυρόδεμα μέσα σε νερό	Ποσότητα τσιμέντου όχι μικρότερη από 386 kg/m ³
Σκυρόδεμα δαπέδων	Επιλογή του λόγου W/C ανάλογα με την αντοχή του σκυροδέματος και επίσης ανάλογα με τις ελάχιστες απαιτήσεις σε τσιμέντο λόγω μεγέθους αδρανών (Πίνακας 8.1)
* Για τις ιδιότητες του στεγανού σκυροδέματος, του ανθεκτικού σε παγετό και του εκτεθειμένου σε θεϊκές ενώσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται οι αντοχές που αναφέρονται στα σκυροδέματα με χρήση αερακτικού	

Η γενική αρχή που ισχύει στην παραγωγή σκυροδέματος είναι: **Μεγάλος λόγος (W/C), δηλαδή περίσσεια νερού, προκαλεί παραγωγή ασθενούς σκυροδέματος, ενώ μικρός λόγος κάνει το σκυρόδεμα μη εργάσιμο, δεν δουλεύεται ικανοποιητικά (έχει πολύ μεγάλο ιξώδες).**

Ο μεγάλος λόγος (W/C) επιτρέπει στα αδρανή να κατακάθονται μέσα στο αραιό μείγμα και έτσι στην επιφάνεια της κατασκευής απομένει τσιμεντόπαστα (μίγμα νερού και τσιμέντου). Επίσης, λόγω της «υδαρότητας» (χαμηλού ιξώδους) του σκυροδέματος, προκαλείται διαφορική ταξινόμηση (ταξινόμηση κατά μέγεθος ή απόμειξη) των αδρανών του σκυροδέματος μέσα στα καλούπια και απορροή της τσιμεντόπαστας από τα διάκενα του ξυλότυπου ή «εξίδρωση» (bleeding) στην ελεύθερη επιφάνεια του σκυροδέματος. Τελικώς, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη συνδετικής ύλης μεταξύ των αδρανών, δηλαδή την παραγωγή σκυροδέματος ανομοιόμορφης δομής και χαμηλής αντοχής.

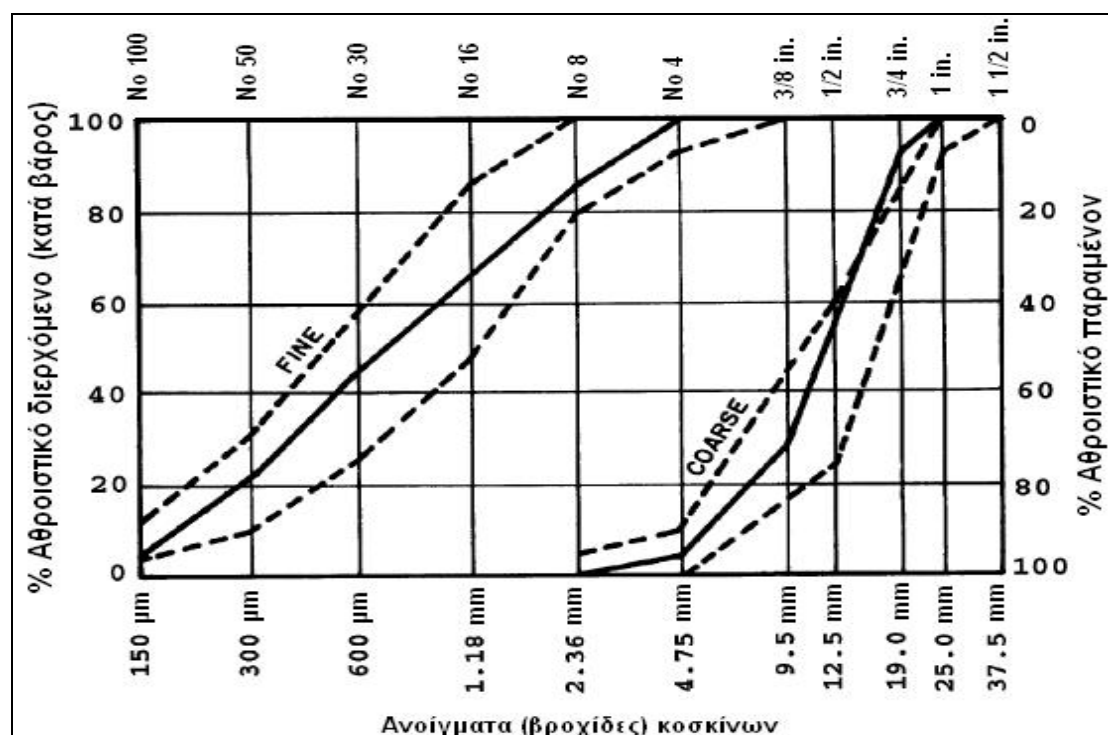
2. Τα υλικά του σκυροδέματος

A) Αδρανή

Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή σκυροδεμάτων κατατάσσονται σε τρεις κύριες ομάδες μεγεθών τεμαχίων (Εικόνα 1.4):

1. **Χονδρομερή αδρανή** (coarse aggregates) με τεμάχια ≥ 9.5 mm (3/8 in.) (COARSE στην Εικόνα 1.4).
2. **Ενδιάμεσου μεγέθους αδρανή** με τεμάχια από 2.36 – 9.5 mm mm (8 mesh-3/8 in.) (FINE στην Εικόνα 1.4)
3. **Λεπτομερή αδρανή** (fine aggregates) με τεμάχια ≤ 2.36 mm (8 mesh) (FINE στην Εικόνα 1.4).

Το κοκκομετρικό κλάσμα με μεγέθη τεμαχίων 5 έως 0.075 mm χαρακτηρίζεται και ως **άμμος** (sand), ενώ τα τεμάχια μεγέθους ≤ 0.075 mm (200 mesh) ονομάζονται **παιπάλη**.

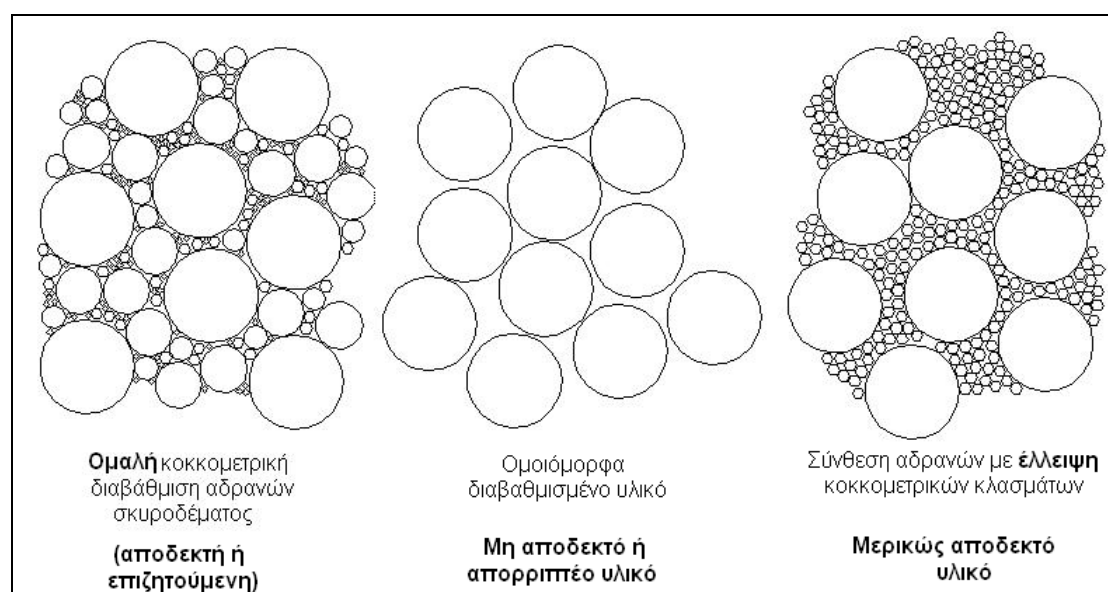


Εικόνα 1.4 Διάγραμμα ταξινόμησης αδρανών σκυροδέματος κατά μέγεθος (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Σε κάθε περίπτωση, για την παραγωγή σκυροδέματος υψηλών προδιαγραφών, απαιτούνται τουλάχιστον δύο στενές κοκκομετρικές ομάδες τεμαχίων (π.χ. λεπτομερή ≤ 5 mm ή άμμος και χονδρομερή ≥ 5 mm) όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5.

Στην παραγωγή σκυροδέματος πρέπει να χρησιμοποιείται **η χονδρομερέστερη κατά το δυνατόν σύνθεση αδρανών**, που εξασφαλίζει τη μέγιστη αντοχή στο παραγόμενο σκυρόδεμα και την ανάγκη χρήσης της μικρότερης ποσότητας τσιμεντόπαστας με προφανή μείωση του κόστους του σκυροδέματος. Όμως, το μέγιστο μέγεθος αδρανών εξαρτάται από την πηγή (πέτρωμα) των αδρανών, που επηρεάζει, μέσω και της μεθόδου παραγωγής του, τόσο το σχήμα όσο και τη διαβάθμισή του. Επίσης, το

μέγιστο μέγεθος τεμαχίου αδρανών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/3 της ελάχιστης διάστασης του δομικού στοιχείου που θα κατασκευαστεί και τα 3/4 της απόστασης μεταξύ των διαδοχικών ράβδων σιδηροπλισμού του σκυροδέματος. Επίσης, για οδοστρώματα και πλάκες δαπέδου (επίπεδες επιφάνειες) από μη οπλισμένο σκυρόδεμα, το μέγιστο μέγεθος τεμαχίου αδρανούς δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/3 του πάχους της κατασκευής. Τα **λεπτομερή αδρανή χρησιμοποιούνται για την πλήρωση των κενών μεταξύ των χονδρομερών αδρανών**, με στόχο να αυξήσουν την εργασιμότητα του μίγματος του σκυροδέματος και να ελαττώσουν τον όγκο των κενών που καλύπτεται από την τσιμεντόπαστα, γεγονός που έχει προφανώς θετικό οικονομικό αποτέλεσμα στο κόστος παραγωγής του σκυροδέματος (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

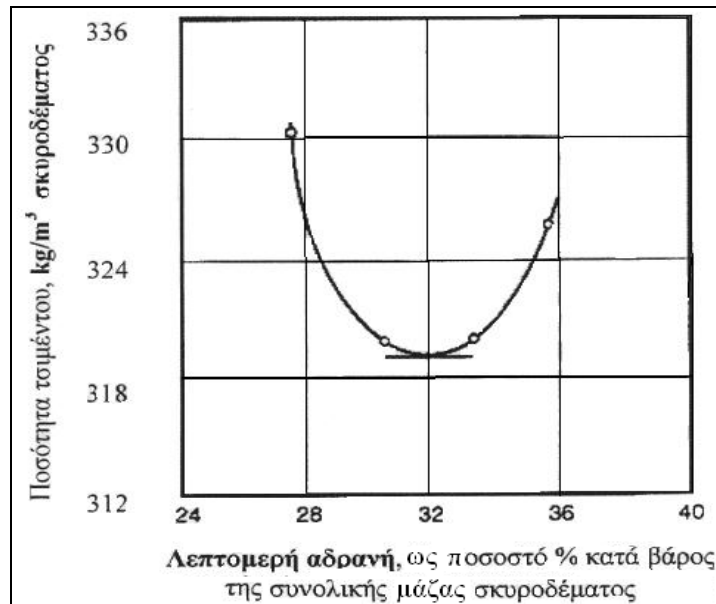


Εικόνα 1.5 Περιπτώσεις κοκκομετρικών διαβαθμίσεων αδρανών σκυροδέματος (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Η ελάχιστη κατανάλωση τσιμέντου (kg/m^3 σκυροδέματος) αντιστοιχεί σε ποσοστό λεπτομερών αδρανών περίπου 32% στο σκυρόδεμα (Εικόνα 1.6). Ποσοστό λεπτομερών αδρανών στο σκυρόδεμα μικρότερο από 32%, αφήνει προφανώς μεγαλύτερο ποσοστό κενών, το οποίο πρέπει να γεμίσει με τσιμεντόπαστα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη κατανάλωση τσιμέντου. Αντιθέτως, εάν το ποσοστό των λεπτομερών αδρανών στο σκυρόδεμα είναι αυξημένο (>32%), τότε πάλι η κατανάλωση τσιμέντου είναι αυξημένη, λόγω μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας της σύνθεσης των αδρανών (Εικόνα 1.6).

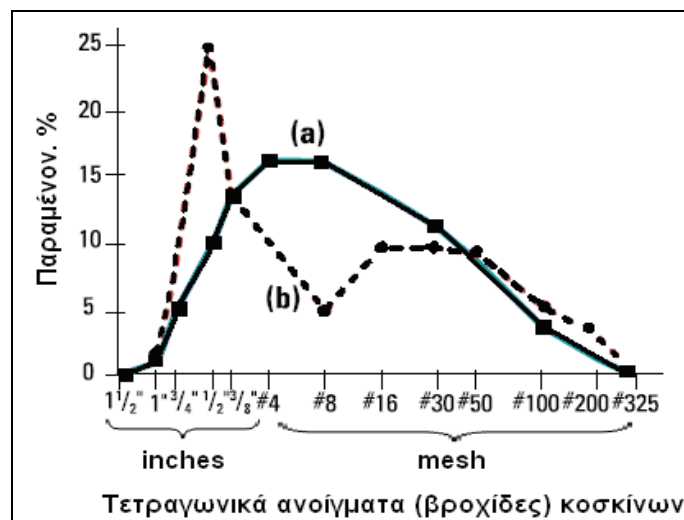
Αδρανή με ομαλή διαβάθμιση κοκκομετρικών κλασμάτων, χωρίς μεγάλο κενό (έλλειψη) ή αντίστοιχα περίσσεια κάποιου κοκκομετρικού κλάσματος **θεωρούνται τα πιο κατάλληλα για την παραγωγή σκυροδέματος**. Τα σκυροδέματα, που παράγονται χρησιμοποιώντας ένα αποδεκτό συνδυασμό κοκκομετρικών κλασμάτων (ομαλής κοκκομετρικής διαβάθμισης) έχουν την τάση να χρειάζονται μικρότερη προσθήκη νερού (μικρότερος λόγος W/C, άρα παράγουν ανθεκτικότερα σκυροδέματα), εξασφαλίζουν αποδεκτή εργασιμότητα στο σκυρόδεμα, ευκολία στην επιφανειακή διαμόρφωση και συμπυκνώνονται χωρίς το φαινόμενο απόμειξης των αδρανών. Αυτά τα χαρακτηριστικά ευνοούν τις ιδιότητες απόχυσης και διάστρωσης

του σκυροδέματος και συμβάλλουν θετικά στην ανάπτυξη αντοχών και στη συμπεριφορά του σε βάθος χρόνου (durability). Αντιθέτως, όταν από την κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών σκυροδέματος απουσιάζουν κοκκομετρικά κλάσματα, τότε εμφανίζονται συχνότερα φαινόμενα απόμειξης, αυξάνει η % περιεκτικότητα σε λεπτομερή αδρανή (άρα απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες νερού) και τα σκυροδέματα αυτά είναι επιδεκτικά σε φαινόμενα συρρίκνωσης (συστολή) λόγω ξήρανσης (shrinkage effect) (Κ. Τσακαλάκης, 2010).



Σχήμα 1.6 Κατανάλωση τσιμέντου συναρτήσει του ποσοστού λεπτομερών αδρανών στο σκυρόδεμα (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Στην Εικόνα 1.7, με συνεχή γραμμή φαίνεται μια ομαλή (αποδεκτή) κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών (a), ενώ με τεθλασμένη γραμμή δείχνεται μια κοκκομετρική διαβάθμιση (b) με έλλειψη κάποιων κλασμάτων.



Εικόνα 1.7 Καμπύλες % παραμένοντος σύνθεσης αδρανών υλικών σκυροδέματος (Διάγραμμα προσδιορισμού της κλασματικής βέλτιστης ποσοστιαίας % κοκκομετρικής σύνθεσης αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος) (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Μέθοδοι βελτιστοποίησης μεγέθους σωματιδίων αδρανών με έμφαση στα μοντέλα πακεταρίσματος σωματιδίων (particle packing models)

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διάφορες εναλλακτικές σχεδιαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης της κατανομής μεγέθους σωματιδίων καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους όσον αφορά τη βελτιστοποίηση του οικολογικού μίγματος σκυροδέματος.

Το ενδιαφέρον για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αδρανών για το σκυροδέμα ξεκίνησε τον 19^ο αιώνα και τότε δημοσιεύτηκαν τα πρώτα σχετικά άρθρα για το σχεδιασμό της βέλτιστης κατανομής σωματιδίων αδρανών και τη δημιουργία αναλυτικών μοντέλων για την πρόβλεψη της αναλογίας των κενών σε ένα μίγμα δύο ομάδων σωματιδίων, στα οποία δε λήφθηκε υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο αυτών ομάδων. Αργότερα, έγινε συστηματική έρευνα για αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφορετικών συστατικών των μιγμάτων σκυροδέματος, που συνεισέφερε σημαντικά στη γνώση σχετικά με το **particle packing** και την περίοδο αυτή αναπτύχθηκαν μοντέλα δύο συστατικών που λάμβαναν υπόψιν την αλληλεπίδραση των συστατικών. Στη συνέχεια, ακολούθησε επέκταση σε μοντέλα περισσότερων συστατικών τα οποία εξετάζουν και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, τα οποία χρησιμοποιούνται έως και σήμερα. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αναπτύχθηκαν παράλληλα προγράμματα βασισμένα σε αναλυτικά packing models όπως το Europack (Idorn, 1995), το RENÉ-LCPC (lcpc.fr) και το 4C-Packing (dti.dk). Επίσης αναπτύχθηκε η μοντελοποίηση διακριτών στοιχείων (discrete element modelling). Αυτά τα μοντέλα προσομοίωσης αρχικά αναπτύχθηκαν σε δισδιάστατο χώρο και έπειτα σε τρισδιάστατο. **Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί Furnas model, Toufar and modified Toufar model, Dewar model, Linear Packing Density Model, Compressible Packing Model, Schwanda model και Linear-Mixture Packing Model αξιολογούνται ως ικανά να προβλέψουν την packing density τυχαίως διατεταγμένων δομών χονδρόκοκκων σωματιδίων.** Ειδικά την τελευταία δεκαετία, η βελτιστοποίηση του μεγέθους των σωματιδίων κέρδισε νέο ενδιαφέρον με την εισαγωγή των υπερρευστοποιητικών για τον σχεδιασμό σκυροδέματος υψηλής απόδοσης και άλλων τύπων σκυροδέματος με μεγάλα ποσοστά πληρωτικών ουσιών (Fennis, 2010).

Τα ζητήματα που αφορούν στο κόστος, στην εργασιμότητα, στην αντοχή σε θλίψη και στην ανθεκτικότητα στη διάρκεια του χρόνου, οδηγούν στη διαμόρφωση της άποψης ότι η σύνθεση με τη μεγαλύτερη «**packing**» **πυκνότητα (αυτή με το μικρότερο ποσοστό κενών) αναμένεται να είναι η πιο οικονομική λύση, επειδή απαιτεί τη μικρότερη ποσότητα συνδετικής ύλης (τσιμεντόπαστα).** Αυτή όμως η πρακτική χρησιμοποιείται λιγότερο σήμερα, επειδή η εφαρμογή της συνήθως δεν παράγει εργάσιμα σκυροδέματα, εκτός του ότι μια τέτοια πρακτική μπορεί να αποδειχθεί ταυτόχρονα και αντιοικονομική, όσον αφορά στη διαδικασία παραγωγής (προετοιμασία) των κοκκομετρικών κλασμάτων που θα αποτελέσουν την τροφοδοσία των αδρανών (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Έτσι κατά κύριο λόγο, εφαρμόζεται η μεθοδολογία που προβλέπει το Αμερικανικό πρότυπο ASTM C33, η οποία όμως και πάλι δεν εξασφαλίζει πάντοτε σκυροδέματα με αποδεκτή εργασιμότητα, λόγω του ευρέος φάσματος μεγεθών των κλασμάτων που χρησιμοποιούνται. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, σε σκυροδέματα με σύνθεση αδρανών χονδρομερούς και λεπτομερούς κλάσματος στα οποία διαπιστώνεται ότι από το λεπτομερές κλάσμα λείπει σημαντικό ποσοστό του υλικού με μεγέθη τεμαχίων από 4.75-9.5 mm,

προτείνεται από τον Shilstone η αντικατάσταση ποσοστού 15-30% του χονδρομερούς υλικού με υλικό κοκκομετρικού εύρους 4.75-9.5 mm (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Η επίτευξη ομοιόμορφης (ομαλής) κοκκομετρικής διαβάθμισης επιβάλλει τη χρήση τριών ή περισσότερων κοκκομετρικών κλασμάτων. Για τη σύνθεση της τροφοδοσίας των αδρανών μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες μέθοδοι (Διάγραμμα «δείκτη χονδρομερούς»/εργασιμότητας, Εξίσωση δύναμης με εκθέτη 0.45 (0.45 Power Curve), Διάγραμμα παραμένουτος % (Percent Retained Chart)). Για τον προσδιορισμό μιας βέλτιστης σύνθεσης αδρανών σκυροδέματος πρέπει να χρησιμοποιηθούν και οι τρεις παραπάνω μεθοδολογίες και να επιστρατευθεί επίσης και η όποια εμπειρία υπάρχει στο εργοτάξιο. Το διάγραμμα «Δείκτη χονδρομερούς/εργασιμότητας» είναι αυτό που πρέπει να χρησιμοποιηθεί αρχικά για την εξασφάλιση σύνθεσης με τις κατάλληλες ρεολογικές ιδιότητες και την παραγωγή ανθεκτικού στο χρόνο σκυροδέματος. Οι άλλες μέθοδοι (Εξίσωση δύναμης με εκθέτη 0.45 και Διάγραμμα παραμένουτος (%)) είναι οι δευτερεύουσες μέθοδοι που επιβεβαιώνουν την ορθότητα των υπολογισμών του διαγράμματος «Δείκτη χονδρομερούς/εργασιμότητας» και προσδιορίζουν τις περιοχές απόκλισης της σύνθεσης από την ομαλή κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Στην Ελλάδα, οι κοκκομετρικές ομάδες τεμαχίων που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος, σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97) και τα διαγράμματα δίνουν το ποσοστό % αθροιστικώς διερχόμενου από κόσκινα τετραγωνικών βροχίδων (σε mm) σύμφωνα με τη Γερμανική τυποποίηση (DIN 4187 και 4188) ή σύμφωνα με την Αμερικανική τυποποίηση ASTM E 11 (Κ. Τσακαλάκης, 2010)..

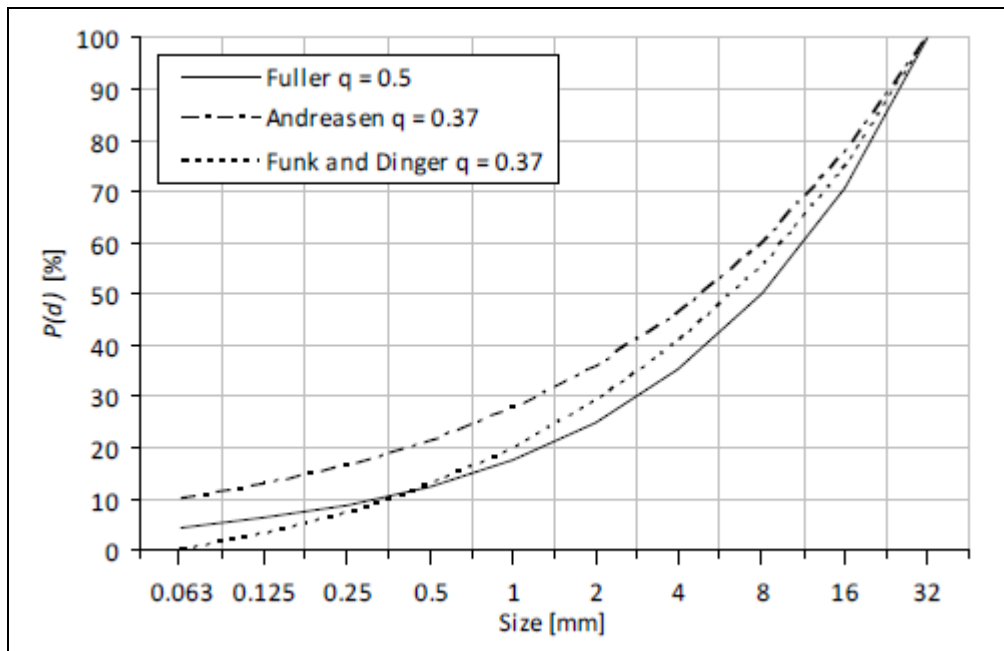
Παρόλη λοιπόν την ανάπτυξη των packing density μοντέλων, στα περισσότερα ευρωπαϊκά πρότυπα, η κατανομή μεγέθους των αδρανών καθορίζεται, όπως προαναφέρθηκε, από την βελτιστοποίηση του μίγματος γύρω από μια ιδανική καμπύλη που αποδεδειγμένα δίνει καλής ποιότητας σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό, η καμπύλη Fuller (1907) χρησιμοποιείται ακόμη από διάφορους ερευνητές. Όμως η ιδανική καμπύλη έχει αλλάξει με την πάροδο των ετών. Η σημαντικότερη αλλαγή ήταν η εφαρμογή του ελάχιστου μεγέθους σωματιδίων από τους Funk και Dinger το 1980. Επιπρόσθετα, διάφοροι ερευνητές πρότειναν διαφορετικές τιμές του εκθέτη της εξίσωσης για να την προσαρμόσουν για το αυτοσυμπυκνούμενο ή το υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα. Η καμπύλη του Fuller αντιπροσωπεύεται από την παρακάτω εξίσωση με $q=0.5$ (Εικόνα 1.8).

$$P(d) = \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^q$$

Συνοψίζοντας, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης της κατανομής μεγέθους σωματιδίων μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες (Fennis, 2010):

- **Καμπύλες βελτιστοποίησης (Optimization curves):** Ομάδες σωματιδίων συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η συνολική κατανομή του μίγματος να προσεγγίζει όσο γίνεται περισσότερο τη βέλτιστη καμπύλη.

- **Μοντέλα Particle packing** (Particle packing models): Πρόκειται για αναλυτικά μοντέλα που προσδιορίζουν την συνολική πυκνότητα (packing density) ενός μίγματος βάσει της γεωμετρίας των ομάδων σωματιδίων που συνδυάζονται.
- **Μοντέλα διακριτών στοιχείων** (Discrete element models): Αυτός ο τύπος μοντέλων παράγει μια «εικονική» σωματιδιακή δομή από μια δεδομένη κατανομή μεγέθους σωματιδίων.



Εικόνα 1.8 Οι ιδανικές καμπύλες των Fuller, Andreasen and Funk and Dinger για μέγιστη και ελάχιστη διάμετρο σωματιδίων ίση προς 32 και 63 μm (Fennis, 2010).

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα σχεδιαστικών μεθόδων

Η ιδανική κατανομή μεγέθους σωματιδίων εξαρτάται από τον τύπο των σωματιδίων, επομένως διαφέρει ανά τύπο σκυροδέματος. Για παράδειγμα, όταν συνδυάζεται στρογγυλεμένη άμμος με αδρομερή ανακυκλωμένα αδρανή, η βέλτιστη κατανομή μεγέθους σωματιδίων διαφέρει από εκείνη ενός μίγματος γωνιώδους άμμου και στρογγυλεμένων αδρομερών αδρανών. Έτσι, **η ιδανική καμπύλη βελτιστοποίησης δεν οδηγεί πάντα σε σύνθεση μίγματος με την μεγαλύτερη packing density**. Όμως για το οικολογικό σκυρόδεμα αυτή η υψηλή packing density είναι σημαντική για την μείωση της περιεχόμενης τιμεντόπαστας και του περιεχομένου σε νερό. Τα διάφορα μίγματα διαφέρουν ανάλογα με τα συστατικά τους, άρα είναι χρήσιμη μια μέθοδος οικολογικού σχεδιασμού σκυροδέματος, βασισμένη στην particle packing density.

Τα μοντέλα particle packing και τα μοντέλα διακριτών στοιχείων έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να υπολογίσουν τη μέγιστη packing density των μιγμάτων σκυροδέματος. Ωστόσο, λόγω των υπάρχοντων περιορισμών σε υπολογιστική ισχύ – ταχύτητα, τα μοντέλα διακριτών στοιχείων δεν είναι κατάλληλα ακόμη για τη βελτιστοποίηση μιγμάτων σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει επειδή η προσομοίωση ενός μίγματος με ευρεία κατανομή μεγέθους σωματιδίων απαιτεί αρκετές ώρες και πρέπει να εξεταστούν αμέτρητα μίγματα για την εύρεση της βέλτιστης σύνθεσης.

Προς το παρόν **τα αναλυτικά μοντέλα particle packing αποτελούν την καλύτερη λύση για την οικολογική βελτιστοποίηση του μίγματος του σκυροδέματος**, καθώς η packing density των σωματιδίων στο σκυρόδεμα (που αναλυτικά παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο 3.4), όπως προαναφέρθηκε, είναι σημαντική από οικολογικής πλευράς, διότι μικρότερος όγκος κενών συνεπάγεται μειωμένες απαιτήσεις σε νερό. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί λιγότερο τσιμέντο διατηρώντας σταθερό το λόγο νερό/τσιμέντο. Η προσθήκη μικρών σωματιδίων συνεισφέρει στη διασωματιδιακή τριβή του μίγματος, το οποίο είναι καλό για τις ιδιότητες του σκυροδέματος σε σκληρυμένη κατάσταση. Όμως όταν τα μικρά σωματίδια συσσωματώνονται, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κακή εργασιμότητα ή υψηλές απαιτήσεις σε νερό. Έτσι, **απαιτείται ένα καλό μοντέλο πρόβλεψης της packing density μιγμάτων που περιέχουν λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά** (Fennis, 2010).

Η καταλληλότητα των διαφόρων μοντέλων particle packing για τα λεπτόκοκκα συστατικά έχει αξιολογηθεί από διάφορους ερευνητές. Τα περισσότερα μοντέλα κρίνονται ως ακατάλληλα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ιδιαίτερα λεπτών σωματιδίων. Μόνο το Linear-Mixture Packing Model και το Linear Packing Density Model λαμβάνουν υπόψη τις διασωματιδιακές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ λεπτομερών σωματιδίων. Ωστόσο, **το Compressible Packing Model (CPM) αξιολογείται ως το πιο ακριβές μοντέλο**, καθώς περιλαμβάνει τη συμπίεση (compaction) και επομένως μπορεί άμεσα να υπολογίσει ξηρή και υγρή πυκνότητα πακεταρίσματος και επιπλέον επιδέχεται επεκτάσεις που αφορούν τα λεπτομερή σωματίδια. Έτσι **για τον σχεδιασμό οικολογικού σκυροδέματος, στο μοντέλο CPM θα πρέπει να προστίθενται και παραμέτροι που αφορούν τις αλληλεπιδράσεις της σωματιδιακής δομής μεταξύ λεπτομερών σωματιδίων (<125μm)**, όπως αναλύεται στο υποκεφάλαιο 3.4.

B) Πρόσθετα σκυροδέματος ή πρόσμικτα

Η ιδέα προσθήκης προσμίκτων στο σκυρόδεμα δεν είναι καινούργια (Pierre-Claude Aïtcin, 2000). Ήδη σε ρωμαϊκά έγγραφα υπάρχουν αναφορές ότι κτίστες χρησιμοποιούσαν ασπράδια αυγών ή αίμα μέσα στο σκυρόδεμα και σήμερα είμαστε σε θέση να εξηγήσουμε και το γιατί η αιμογλοβίνη διασκορπίζει σε καλό βαθμό τα σωματίδια του τσιμέντου Portland. Σήμερα είμαστε σε θέση να εξηγήσουμε επιστημονικά την επίδραση διαφόρων άλλων οργανικών μορίων στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Επιπλέον, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε ότι δεν είναι η ποσότητα του τσιμέντου που χρησιμοποιείται, αλλά η αναλογία νερού / τσιμέντου που επηρεάζει την αντοχή και τη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος.

Η ανάπτυξη τη δεκαετία του 1960 στην Ιαπωνία και τη Γερμανία των συνθετικών πολυμερών με την ικανότητα διασκορπισμού (dispersing properties), που είναι γνωστά σήμερα ως υπερρευστοποιητές (superplasticizers or high-range water reducers), οδήγησε σε τεράστια ανάπτυξη τη βιομηχανία των πρόσμικτων. Η χρήση ενός υπερρευστοποιητικού δίνει σκυρόδεμα σε οποιαδήποτε αναλογία νερού / τσιμέντου και δεν απαιτεί δόνηση για την τοποθέτησή του.

Τα **πρόσθετα σκυροδέματος ή πρόσμικτα** είναι υλικά διαφορετικά από το τσιμέντο, τα αδρανή και το νερό, τα οποία προστίθενται στο σκυρόδεμα πριν από ή κατά τη διάρκεια της ανάμιξης των παραπάνω κύριων πρώτων υλών. Τα πρόσθετα σκυροδέματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα χημικά πρόσθετα και στα υποκατάστατα του τσιμέντου (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

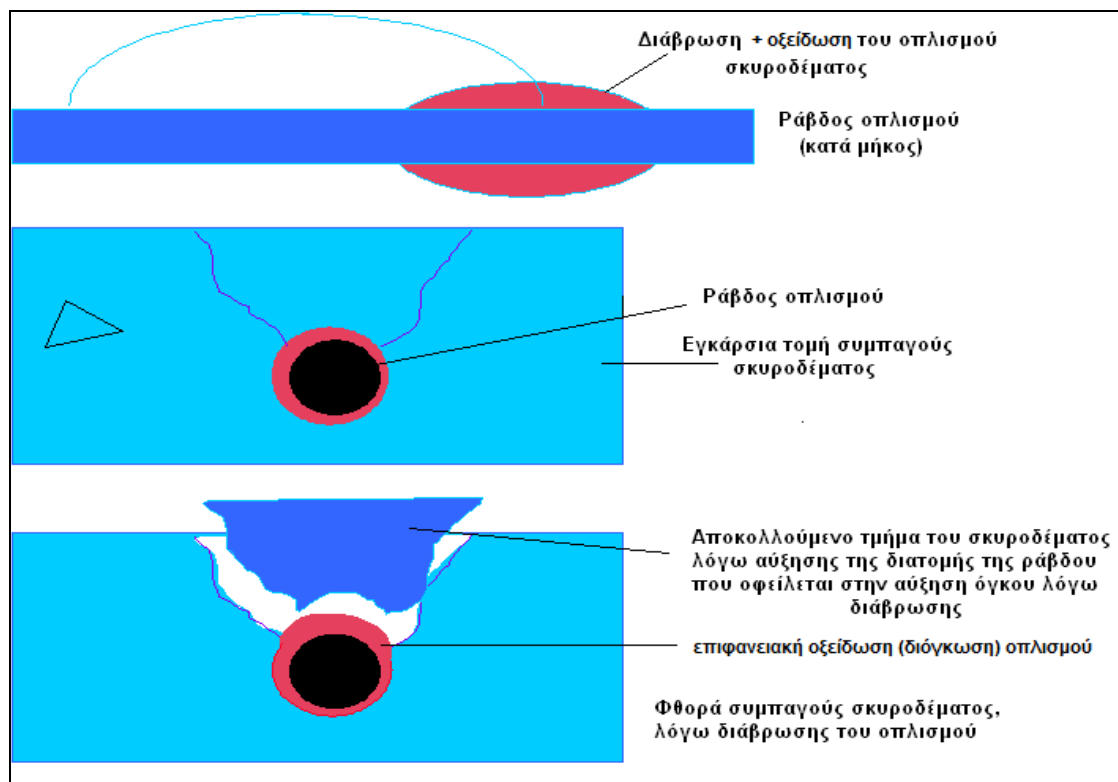
- **Χημικά πρόσθετα**

Τα χημικά πρόσθετα δρουν ευεργετικά στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε βάθος χρόνου και επηρεάζουν την εργασιμότητα, το χρόνο πήξης-σκλήρυνσής του, τη θερμοκρασία συντήρησής του και την αναμενόμενη αντοχή δεδομένου μίγματος σκυροδέματος. Χρησιμοποιούνται **για την αντιμετώπιση:**

1. δύσκολων κατασκευαστικών συνθηκών (σκυροδέτηση σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος),
2. απαιτήσεις αυξημένης αντλησιμότητας του σκυροδέματος (υψηλά κτίρια),
3. απαιτήσεις υψηλών αρχικών αντοχών σκυροδέματος και
4. απαιτήσεις πολύ χαμηλών λόγων νερού/τσιμέντο που επιδρούν στην αντοχή του έργου.

Επιταχυντικό πρόσθετο (accelerating admixture)

Προστίθεται στο σκυρόδεμα με στόχο να μειώσει το χρόνο πήξης και σκλήρυνσης του σκυροδέματος και να επιταχύνει το χρόνο απόκτησης της πρώιμης αντοχής του και η χρήση του ενδείκνυται σε περιπτώσεις που επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη σκυροδέτηση. Η ποσοστιαία μείωση του χρόνου πήξης και σκλήρυνσης ποικίλλει και εξαρτάται από την ποσότητα του προστιθέμενου στο σκυρόδεμα επιταχυντικού αντιδραστηρίου πήξης. Το χλωριούχο ασβέστιο (σε ποσότητες μικρότερες από 2% της ποσότητας του τσιμέντου) χρησιμοποιείται ως ένα φθινό επιταχυντικό, αλλά οι προδιαγραφές σκυροδέματος συνήθως επιβάλλουν την αποφυγή χρήσης χλωριούχων ενώσεων, λόγω της πιθανής διάβρωσης του σιδηροπλισμού (Εικόνα 1.9), σε περίπτωση οπλισμένων σκυροδεμάτων, γεγονός που έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή του σκυροδέματος σε βάθος χρόνου (durability) και καλύπτονται από την προδιαγραφή ASTM C 494 (Types B και D).



Εικόνα 1.9 Δράση της διάβρωσης του σιδηροπλισμού επί του οπλισμένου σκυροδέματος (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Επιβραδυντικό πήξης (Retarding admixture)

Η κύρια δράση του είναι προς την κατεύθυνση της επιμήκυνσης του χρόνου (κατά μία 1 ώρα ή περισσότερο) εντός του οποίου το έτοιμο σκυρόδεμα πρέπει να μεταφερθεί, να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί. Συνήθως προστίθεται στο σκυρόδεμα κατά την παραγωγή του με στόχο να επιβραδύνει την πήξη και σκλήρυνσή του, ιδιαιτέρως όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες κατά τη σκυροδέτηση, ώστε να ελεγχθούν φαινόμενα επιτάχυνσης των αντιδράσεων ενυδάτωσης. Χρησιμοποιείται επίσης, όταν για «αισθητικούς» λόγους της εμφάνισης του σκυροδέματος απαιτείται αρκετός χρόνος για τη διαμόρφωση της εμφανούς επιφάνειάς του, δηλαδή δεν είναι επιθυμητή π.χ. η εμφάνιση στην εξωτερική του επιφάνεια του σκυροδέματος των κόκκων των αδρανών υλικών. Στις περιπτώσεις αυτές επαλείφεται εσωτερικά ο ξυλότυπος με επιβραδυντικό πρόσθετο πήξης, το οποίο συντελεί τοπικά στην επιβράδυνση της ταχύτητας πήξης-σκλήρυνσης του σκυροδέματος. Πολλά επιβραδυντικά της πήξης δρουν επίσης θετικά στην κατεύθυνση της μείωσης του απαιτούμενου νερού για την ενυδάτωση του τσιμέντου με αποτέλεσμα, λόγω της μείωσης του χρησιμοποιούμενου νερού, να παράγεται σκυρόδεμα αυξημένης τελικής αντοχής (καλύπτονται από την προδιαγραφή ASTM C 494 Types B και D).

Αερακτικά (Air-entraining admixtures or agents)

Είναι υγρές χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μικροσκοπικών φυσαλίδων αέρα στη δομή του σκυροδέματος με στόχο τον έλεγχο των φαινομένων αποσάθρωσης, λόγω γένεσης εσωτερικών τάσεων σε περιπτώσεις συχνού παγώματος και τήξης (freeze and thawing) του νερού του σκυροδέματος και σε περιπτώσεις επιφανειακής φθοράς του σκυροδέματος από τη δράση χημικών αντιπαγωτικών (de-icers). Στις περιπτώσεις αυτές οι μικροσκοπικές φυσαλίδες αέρα, στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος, παραλαμβάνουν και απορροφούν τις δημιουργούμενες τάσεις.

Γενικώς, για κάθε 1% αύξηση του περιεχόμενου αέρα στο σκυρόδεμα προκαλείται μείωση της θλιπτικής αντοχής του κατά 5% περίπου. Παρόλαυτά, η *προσθήκη αερακτικών* αυξάνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος, συμβάλει στη μείωση της τάσης για απόμειξη (διαφορική κατά μέγεθος ταξινόμηση μέσα στο σκυρόδεμα) των αδρανών, μειώνει το φαινόμενο της «εξίδρωσης» (bleeding) στην επιφάνεια του σκυροδέματος και επίσης μειώνει τη διαπερατότητά του, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στη διατήρηση της καλής κατάστασής του σε βάθος χρόνου (durability).

Πρόσθετα μείωσης της αναγκαίας ποσότητας νερού (water reducing admixtures) ή υπερρευστοποιητικά (superplasticizers)

Είναι χημικές ενώσεις που συμβάλλουν στη μείωση του απαιτούμενου νερού στην παραγωγή σκυροδέματος, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος σε βάθος χρόνου και την αύξηση της κάθισης (εργασιμότητα) του σκυροδέματος για ίδια περιεκτικότητα σε νερό (ίδιο λόγο νερό/τσιμέντο). Τα αντιδραστήρια αυτά συμβάλλουν επίσης στην αύξηση της αντίστασης του σκυροδέματος σε προσβολή από θειικά ιόντα και στη μείωση της περατότητας του (πορώδες). Η μείωση του νερού που προκαλούν είναι συνήθως της τάξης του 5-10% και καλύπτονται από την προδιαγραφή ASTM C 494 (Type A). Τα ευρέως φάσματος πρόσθετα (High range water reducers, HRWR) αυτής της κατηγορίας μπορούν να

προκαλέσουν μείωση της τάξης του 12-30% με διατήρηση εξαιρετικής εργασιμότητας του σκυροδέματος, είναι όμως σχετικώς ακριβά και δεν συμφέρει να χρησιμοποιούνται σε συνήθειες αλλά μόνο σε ειδικές κατασκευές από σκυρόδεμα. Τα υπερ-ρευστοποιητικά καλύπτονται από τις προδιαγραφές ASTM C 494 (Types F και G) και ASTM C 1017 (Types 1 και 2). Τα σκυροδέματα στα οποία χρησιμοποιούνται αυτού του τύπου τα υπερρευστοποιητικά αποκτούν τη συνηθισμένη κάθιση 75-100 mm εντός χρονικού διαστήματος 30-60 min.

Στεγανοποιητικά (waterproofing admixtures)

Αποβλέπουν στη μείωση του προβλεπόμενου νερού στο αρχικό μίγμα, στη διευκόλυνση της καλής συμπίκνωσης, στη βελτίωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος ώστε να αποφευχθούν κοιλότητες στη μάζα του, στην αποφυγή ρηγματώσεων που οφείλονται σε συστολές και διαστολές, στην πλήρωση πόρων και τριχοειδών κενών μέσα στη μάζα του τσιμεντοκονιάματος του σκυροδέματος (Ε. Ι. Πανταλέων).

• Υποκατάστατα του τσιμέντου

Είναι συνήθως φυσικά αργιλοπυριτικά υλικά ή βιομηχανικά παραπροϊόντα (ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα, αλεσμένη σκωρία υψικαμίνων ή ατμοί πυριτίου), τα οποία λόγω της ορυκτολογικής τους σύστασης μπορούν να υποκαταστήσουν σε ποσοστό 15-35% κατά βάρος το χρησιμοποιούμενο τσιμέντο στο σκυρόδεμα. Από τη φύση τους δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες, αλλά ενώνονται εύκολα με το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) που παράγεται κατά την ενυδάτωση των διαφόρων φάσεων του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου και παράγουν ενώσεις με υδραυλικές ιδιότητες. Η συμβολή τους στην παραγωγή του σκυροδέματος είναι η παρακάτω:

1. Αυξάνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος
2. Βελτιώνουν την εμφάνιση των κατασκευών από σκυρόδεμα (φινίρισμα)
3. Μειώνουν την εκλυόμενη θερμότητα από την ενυδάτωση του τσιμέντου
4. Έχουν χαμηλότερο κόστος (κυμαινόμενο μεταξύ 25-50%) από το τσιμέντο που αντικαθιστούν, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος του σκυροδέματος και κατά συνέπεια της κατασκευής.

Τα υλικά αυτά μπορούν να προσδώσουν στο σκυρόδεμα οικολογικές ιδιότητες, όπως αναπτύσσεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

1.1.5 Ανθεκτικότητα τσιμέντου - σκυροδέματος στις συνθήκες περιβάλλοντος

Το σκυρόδεμα είναι ένα βασικό προϊόν για μία ασφαλή και άνετη στέγαση με αξιόπιστη μοντέρνα υποδομή. Όμως, ο γρήγορος ρυθμός ανοικοδόμησης των πόλεων και η πλημμελής τήρηση των σχετικών χαμηλών προδιαγραφών οδηγούν στην ανάγκη επισκευών και σε πλήρη αντικατάσταση ορισμένων κατασκευών. Σήμερα, το πρόβλημα της φθοράς των κατασκευών εμφανίζεται ακόμη μεγαλύτερο λόγω των περιβαλλοντικών επιδράσεων από την ατμοσφαιρική ρύπανση, με σημαντικές

επιπτώσεις για την εθνική οικονομία. Έτσι, αποκτά ιδιαίτερη σημασία η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Ανθεκτικότητα ονομάζεται η ιδιότητα του σκυροδέματος να αντιστέκεται για όλη τη διάρκεια της ζωής του στις δυσμενείς επιδράσεις του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να μην παθαίνει ζημιές, οι οποίες να μειώνουν την ικανότητα του να αναλαμβάνει φορτία για τα οποία σχεδιάστηκε. Οι παράγοντες που επιδρούν στην ανθεκτικότητα είναι: η σύσταση του τσιμέντου, ο λόγος νερού προς τσιμέντο, το πορώδες, η συμπίκνωση, η συντήρηση, η ύπαρξη ρωγμών, ο σεισμός, οι θερμοκρασιακές μικροαλλαγές, ο παγετός, η πυρκαγιά και η επίδραση των χημικών δράσεων. Οι σπουδαιότερες χημικές δράσεις από την πλευρά της χημείας τσιμέντου και του σκυροδέματος είναι: α) η ενανθράκωση, β) η προσβολή από θειικά, γ) η προσβολή από χλωριόντα, δ) το πορώδες και ε) τα ιόντα του νατρίου, τα οποία μεταφέρονται μέσω του νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος και αντιδρούν με τα αδρανή (Α. Μοροπούλου, 2009). Οι τρεις πρώτες χημικές δράσεις αναλύονται ως εξής:

Ενανθράκωση

Από την στιγμή που δημιουργείται το σκυρόδεμα υφίσταται επίθεση από το φυσικό περιβάλλον. Το σκυρόδεμα έχει πολύ υψηλό pH (αλκαλικό) και το CO₂ της ατμόσφαιρας προσροφάται από αυτό, λόγω της τάσης εξουδετέρωσης του υψηλού pH. Η ενανθράκωση είναι η χημική αντίδραση του CO₂ με το Ca(OH)₂ του σκυροδέματος. Το σχηματιζόμενο CaCO₃ έχει μεγαλύτερο μοριακό όγκο, μειώνει το pH στο 9 και έτσι δεν προστατεύεται πια ο οπλισμός. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ρηγματώσεων λόγω του σχηματισμού οξειδίων του σιδήρου.

Προσβολή από θειικά

Πλούσιες πηγές θεικών αλάτων είναι τα νερά των υπονόμων. Το αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης είναι ο σχηματισμός του ετρινγκίτη και του θωμασίτη. Ο σχηματισμός του ετρινγκίτη είναι ταχύτατος, μέσα σε λίγες ώρες, σε πολύ καθορισμένες συνθήκες εμπλέκεται στην δημιουργία ρηγματώσεων στο σκυρόδεμα. Ο θωμασίτης έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον ετρινγκίτη, με τη μόνη διαφορά ότι δημιουργείται σε ψυχρό κλίμα (5°C) και προκαλεί θρυμματισμούς και αποκολλήσεις στο σκυρόδεμα.

Προσβολή από χλωριόντα

Τα χλωριόντα σχηματίζουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος ηλεκτροχημικά κελιά και η φθορά επικεντρώνεται τοπικά στον οπλισμό. Η προσβολή από χλωριόντα είναι η κύρια αιτία διάβρωσης του σιδηροοπλισμού και αιτία καταστροφής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο ρυθμός διείδυσης των χλωριόντων επηρεάζεται από τη δεσμευτική ικανότητα του σκυροδέματος και σημαντικός είναι ο επιβαρυντικός ρόλος της ενανθράκωσης. Είναι δυνατή η εξαγωγή κριτηρίων ανθεκτικότητας με τη βοήθεια εμπειρικών μαθηματικών μοντέλων.

Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι για ποιοτική κατασκευή, χωρίς φθορές, πρέπει να τηρούνται οι κανόνες, τα όρια και η υπάρχουσα νομοθεσία, από όλους τους

φορείς που εμπλέκονται στην κατασκευή. Από το 1988, οι διάφορες Επιτροπές της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Τυποποίησης (CEN) ξεκίνησαν την σύνταξη διαφόρων προτύπων για τα υλικά, με σκοπό την λήψη μέτρων για όλη την ευρωπαϊκή αγορά. Σήμερα στο Σκυρόδεμα ισχύει ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97), όπως προαναφέρθηκε, ο οποίος αναθεωρήθηκε το 2002, όταν έγινε εισαγωγή των διατάξεων για το τσιμέντο βάσει του ΕΛΟΤ EN 197-1. Το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 206-1 δεν έχει θεσμοθετηθεί ακόμα. Με το EN 206 ορίζεται διάρκεια ζωής των έργων η 50ετία, ενώ επιφέρει και δύο βασικές καινοτομίες. Η πρώτη είναι οι κατηγορίες έκθεσης των έργων σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Για κάθε κατηγορία έκθεσης υπάρχουν απαιτήσεις: α) για μέγιστο λόγο νερού/τσιμέντο, β) ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, γ) ελάχιστη περιεκτικότητα σε εγκλωβισμένο αέρα, δ) ελάχιστη κατηγορία αντοχής από C20/25 έως C35/45. Η δεύτερη είναι ο έλεγχος της παραγωγής και η αξιολόγηση συμμόρφωσης με έκδοση «Πιστοποιητικού Συμμόρφωσης» CE (Certificate European) από αναγνωρισμένο φορέα. Όλα αυτά θα συνηγορήσουν στην βελτίωση του επιπέδου ποιότητας τόσο στην παραγωγή όσο και στην τελική κατανάλωση προς όφελος του τελικού καταναλωτή. **Για μία καλή και ποιοτική κατασκευή ισχύει το τρίπτυχο «μεγάλη διάρκεια ζωής – μεγάλη ανθεκτικότητα – μικρή συντήρηση»** (Α. Μοροπούλου, 2009).

1.1.6 Ευρωπαϊκά πρότυπα και παραγόμενοι τύποι τσιμέντου

Σύμφωνα με απόφαση της ΕΕ, από 01/04/01 τα τσιμέντα που θα κυκλοφορούν σε όλες τις χώρες κράτη μέλη πρέπει να είναι πιστοποιημένα, να φέρουν σήμανση CE και να είναι σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, τα οποία είναι:

- **EN 197-1: Τσιμέντο Μέρος-1:** *«Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα»* και
- **EN 197-2 : Τσιμέντο Μέρος-2 :** *«Αξιολόγηση συμμόρφωσης»*

Τα παραπάνω ευρωπαϊκά πρότυπα έχουν υιοθετηθεί και εφαρμόζονται στην Ελλάδα ως Ελληνικά Πρότυπα από τον ΕΛΟΤ (Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης). Είναι γνωστά ως **ΕΛΟΤ EN 197-1** και **ΕΛΟΤ EN 197-2**.

Το τσιμέντο, όπως και τα άλλα δομικά υλικά, ως υλικό που διέπεται από την ευρωπαϊκή οδηγία CPD 89/106, λόγω της σπουδαιότητάς του για την ασφάλεια των δομικών κατασκευών, θα πρέπει να πληροί ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις, όσον αφορά στις ιδιότητες και στη σταθερότητα της ποιότητας παραγωγής του. Για τους παραπάνω λόγους η ποιότητα του τσιμέντου, σε αντίθεση με άλλα υλικά, ελέγχεται και πιστοποιείται με το αυστηρότερο σύστημα αξιολόγησης συμμόρφωσης από αναγνωρισμένο φορέα πιστοποίησης, με ανεξάρτητη εξωτερική δειγματοληψία.

Κατά την σύνταξη των παραπάνω προτύπων συμπεριλήφθηκαν και κωδικοποιήθηκαν όλα τα κοινής αποδοχής και ευρείας χρήσης τσιμέντα, που παράγονται στις χώρες μέλη της ΕΕ, με στόχο τη δημιουργία κοινής ορολογίας για όλους τους μελετητές - χρήστες - κατασκευαστές δομικών έργων της ΕΕ (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Τύποι και κατηγορίες ευρωπαϊκών τσιμέντων

Οι τύποι των τσιμέντων που παρασκευάζονται σε κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξαρτώνται από τις διαθέσιμες πρώτες ύλες, όπως επίσης από τη ζήτηση κάθε τύπου τσιμέντου. Έτσι, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων. Οι τύποι

αυτοί είναι το κοινό τσιμέντο Portland, τα τσιμέντα με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα (πυριτική ή ασβεστιτική), τσιμέντα με σκωρία υψικαμίνου, τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, με ασβεστόλιθο κλπ. Γι' αυτό το λόγο, το πρότυπο προβλέπει μεγάλο αριθμό προϊόντων τσιμέντου (27), τα οποία όμως δεν κυκλοφορούν κατ' ανάγκη όλα σε κάθε χώρα μέλος. Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται τα ποσοστά (%) υποκατάστασης του κλίνκερ από άλλα συστατικά στα πλαίσια του αναθεωρημένου Ευρωπαϊκού Προτύπου (prEN 197-1). Όμως, το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 προδιαγράφει σε γενική μορφή τους εξής πέντε (-5-) τύπους τσιμέντου (Πίνακας 1.4).

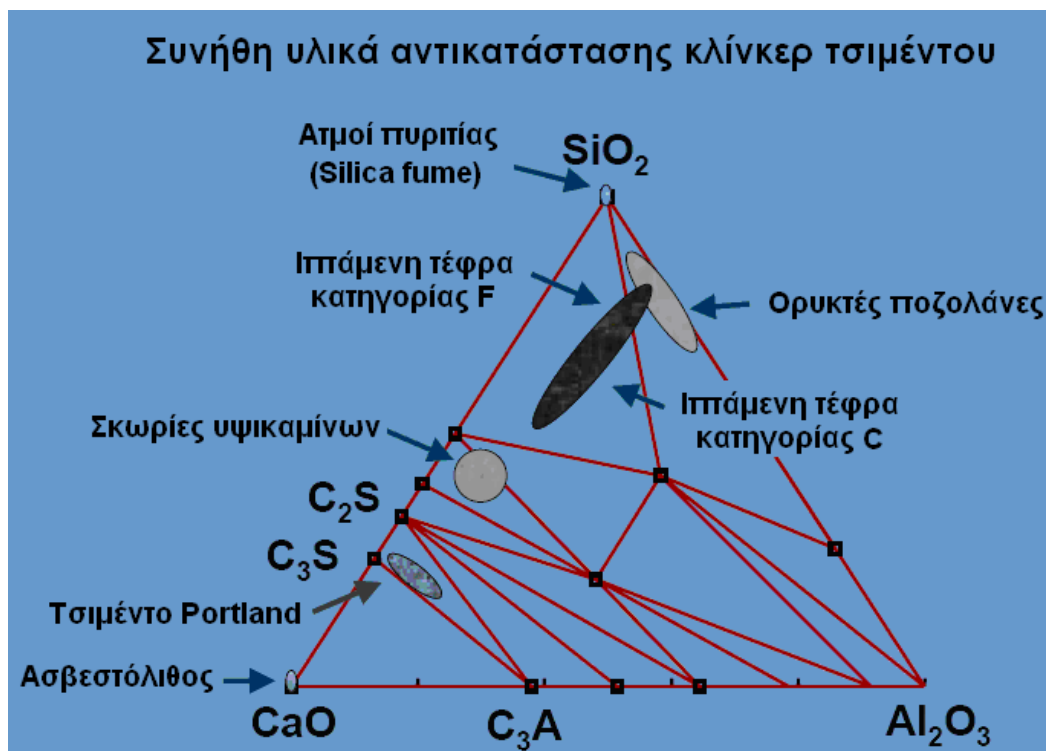
Πίνακας 1.3 Χαρακτηριστικά τσιμέντων του Ευρωπαϊκού Προτύπου (prEN 197-1) (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Όνομα τσιμέντου		Τύπος τσιμέντου	% Ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ
CEM I	A	Portland cement (Κοινό τσιμέντο)	0-5
	B	Portland cement (Κοινό τσιμέντο)	0-5
CEM II	A	Portland-slag cement	6-20
		Portland-silica fume cement	
		Portland-pozzolana cement	
	B	Portland-fly ash cement Portland-burnt shale cement Portland-limestone cement Portland-composite cement	21-35
CEM III	A	Blastfurnace cement (Σκωριοτσιμέντα)	36-65
	B		66-80
	C		81-95
CEM IV	A	Pozzolanic cement (Ποζολανικά τσιμέντα)	11-35
	B		36-55
CEM V	A	Composite cement (Σύνθετα τσιμέντα)	36-60
	B		62-80

Είναι γνωστό ότι, ποσοστό του κλίνκερ, μπορεί να αντικατασταθεί από άλλα συστατικά (φυσικά, όπως ποζολάνες) ή βιομηχανικά παραπροϊόντα (σκωρίες υψικαμίνων, ιπτάμενη τέφρα ή ατμούς πυριτίας), τα οποία παρουσιάζουν ευνοϊκά χαρακτηριστικά, δηλαδή ποζολανικές ιδιότητες κατά την ενυδάτωση, που τα καθιστούν κατάλληλα για υποκατάσταση μέρους του κλίνκερ στην παραγωγή και χρήση του τσιμέντου (Κ. Τσακαλάκης, 2010). Η συμβατότητα αυτών των υλικών με το τσιμέντο φαίνεται από τη θέση τους στο τριμερές διάγραμμα CaO-SiO₂-Al₂O₃ (Εικόνα 1.10).

Επίσης, το νέο πρότυπο προδιαγράφει και 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή σε θλίψη κονιάματος πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1. Κάθε κατηγορία αντοχής ορίζεται από ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής σε θλίψη (28 ημερών) χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη κατηγορία. Κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες πρώιμης αντοχής N και R (Πίνακας 1.5). Η συμμόρφωση των τσιμέντων ως προς τα

όρια αντοχών είναι στατιστική και περιγράφεται στο πρότυπο (Κ. Τσακαλάκης, 2010).



Εικόνα 1.10 Συνήθη υλικά με ποζολανικές ιδιότητες (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Πίνακας 1.4 Βασικοί τύποι τσιμέντων ευρωπαϊκού προτύπου (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

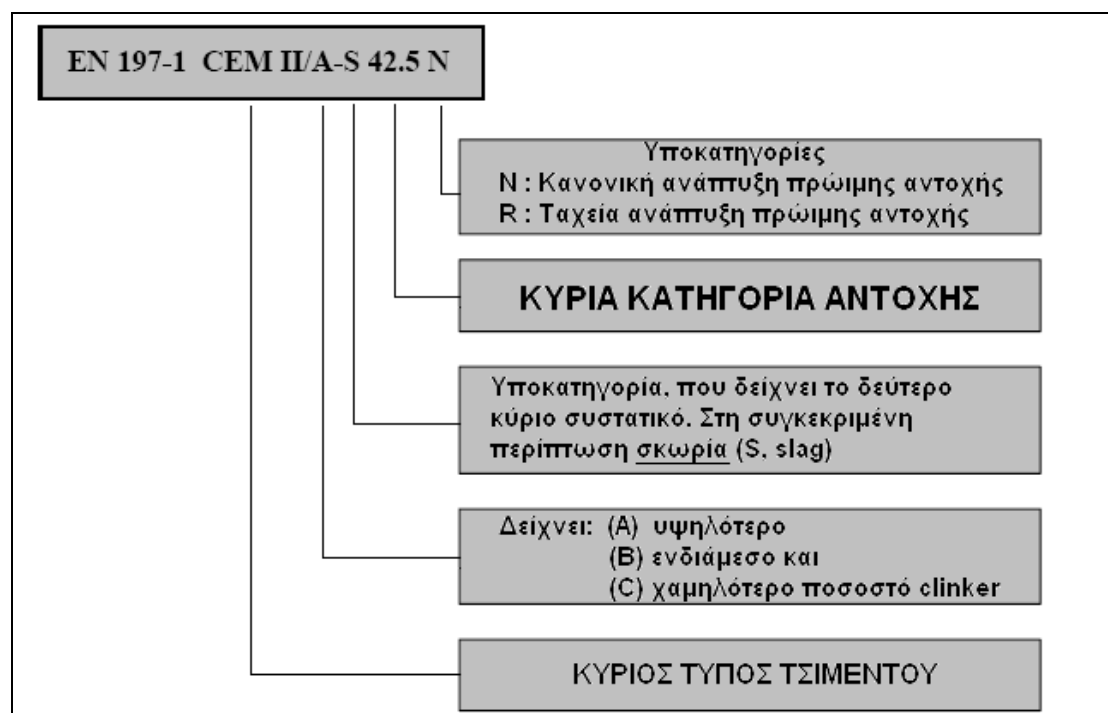
ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Κοινό τσιμέντο Portland
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο Portland
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο

Πίνακας 1.5 Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

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	≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-			
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	
42.5 R	≥ 20.0	-			
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-	
52.5 R	≥ 30.0	-			

Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1, άρα και με το ΕΛΟΤ EN 197-1 (Εικόνα 1.11), καθορίζεται από:

- τον κύριο τύπο τσιμέντου,
- το ποσοστό clinker που περιέχεται στο τσιμέντο,
- τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού,
- την κατηγορία αντοχής,
- το επίπεδο της πρώιμης αντοχής.



Εικόνα 1.11 Συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

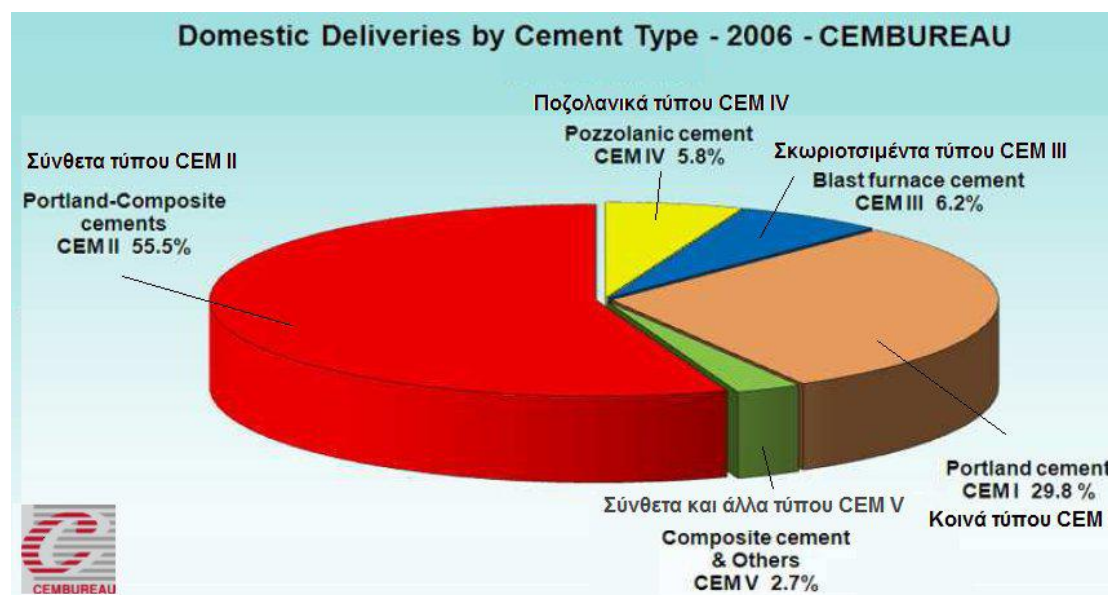
Τα κύρια δευτερεύοντα συστατικά, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων και εμφανίζονται στον αναλυτικό πίνακα του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197-1, δίνονται παρακάτω με το χαρακτηριστικό κεφαλαίο λατινικό γράμμα που αναφέρεται σε κάθε ένα από αυτά (Κ. Τσακαλάκης, 2010):

- **S** – blastfurnace slag (σκωρία υψικαμίνων)
- **D** – silica fume (ατμοί πυριτίας)
- **P** – natural pozzolana (φυσική ποζολάνη)
- **Q** – natural calcined pozzolana (φυσική ποζολάνη μετά από πύρωση)
- **V** – siliceous fly ash (πυριτική ιπτάμενη τέφρα)
- **W** – calcareous fly ash (ασβεστούχα ιπτάμενη τέφρα)
- **L, LL** – limestone (ασβεστόλιθος)
- **T** – burnt shale (τέφρα καύσης βιτουμενιούχων σχιστολίθων)
- **M** – two or more of the above (μίγμα των παραπάνω).

Η ποσοστιαία % κατανομή των παραγόμενων (κατά τύπο) ευρωπαϊκών τσιμέντων δίνεται στην Εικόνα 1.12. **Μεγάλο μερίδιο της ευρωπαϊκής παραγωγής αφορά σε σύνθετα τσιμέντα (CEM II), κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους** (μείωση των εκπεμπόμενων ποσοτήτων CO₂, αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων). Οι

ποσότητες αυτές CO₂ είναι πολύ σημαντικές στην περίπτωση της τσιμεντοβιομηχανίας και αφορούν:

- πρωτογενώς στην *πύρωση* (διάσπαση) του ασβεστολίθου και στην *καύση ορυκτών καυσίμων* στην κυρίως μεταλλουργική διεργασία και
- δευτερογενώς στην *καύση ορυκτών καυσίμων* για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλίσκεται για την παραγωγή τσιμέντου.



Εικόνα 1.12 Ποσοστιαία % κατανομή (κατά τύπο) των παραγόμενων ευρωπαϊκών τσιμέντων (CEMBUREAU, 2006).

1.2 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στο παρόν υποκεφάλαιο στόχος είναι να καταδειχθεί μέσω της αξίας των παραγόμενων προϊόντων, η οποία περιγράφηκε παραπάνω, η ανάγκη για ορθολογική παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη τις καινοτομίες της μεταλλευτικής, μεταλλουργικής και περιβαλλοντικής τεχνολογίας.

Επιχειρείται λοιπόν η καταγραφή των περιβαλλοντικών προβλημάτων, που έχουν σχέση με το σύστημα παραγωγής του σκυροδέματος, αλλά και των ενεργειακών καταναλώσεων στις διαδικασίες παραγωγής του. Τα περιβαλλοντικά προβλήματα αναφέρονται στην τσιμεντοβιομηχανία και στις διαδικασίες παραγωγής και χρήσης του σκυροδέματος και είναι κυρίως επιπτώσεις στο αέριο και υδάτινο περιβάλλον. Δεν πρέπει να παραγνωριστούν τα προβλήματα που υπάρχουν στις διαδικασίες εξόρυξης και μεταφοράς των πρώτων υλών του τσιμέντου και των αδρανών υλικών του σκυροδέματος, όπως επίσης και αυτά που αφορούν στην οπτική ρύπανση και στις δονήσεις, τα οποία είναι σοβαρά προβλήματα, αλλά κατά κοινή ομολογία, ευκολότερα αντιμετωπίσιμα. Διατυπώνονται και προτάσεις αντιμετώπισης και ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τέλος, αναλύονται οι στόχοι για

την αιεφόρο κατασκευή της Ευρωπαϊκής όσο και της Ελληνικής Πλατφόρμας Έρευνας και Τεχνολογίας.

1.2.1 Κατανάλωση ενέργειας στην τσιμεντοβιομηχανία και τη βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος

Η σημερινή κατανάλωση ενέργειας στη βιομηχανία τσιμέντου αντιπροσωπεύει το 2% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και σχεδόν το 5% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται από τη βιομηχανία. Το κόστος της ενέργειας αντιπροσωπεύει το 20-30% του κόστους παραγωγής του τσιμέντου. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από την καύση στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.6. Η μεγαλύτερη ποσότητα της ενέργειας που καταναλώνεται στην παραγωγή τσιμέντου χρησιμοποιείται για τη λειτουργία της περιστροφικής καμίνου.

Πίνακας 1.6 Ποσοστιαία (%) κατανάλωση καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου στην ΕΕ (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

Είδος καυσίμου	Ποσοστό % κ.β.
Ανθρακας	36
Petcoke	39
Λιγνίτης	6
Πετρέλαιο	7
Φυσικό αέριο	2
Εναλλακτικά καύσιμα	10
Σύνολο	100

Καταναλώνεται επίσης και ηλεκτρική ενέργεια περίπου 100 kWh/t τσιμέντου (ποσοστό 5-8% της συνολικής), που κατανέμεται ως εξής:

- 27.5% στην προετοιμασία των πρώτων υλών,
- 27.7% στις διεργασίες παραγωγής του κλίνκερ (κύκλωμα περιστροφικής καμίνου),
- 39.8% στις διεργασίες παραγωγής του τελικού προϊόντος (άλεση του κλίνκερ κ.λπ.), και
- 5% σε άλλες διεργασίες του συστήματος παραγωγής.

Είναι γνωστό ότι, συμπεριλαμβανομένης και της κατανάλωσης πετρελαίου στην εξόρυξη και μεταφορά των πρώτων υλών, το 1975 η παραγωγή του τσιμέντου απαιτούσε 1870 kWh/t παραγομένου τσιμέντου. Η παραπάνω κατανάλωση ενέργειας ανά t τσιμέντου αναφέρεται και από τον A. M. Neville (1975), που δίνει τιμή 1.8 MWh/t τσιμέντου για ξηρή μέθοδο παραγωγής τσιμέντου (dry process). Μετά από 25 χρόνια περίπου, η απαιτούμενη ενέργεια είχε μειωθεί κατά 25% περίπου από 7.2 σε 5.5 GJ/t τσιμέντου. Τα 5.5 GJ/t τσιμέντου αντιστοιχούν σε 1528 kWh/t τσιμέντου. Η αντιστοιχία αυτή σε kWh/t είναι τελείως ενδεικτική της ενεργειακής έντασης της διεργασίας (Πίνακες 1.7 και 1.8).

Η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας είναι το σπουδαιότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος. Επειδή δε η παραγωγή τσιμέντου είναι μία ενεργοβόρος βιομηχανική δραστηριότητα, κατά συνέπεια και στο

σκυρόδεμα ως δευτερογενές προϊόν ενσωματώνονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Στον Πίνακα 3 δίνεται η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας ανά t τσιμέντου. Στον Πίνακα 4 γίνεται αναγωγή της ενέργειας ανά m³ σκυροδέματος, σύμφωνα με τις κατά βάρος αναλογίες πρώτων υλών στο σκυρόδεμα. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι η ενσωματωμένη ενέργεια ανά m³ σκυροδέματος, οφείλεται κατά 91.5% περίπου στην ενέργεια που χρειάστηκε στην παραγωγή του περιεχόμενου τσιμέντου (εξόρυξη πρώτων υλών, μεταφορά, θραύση, λειοτρίβηση, περιστροφική κάμιнос, άλεση του κλίνκερ κ.λπ.) και μόνο το 8.5% στα αδρανή υλικά του σκυροδέματος.

Πίνακας 1.7 Είδος καυσίμου και θερμική ενέργεια για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου κατά την Portland Cement Association (PCA) (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

<i>Είδος καύσιμου</i>	<i>Ενέργεια/t τσιμέντου</i>		<i>Ποσοστό ενέργειας (%)</i>
	<i>BTU × 10³</i>	<i>kWh</i>	
Προϊόντα πετρελαίου (diesel, βενζίνη κ.λπ.)	69.5	20.4	1.2
Φυσικό αέριο	524.8	153.8	9.0
Άνθρακας και κωκ	3885.3	1138.4	66.5
Καύσιμο από απόβλητα ¹	315.3	92.4	5.4
Ηλεκτρική ενέργεια ²	1050.3	307.8	17.9
<i>Σύνολο</i>	<i>5215 + 420.1</i>	<i>1527.9 + 123.1</i>	<i>100.0</i>

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

² Ως ηλεκτρική ενέργεια εδώ λαμβάνεται το θερμικό δυναμικό (θερμογόνος δύναμη) της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρείται ότι είναι περίπου 2.5 φορές του πραγματικού αποδιδόμενου (μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας) δηλαδή (2.5 * 420.1 * 10³ BTU = 2.5 * 123.1 kWh, με απόδοση 40%).

Πίνακας 1.8 Ενέργεια στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

<i>Υλικό</i>	<i>Βάρος (%)</i>	<i>kWh/t πρώτης ύλης</i>		<i>kWh/m³ σκυροδέματος</i>	<i>Μάζα πρώτων υλών (t/m³ σκυροδέματος)</i>	<i>Ενέργεια (%)</i>
		<i>Παραγωγή</i>	<i>Μεταφορά</i>			
Τσιμέντο	12	1651	162.8	539.4	0.297	91.6
Άμμος	34	1.6	12.0	11.4	0.843	1.9
Χονδρομερή αδρανή	48	15.1	17.1	38.3	1.190	6.5
Νερό	6	–	–	–	0.149	–
Αέρας	–	–	–	–	–	–
Σκυρόδεμα	100	1859.6		589.1	2.479	100.0

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι τομείς του τσιμέντου και του σκυροδέματος είναι από τους δυναμικότερους της ελληνικής βιομηχανίας με σημαντική συμμετοχή στο ΑΕΠ και με σημαντική εισροή συναλλάγματος. Η σχέση τους με την εξορυκτική, τη μεταλλουργική βιομηχανία και τη βιομηχανία κατασκευής τεχνικών έργων είναι στενή και είναι γνωστό ότι εξασφαλίζουν σημαντικό αριθμό θέσεων εργασίας στους αντίστοιχους επιστημονικούς κλάδους.

Η τσιμεντοβιομηχανία είναι εξαιρετικά ενεργοβόρος βιομηχανία και συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές CO₂ και άλλων αερίων εκπομπών στην ατμόσφαιρα. Είναι αναγκαίο λοιπόν το σκυροδέμα 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 τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα, ανακύκλωση του σκυροδέματος από κατεδαφίσεις κ.λπ.).

1.2.2 Περιβαλλοντικά προβλήματα από την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος

Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

Εδώ, αναλύεται το **περιβαλλοντικό αποτύπωμα του τσιμέντου το οποίο ευθύνεται για περισσότερο από το 50% των εκπομπών CO₂ στο μίγμα του σκυροδέματος**. Παρουσιάζονται δηλαδή οι πηγές παραγωγής και οι ποσότητες CO₂ που εκλύονται από την τσιμεντοβιομηχανία.

Το «φαινόμενο του θερμοκηπίου» που προέρχεται από τις εκπομπές διαφόρων αερίων, των λεγόμενων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (διοξείδιο του άνθρακα - CO₂, μεθάνιο - CH₄, κ.λπ.) αναμένεται σύμφωνα με υπολογισμούς να προκαλέσει μια αύξηση στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά 1.9-5.3°C. Το πρόβλημα αυτό για να αντιμετωπιστεί επιβάλλει τον έλεγχο των αερίων εκπομπών στην ατμόσφαιρα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει συστήσει στα μέλη της την εφαρμογή νέας φορολογικής πολιτικής των καυσίμων και της ενέργειας ώστε οι εκπομπές του CO₂ να περιοριστούν στα επίπεδα του 1990.

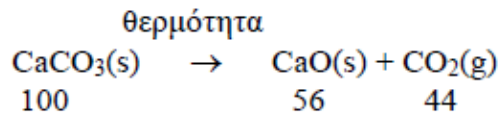
Παγκοσμίως υπολογίζεται ότι η βιομηχανία τσιμέντου παράγει 1.6 δισ. t CO₂, που αντιστοιχούν στο 5% περίπου των συνολικών εκπομπών CO₂ από όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Είναι λοιπόν υπεύθυνη για μεγάλες ποσότητες εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα. Οι εκπομπές αυτές προέρχονται:

- από τη μεταλλουργική διεργασία (πύρωση, θερμική διάσπαση) του ανθρακικού ασβεστίου CaCO₃, δηλ. της πρώτης ύλης (ασβεστόλιθοι), σε CaO και CO₂ μέσα στις περιστροφικές καμίνους των τσιμεντοβιομηχανιών, και
- από την καύση των ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) κατά την παραγωγή του τσιμέντου.

Από την καύση των ορυκτών καυσίμων προκύπτουν σύμφωνα με υπολογισμούς περίπου 0.63 t CO₂ ανά t τσιμέντου, ενώ από την πύρωση προκύπτουν 0.53 t CO₂ ανά t τσιμέντου. Συνολικά δηλαδή προκύπτουν 1.16 t CO₂ ανά t παραγόμενου τσιμέντου.

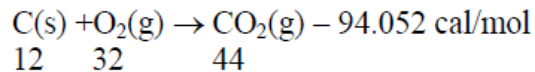
Θεωρητικός υπολογισμός των παραγόμενων ποσοτήτων CO₂

Η πύρωση του CaCO₃ γίνεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Είναι όμως γνωστό ότι για την παραγωγή 1 t τσιμέντου απαιτούνται περίπου 1.21 t CaCO₃, που σύμφωνα με την παραπάνω αντίδραση παράγουν: $(44/100) * 1.21 \approx 0.532$ t CO₂.

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



Η εκλυόμενη αυτή ενέργεια αντιστοιχεί σε $94052/12 = 7837.7$ cal/g άνθρακα. Αυτή λοιπόν η ποσότητα ενέργειας εκλύεται από την καύση 1 g άνθρακα. Όμως 1 cal = 4.1868 joules, δηλ. $7837.7 * 4.1868 \approx 32815$ kJ/kg άνθρακα.

Από τον Πίνακα 1.7 φαίνεται ότι η ενέργεια που παράγεται από παντός είδους ορυκτά καύσιμα είναι: $(69.5 + 524.8 + 3885.3) * 10^3$ BTU/t τσιμέντου, που επειδή 1 BTU = 1.0555 kJ, αντιστοιχεί σε $4728.2 * 10^3$ kJ/t τσιμέντου = 4728.2 kJ/kg τσιμέντου. Αυτή όμως η ενέργεια πρέπει να παραχθεί από την καύση άνθρακα και θα απαιτηθούν: $(4728.2 \text{ kJ/kg τσιμέντου}) / 32815 \text{ kJ/kg άνθρακα} = 0.144$ kg άνθρακα/kg τσιμέντου. Από την καύση όμως αυτή θα παραχθούν: $0.144 * (44/12) = 0.528$ kg CO₂/kg τσιμέντου.

Και η ηλεκτρική ενέργεια όμως που χρησιμοποιείται στην παραγωγή τσιμέντου παράγεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα (εξαιρούνται οι περιπτώσεις παραγωγής από πυρηνική ενέργεια ή υδατοπτώσεις). Άρα συνεισφέρει κι αυτή στην παραγωγή και εκπομπή CO₂. Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία όπως παραπάνω προκύπτει: $840.2 * 10^3$ BTU/t τσιμέντου = $(840.2 * 1.0555) * 10^3$ kJ/ t τσιμέντου = $886.4 * 10^3$ kJ/ t τσιμέντου ή $(886.4 \text{ kJ/ kg τσιμέντου}) / (32815 \text{ kJ/kg άνθρακα}) = 0.027$ kg άνθρακα/kg τσιμέντου. Η παραπάνω ποσότητα του άνθρακα αντιστοιχεί σε παραγωγή: $0.027 * (44/12) = 0.099$ kg CO₂/ kg τσιμέντου.

Από τους υπολογισμούς αυτούς και δεδομένου ότι για την παραγωγή 1 m³ σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν 0.2974 t τσιμέντου, προκύπτει ο Πίνακας 1.9.

Πίνακας 1.9 Παραγωγή CO₂ στις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος (συμπεριλαμβανομένης και της ηλεκτρικής ενέργειας) (Κ. Τσακαλάκης, 2010).

<i>Πηγές εκπομπών CO₂ στη βιομηχανία τσιμέντου</i>	<i>kg CO₂/t τσιμέντου</i>	<i>kg CO₂/m³ σκυροδέμα</i>	<i>Ποσοστό % συνολικού CO₂</i>
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
<i>Συνολική παραγωγή CO₂</i>	<i>1159</i>	<i>344.7</i>	<i>100</i>

Άλλες επιβλαβείς εκπομπές στην ατμόσφαιρα

Η τσιμεντοβιομηχανία και η βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος προκαλούν και άλλου είδους εκπομπές στην ατμόσφαιρα εκτός του CO₂, π.χ. σκόνη από την περιστροφική κάμινο, από την παραγωγή και ανάμιξη των πρώτων υλών, από την άλεση του κλίνκερ, από τις διαδικασίες ενσάκκισης και φόρτωσης του τσιμέντου κ.λπ.. Ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης αυτής της ρύπανσης είναι η δέσμευση, η συλλογή και ανακύκλωση της σκόνης στις διεργασίες παραγωγής του τσιμέντου. Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται σήμερα αποδοτικά με χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων, μηχανικών διατάξεων συλλογής, σακκόφιλτρων, κάλυψης των μεταφερόμενων υλικών κ.λπ.

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

Μικρότερης αλλά όχι αμελητέας σπουδαιότητας είναι και οι εκπομπές άλλων ατμοσφαιρικών ρυπαντών (διοξείδιο του θείου – SO₂, οξείδια του αζώτου NO_x, τριοξείδιο του θείου – SO₃ κ.λπ.). Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνεται συνήθως με χρήση ως καυσίμων πρώτων υλών χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και η δέσμευση των αερίων με τις πλέον σύγχρονες μεθόδους και με κατάλληλο εξοπλισμό περιβαλλοντικού ελέγχου.

Ρύπανση των νερών

Σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα που ανακύπτει στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος είναι η ρύπανση των υδάτων, με κυριότερο 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 νερού ανά φορτηγό (μπετονιέρα) ανά ημέρα για έκπλυση και το pH του νερού που προκύπτει είναι περίπου 12. Η ισχυρή αλκαλικότητά του, το καθιστά ιδιαίτερα τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς. Στις σύγχρονες μονάδες ετοιμού σκυροδέματος υπάρχουν λίμνες απόρριψης των νερών έκπλυσης, όπου τα περιεχόμενα στερεά καθιζάνουν και το νερό υφίσταται επεξεργασία με σκοπό την

επαναχρησιμοποίησή του. Πολλές φορές επίσης υπάρχουν ειδικές εγκαταστάσεις απόρριψης του πλεονάζοντος σε μια κατασκευή σκυροδέματος για έκπλυση και ανάκτηση των αδρανών τα οποία επανατροφοδοτούνται στη μονάδα. Είναι φανερό ότι σοβαρό πρόβλημα προκύπτει από την ανεξέλεγκτη έκπλυση των φορτηγών μεταφοράς και των αντλιών τροφοδοσίας επί τόπου του έργου, γεγονός στο οποίο δεν έχει δοθεί η αναγκαία σημασία στη χώρα μας.

2 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

2.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΦΙΛΙΚΩΝ / ΗΠΙΩΝ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1.1 Γενικά

Για την παραγωγή του δομημένου περιβάλλοντος συναντώνται τρεις τομείς τεχνολογικής έρευνας και ανάπτυξης που μπορούν να ονομαστούν ως «οικοδομικές τεχνολογίες» (Αργ. Δημούδη, 2006):

- οι τεχνολογίες οικοδομικών υλικών,
- οι τεχνολογίες παραγωγής οικοδομικών υλικών,
- οι τεχνολογίες δόμησης κτιρίων.

Οι **τεχνολογίες οικοδομικών υλικών** αναφέρονται στην προέλευση, στη σύσταση και στα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στη δόμηση. Οι περιβαλλοντικές ιδιότητες των οικοδομικών υλικών είναι αυτές που καθορίζουν την ποιότητα του δομημένου χώρου και θα έπρεπε να καθορίζουν και τις τεχνολογίες παραγωγής, όπως και τις τεχνολογίες δόμησης.

Οι **τεχνολογίες παραγωγής οικοδομικών υλικών** αναφέρονται σε μεθόδους και συστήματα παραγωγής, οι οποίες είναι άρρηκτα δεμένες με τη βιομηχανία και τη χημική βιομηχανία συνολικά. Κατά συνέπεια, το ζήτημα της καθαρότητας των τεχνολογιών παραγωγής οικοδομικών υλικών δεν μπορεί να εξεταστεί χωριστά από την επιδίωξη ανάπτυξης καθαρών τεχνολογιών στο σύνολο της βιομηχανίας.

Οι **τεχνολογίες δόμησης των κτιρίων** καθορίζονται από τα υλικά δόμησης, καθώς αποτελούν συγκεκριμένες κατασκευαστικές μεθόδους και συστήματα κατασκευών, που διαφοροποιούνται από υλικό σε υλικό. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει με στόχο την εξασφάλιση της καθαρότητάς τους να υπόκεινται σε ορισμένες αρχές.

Τα οικοδομικά υλικά σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους αποτελούν κρίσιμη παράμετρο για την υλοποίηση των περιβαλλοντικά φιλικών δομικών κατασκευών. Για τον προσδιορισμό της περιβαλλοντικής ποιότητας των υλικών είναι απαραίτητο να έχουμε στη διάθεσή μας πληροφορίες για τη διαθεσιμότητα και την επάρκεια των φυσικών πόρων από τους οποίους προέρχονται, την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή και στα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής τους, τις ανάγκες συντήρησης, την περιεκτικότητά τους σε υλικά που προέρχονται από ανακύκλωση, καθώς και τη δυνατότητά τους για επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση. Το επιθυμητό είναι να υπάρχουν πλήρη στοιχεία για κάθε οικοδομικό υλικό, για όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους, ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση και επιλογή των υλικών εκείνων που έχουν τη μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Η φιλικότητα των οικοδομικών τεχνολογιών προς το περιβάλλον εξαρτάται από τέσσερις βασικούς παράγοντες:

- από την ποσότητα ενέργειας ορυκτών καυσίμων που καταναλώνουν σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους,

- από την ανανεωσιμότητα και επάρκεια των φυσικών πόρων από τους οποίους προέρχονται,
- από τις ποσότητες των ανακυκλώσιμων απορριμμάτων που παράγονται,
- από το βαθμό τοξικών και οικοτοξικών επιδράσεων που ασκούν στην εσωτερική ποιότητα του αέρα των κτιρίων, στην υγεία των χρηστών και στο περιβάλλον.

Η οικολογική δόμηση σκοπό έχει την ελάττωση των πιέσεων στους μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους που μακροπρόθεσμα τείνουν να εξαντληθούν και τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον σε κάθε στάδιο της ζωής των υλικών και των προϊόντων που χρησιμοποιούνται σε ένα κτίριο.

Οι βασικές αρχές της οικολογικής δόμησης συνοψίζονται ως εξής:

- αποφυγή χρήσης περιττών υλικών,
- αποδοτική χρήση υλικών,
- χρήση υλικών από ανανεώσιμες πηγές και δευτερογενών (ανακυκλωμένων) υλικών,
- επιλογή των υλικών με τις μικρότερες δυνατές επιπτώσεις στο περιβάλλον,
- η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων,
- η χρήση δομικών στοιχείων με μεγάλο χρόνο ζωής,
- η χρήση δομικών στοιχείων με υψηλό περιεχόμενο σε ανακυκλωμένα υλικά,
- ο σχεδιασμός ευέλικτων κτιρίων κατάλληλων για πολλαπλές χρήσεις,
- η ανακύκλωση μετά την κατεδάφιση.

2.1.2 Κατανάλωση ενέργειας στη δόμηση

Τα ορυκτά καύσιμα που καταναλώνονται στον κατασκευαστικό τομέα δεν περιορίζονται μόνο στις **ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται για τη λειτουργία των κατασκευών** (λειτουργία ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού) αλλά **ενέργεια ορυκτών καυσίμων καταναλώνεται επίσης κατά την παραγωγή των δομικών προϊόντων όπως και κατά την ανέγερση και την κατεδάφιση των κατασκευών.**

Στην ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των οικοδομικών υλικών συμπεριλαμβάνεται η ενέργεια εξόρυξης, παραγωγής και μεταφοράς τους από την πηγή των πρώτων υλών μέχρι το εργοτάξιο. Για τα ντόπια υλικά οι αποστάσεις μεταφοράς είναι σχετικά μικρές, της τάξης των 0 – 500 km. Αυτά είναι συνήθως απλά υλικά, όπως το ξύλο, οι λίθοι ή οι πλίνθοι. Για τα υλικά υψηλής τεχνολογίας, όπως τα μέταλλα και τα πλαστικά οι αποστάσεις μπορεί να είναι πολύ μεγάλες, της τάξης των 4.000 – 5.000 km. Στην ενέργεια που απαιτείται για την ανέγερση και κατεδάφιση ενός κτίσματος, συμπεριλαμβάνεται η ενέργεια του μηχανικού εξοπλισμού δόμησης, της μεταφοράς των οικοδομικών απορριμμάτων και της διαχείρισής τους. **Η ενέργεια ορυκτών καυσίμων που περιέχεται στα οικοδομικά υλικά και στη διαδικασία ανέγερσης και κατεδάφισης ενός σύγχρονου κτιρίου ισοδυναμεί με την ενέργεια που καταναλώνεται για τη θέρμανση και το δροσισμό του για περίπου 7 – 8 χρόνια** (Αργ. Δημούδη, 2006).

Η κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα στην παραγωγή της οικοδομής μπορεί να μειωθεί με τρεις τρόπους:

- 1) με την αντικατάστασή της ενέργειας από ορυκτά καύσιμα στην παραγωγή των οικοδομικών υλικών και των κτιρίων από καύσιμα που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας,
- 2) με την ανάπτυξη τεχνολογιών εξόρυξης, παραγωγής και κατασκευής χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων.

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει την ενέργεια που απαιτείται για την εξόρυξη των πρώτων υλών και την παραγωγή ορισμένων από τα βασικά οικοδομικά υλικά.

Πίνακας 2.1 Ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή βασικών οικοδομικών υλικών και προϊόντων (Αργ. Δημούδη, 2006).

Οικοδομικά υλικά	Kwh/t	Οικοδομικά προϊόντα	Kwh/t
Λίθοι	100	Σκυρόδεμα	200 – 300
Άμμος	5	Οπλισμένο σκυρόδεμα	450 – 600
Ασβέστης	1.200	Κισηρόδεμα	300 – 350
Τσιμέντο	1.000	Οπτόπλινθοι διάτρητοι	450
Σίδηρος	3.500	Οπτόπλινθοι ελαφρείς	500 – 600
Χάλυβας	8.000 – 9.000	Κέραμοι	550
Αλουμίνιο	72.500	Πλακίδια πυρίμαχα	1.730
Χαλκός	15.000	Υαλοπίνακες	15.000
Ψευδάργυρος (τσίγκος)	12.000	Μοριοσανίδες/Ινοσανίδες	800 – 1500
Μόλυβδος	10.000	Εύλινα κουφώματα	20 (kwh/m ³)
Κασσίτερος	6.500	Πολυαιθυλένιο	8.200 – 13.700
Περλίτης	2.400 (kwh/m ³)	Πολυπροπυλένιο	8.200 – 13.700
Ξυλεία οικοδομική	300	Μονώσεις ορυκτών ινών	5.000
Υαλοβάμβακας	2.000 – 14.000		

2.1.3 Φυσικοί Πόροι

Φυσικοί πόροι είναι το σύνολο των υλών (φυσικών αποθεμάτων) που βρίσκονται στη φύση και μπορούν να αξιοποιηθούν στην παραγωγική διαδικασία. Σήμερα το πρόβλημα της εξάντλησης πολύτιμων φυσικών πόρων αποτελεί ένα από τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι πρώτες ύλες των οικοδομικών υλικών προέρχονται από φυσικούς πόρους και μπορούν να διακριθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες (Αργ. Δημούδη, 2006):

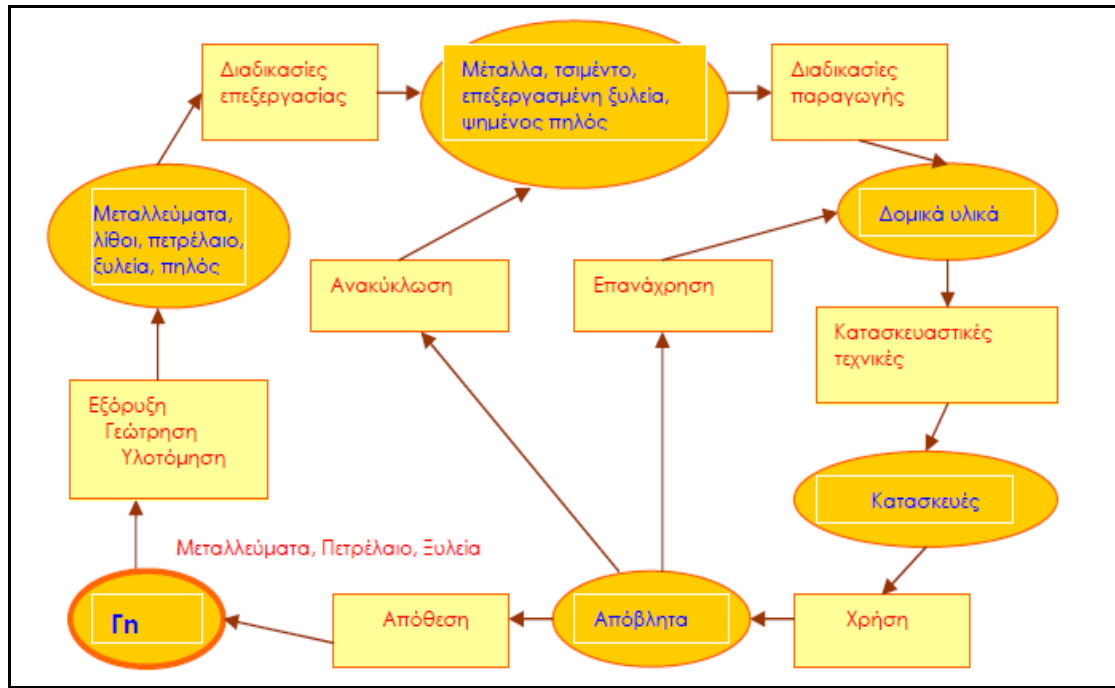
- α) φυσικοί πόροι φυτικής προέλευσης,
- β) φυσικοί πόροι ζωικής προέλευσης,
- γ) φυσικοί πόροι εδάφους και υπεδάφους.

Τα αποθέματα της γης διακρίνονται σε ανανεώσιμα και μη ανανεώσιμα. Τα ανανεώσιμα αποθέματα είναι αυτά που μπορούν να ανανεώνονται διαρκώς. Ο κύκλος ζωής των υλικών παρουσιάζεται διαγραμματικά στην Εικόνα 2.1.

Η κατασκευαστική βιομηχανία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ακατέργαστων πρώτων υλών μετά τη βιομηχανία τροφίμων. **Βασικές αρχές για τη διατήρηση των αποθεμάτων** είναι:

- η μείωση της χρήσης των φυσικών πόρων, ιδιαίτερα των μη ανανεώσιμων,

- η μείωση των απωλειών υλικών κατά τη διάρκεια της παραγωγής, της κατασκευής και κατά τη διάρκεια ζωής των κτιρίων,
- η επαναχρησιμοποίηση των υλικών μετά από κατεδαφίσεις,
- η ανακύκλωση των υλικών.



Εικόνα 2.1 Διαγραμματική απεικόνιση του κύκλου των υλικών (Αργ. Δημούδη, 2006).

Οι μη ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι του εδάφους και υπεδάφους πρέπει να χρησιμοποιούνται με μέτρο ώστε να συνεχίσουν να υφίστανται. Οι ποσότητες των φυσικών πόρων που υπάρχουν στη γη, παρόλο που για την ανθρώπινη κλίμακα φαίνονται μεγάλες ώστε να θεωρούνται ανεξάντλητες, είναι σαφώς περιορισμένες. Επιπλέον, ο παράγοντας που περιορίζει καθοριστικά τη δυνατότητα εκμετάλλευσης του συνόλου των φυσικών πόρων είναι το γεγονός ότι όλα τα κοιτάσματά τους δεν είναι προσιτά, αλλά μόνο μικρές ποσότητές τους, και μάλιστα αυτά που βρίσκονται στην ανώτερη ζώνη του γήινου φλοιού. Τα τμήματα αυτά ονομάζονται αποθέματα των φυσικών πόρων, τα οποία είναι περιορισμένες και εξαντλήσιμες ποσότητες του συνόλου των φυσικών πόρων.

Η αύξηση των αποθεμάτων είναι δυνατή:

- όταν γεωλογικά φαινόμενα μεγάλης κλίμακας π.χ. σεισμοί, φέρνουν στην επιφάνεια του φλοιού νέες ποσότητες φυσικών πόρων από μεγαλύτερα βάθη. Αυτός είναι ένας αστάθμητος παράγοντας, τόσο ως προς την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων του αλλά και ως προς τις συνέπειες,
- με τον εντοπισμό σε προσιτές περιοχές, νέων, μεγάλων αποθεμάτων που δεν ήταν γνωστά, αν και οι πιθανότητες είναι μικρές, καθώς οι έρευνες έχουν προχωρήσει με την πρόοδο της τεχνολογίας των γεωλογικών ερευνών,
- με την εξέλιξη της εξορυκτικής τεχνολογίας μπορεί να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση των κοιτασμάτων.

Συνεπώς, ο χρόνος ζωής των αποθεμάτων πρέπει να εκτιμηθεί κυρίως με κριτήριο το ρυθμό της τρέχουσας κατανάλωσής τους, καθώς η επιμήκυνση του χρόνου ζωής τους εξαρτάται κυρίως από το βαθμό ορθολογικής διαχείρισης και εξοικονόμησης των ποσοτήτων τους που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο.

Όσον αφορά τα αποθέματα των πετρωμάτων δεν υπάρχει οξύ πρόβλημα εξάντλησης, παρόλο ότι για ορισμένα από αυτά παρατηρείται αξιοσημείωτη μείωση π.χ. για τα ασβεστολιθικά πετρώματα που αποτελούν το 80% της μάζας του σκυροδέματος. Υλικά που υπάρχουν σε αφθονία στην κλίμακα του τοπικού περιβάλλοντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό τον όρο ότι η εξόρυξή τους δεν προκαλεί αισθητική υποβάθμιση. Οι εξορύξεις άμμου και η παραγωγή σκύρων για την οικοδομική δραστηριότητα το 1950 πλησίαζαν τα 17 εκατ. τόνους στη Γαλλία, και το 2000 ξεπέρασαν τα 400 εκατ. τόνους, προκαλώντας σημαντική αισθητική υποβάθμιση του φυσικού τοπίου.

Σε περιπτώσεις οργανωμένης εκμετάλλευσης, η αποκατάσταση του τοπίου θα πρέπει να είναι συνεχής και να μη γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αλλοιώνει το τοπικό οικοσύστημα της αποκαταστημένης περιοχής. Η υπερβολική εκμετάλλευση οδηγεί συνήθως σε μεγάλη περιβαλλοντική υποβάθμιση και αλλαγή του τοπίου. Μονάδες παραγωγής δομικών υλικών που παράγουν όχι μόνο για τοπική χρήση αλλά και για εξαγωγές, δημιουργούν προβλήματα περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Η οργανωμένη εκμετάλλευση των πόρων πρέπει να συνοδεύεται από μελέτες για την εκτίμηση των επιπτώσεων στο άμεσο περιβάλλον, όπως πτώση στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, καταστροφή ευαίσθητων τοπικών οικοσυστημάτων, κλπ.

Η ορθολογική διαχείριση και η εξοικονόμηση των αποθεμάτων των φυσικών πόρων που προέρχονται από τη γη, επιβάλλει τη λήψη μέτρων που πρέπει να βασίζονται στις ακόλουθες αρχές:

- περιορισμός της χρήσης τους μόνο στους τομείς όπου είναι αναντικατάστατοι,
- αντικατάστασή τους όπου είναι δυνατόν από ανανεώσιμους φυσικούς πόρους,
- πλήρης αξιοποίηση των ιδιοτήτων τους, των ποσοτήτων τους (αξιοποίηση υπολειμμάτων κατεργασίας), επιμήκυνση του χρόνου χρήσης τους, ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση.

2.1.4 Κατανάλωση ενέργειας κατά τα στάδια παραγωγής δομικών υλικών

Ένα σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τα υλικά είναι το ποσό της ενέργειας που καταναλώθηκε για την παραγωγή τους, από το στάδιο της λήψης των πρώτων υλών από τη φύση, το στάδιο τη μεταφορά τους στο εργοστάσιο, το στάδιο βιομηχανικής κατεργασίας τους έως το στάδιο της μεταφοράς και τοποθέτησής τους στην κατασκευή. Το χαρακτηριστικό αυτό μέγεθος αναφέρεται ως **εμπεριεχόμενη ή ενσωματωμένη ενέργεια δομικών υλικών** και αποτελείται από την κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή των δομικών υλικών και την κατανάλωση ενέργειας κατά την κατασκευή, χρήση και κατεδάφιση των κτιρίων (Αργ. Δημούδη, 2006, Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005). Αναλυτικότερα:

1. *Κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή των δομικών υλικών:*
 - άμεση κατανάλωση ενέργειας για την εξόρυξη των πρώτων υλών και την παραγωγική διαδικασία, η οποία εξαρτάται από τους διαφορετικούς τύπους μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία,

- δευτερογενής κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγική διαδικασία, η οποία αναφέρεται στην κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία της παραγωγικής μονάδας, π.χ. του συστήματος θέρμανσης, δροσισμού, φωτισμού, συντήρησης των μηχανημάτων,
- ενέργεια για τη μεταφορά των πρώτων υλών και των επεξεργασμένων δομικών υλικών, η οποία εξαρτάται από την ύπαρξη των πρώτων υλών σε τοπική κλίμακα και τον τρόπο και την απόσταση μεταφοράς τους. Ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει την ενέργεια που καταναλώνεται για τη μεταφορά ενός τόνου υλικών στη Νορβηγία.

Ένα υλικό που δεν επιβαρύνει περιβαλλοντικά με τη συλλογή των πρώτων υλών του μέσα από τη φύση, μπορεί να προκαλέσει οικολογική ζημιά μέσω της παραγωγικής του διαδικασίας (κατεργασία, μεταφορά). Π.χ. τα μέταλλα και το γυαλί είναι ενεργειακά επιζήμια κατά την παραγωγή τους καθώς για την παραγωγή τους απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας ενώ οι φυσικοί λίθοι που απαιτούν μικρή σχετικά ενέργεια κατά την παραγωγή τους απαιτούν σχετικά μεγάλη ενέργεια για τη μεταφορά τους.

Η μεταφορά ενός υλικού από τη θέση παραγωγής στη θέση εφαρμογής είναι επίσης ένα κριτήριο που επηρεάζει την οικολογικότητα του υλικού. Επιλέγοντας υλικά που παράγονται κοντά στο τόπο της κατασκευής μειώνεται το ποσό των καυσίμων (και της ενέργειας) που θα απαιτηθούν για τη μεταφορά τους. Εξάλλου ένα από τα μεγάλα συνήθη τρέχοντα κοστολόγια των εργοταξίων αποτελούν τα καύσιμα. Από μελέτες έχει προκύψει ότι ο σιδηρόδρομος είναι οκτώ φορές οικονομικότερος (και οικολογικότερος) από τη μεταφορά των υλικών με αυτοκίνητα.

Πίνακας 2.2 Ενέργεια που καταναλώνεται ανά τόνο υλικού και χιλιόμετρο μεταφοράς τους, στη Νορβηγία. Χρόνος αναφοράς: 1990 (Αργ. Δημούδη, 2006).

Μεταφορικό μέσο / καύσιμο	MJ / ton/ km
Οδικώς : ντίζελ	1,6
Ακτοπλοϊκώς : ντίζελ	0,6
Σιδηροδρομικώς : ντίζελ	0,6
Σιδηροδρομικώς : ηλεκτρισμός	0,2

2. Κατανάλωση ενέργειας κατά την κατασκευή, χρήση και κατεδάφιση κτιρίων:

- ενέργεια για τη μεταφορά των δομικών προϊόντων από τον τόπο παραγωγής τους στον τόπο της κατασκευής (Πίνακας 2). Η ενέργεια αυτή είναι σημαντικά μικρότερη για υλικά που παράγονται σε τοπική κλίμακα σε σχέση με υλικά που εισάγονται από μακρινές χώρες.
- ενέργεια κατά την κατασκευή, η οποία απαιτείται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στα διάφορα στάδια κατασκευής.
- ενέργεια για τη συντήρησή τους καθώς υπάρχει η φυσική φθορά των δομικών υλικών με το χρόνο.
- ενέργεια για την αποσύνδεση ή απομάκρυνση των υλικών κατά την κατεδάφιση, η οποία εκτιμάται ότι είναι περίπου το 10% της ενέργειας που εμπεριέχεται στα διαφορετικά δομικά υλικά.

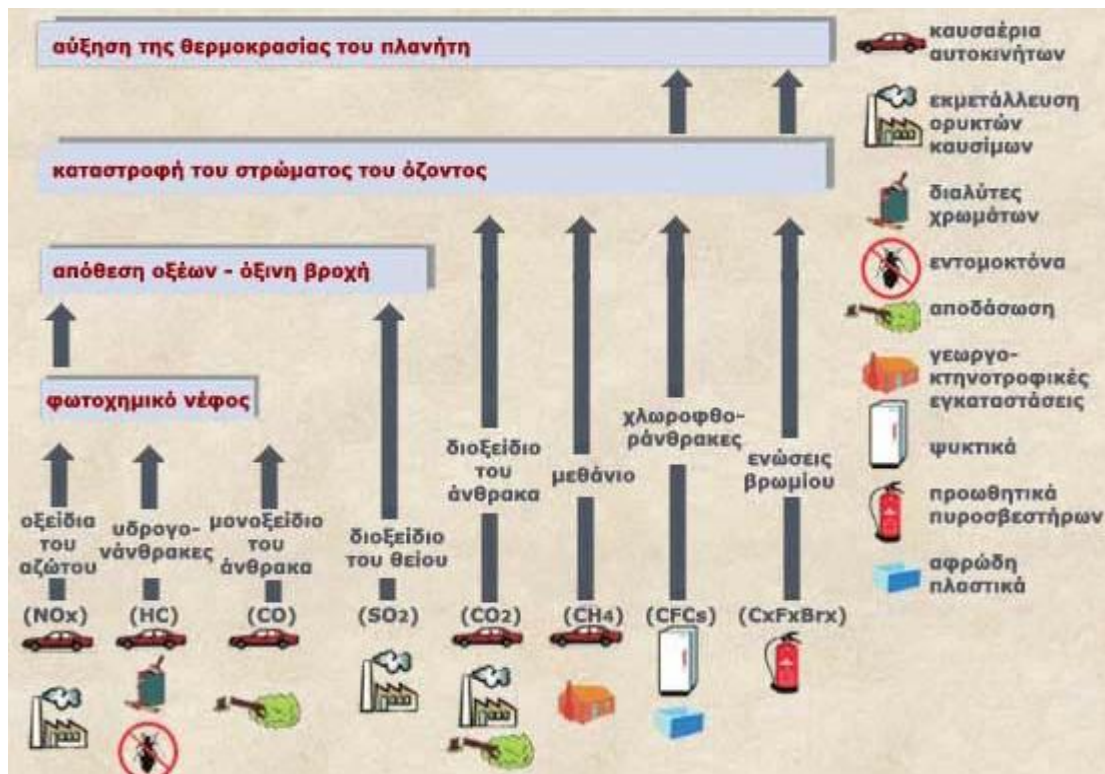
Η εμπεριεχόμενη ενέργεια εκφράζεται ως kWh ή MJ και συνοδεύεται από τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ποσότητα αερίων ρύπων CO₂ και SO₂ που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει την εμπεριεχόμενη ενέργεια και τα ισοδύναμα των εκπομπών του CO₂ και SO₂ βασικών οικοδομικών υλικών.

Πίνακας 2.3 Εμπεριεχόμενη ενέργεια και ισοδύναμα εκπομπών CO₂ και SO₂ οικοδομικών υλικών (Αργ. Δημούδη, 2006).

Δομικό Υλικό	Εμπεριεχόμενη ενέργεια (MJ/kg)	Ισοδύναμο CO ₂ (g CO ₂ /kg)	Ισοδύναμο SO ₂ (g SO ₂ /kg)	Πηγή δεδομένων
Φυσική πέτρα	0,5	45		BRE-1
Φύλλο αλουμινίου	312,7	11.815	94,83	SIA
Ασφαλτ. στεγαν. μεμβράνη	50	1.038	6,41	SIA
Άσφαλτος	51	400		Ecobian
Θερμή άσφαλτος	52,4	489	3,94	SIA
Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	1,9	271	0,66	SIA
Τσιμεντόλιθοι	0,8	119	0,48	SIA
Τσιμεντόπλακες	1,2			
Ελαφροσκυρόδεμα	4,1	445	1,33	SIA
Σκυρόδεμα κλίσεων	0,4	68	0,25	SIA
Σκυρόδεμα γενικά	0,7	123	0,40	SIA
Πλαστικά χρώματα	98,1			
Υδροχρώματα	88,5			
Χάλυβας οπλισμού	9,9	474	1,79	SIA
Ινοσανίδες μαλακές	15	894	3,35	SIA
Επικολητή ξυλεία	8,6	564	3,21	SIA
Μαλακή ξυλεία	7	600		Ecobian
Μοριοσανίδες	5,1	372	2,37	SIA
Σανίδωμα	2,9	274	1,55	SIA
Τετραγωνισμένη ξυλεία	3,5	281	1,49	SIA
Γυαλί	18,4	1.300		Ecobian
Αφρώδες γυαλί	67	3.689	22,92	SIA
Διογκ. Πολυστερίνη	94,9	1.914	20,07	SIA
Σελλουλόζη (νιφάδες)	2,8	112	1,4	SIA
Ορυκτόμαλλο	15,9	1.042	4,22	
Υαλοβάμβακας	42,7	2.130	15,5	SIA
Ασβεστοκονιάματα	1,9	271	0,66	SIA
Επιχρίσματα γύψου	0,7	106	0,91	SIA
Οργανικά επιχρίσματα	5,1	241	1,44	SIA
Συμβατικά επιχρίσματα	1,4	181	0,61	SIA
Μεμβράνες PVC	51,6	2.043	14,27	SIA
Διακοσμητικοί οπτόπλινθοι	4,5	300		Ecobian
Κεραμίδια	3,3	329	1,09	SIA

Η ενσωματωμένη ενέργεια ενός υλικού είναι μείζονος σημασίας καθώς υλικά με μεγάλη ενσωματωμένη ενέργεια προκαλούν κατά τη διαδικασία παραγωγής τους μεγάλες εκπομπές αερίων ρύπων και θερμική ρύπανση. Η πρώτη πετρελαϊκή κρίση το 1973, με την ανάδειξη της απειλής για εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων, συνέβαλε στη συνειδητοποίηση των ενεργοβόρων παραγωγικών διαδικασιών των δομικών υλικών και έδωσε ώθηση, στη διάρκεια της δεκαετίας του '70, στην συστηματική έρευνα για την ενέργεια που εμπεριέχεται στα δομικά υλικά και προϊόντα. Αρχικός στόχος ήταν ο περιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας. Από

τη δεκαετία του '90 όμως, το κέντρο βάρους μετατοπίστηκε στην επάρκεια των φυσικών πόρων και στη μείωση της ατμοσφαιρικής και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που προκαλείται από την αλόγιστη χρήση πρωτογενούς ενέργειας, δίνοντας έμφαση στα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται, σε τοπικό αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο, από τις εκπομπές CO₂ (φαινόμενο θερμοκηπίου), των οξειδίων του αζώτου και θείου (όξινη βροχή), καθώς και των χλωροφθορανθράκων (εξασθένιση της στιβάδας του όζοντος) κ.α. στη διάρκεια του κύκλου ζωής των δομικών υλικών (Εικόνα 2.2, Εικόνα 2.3).



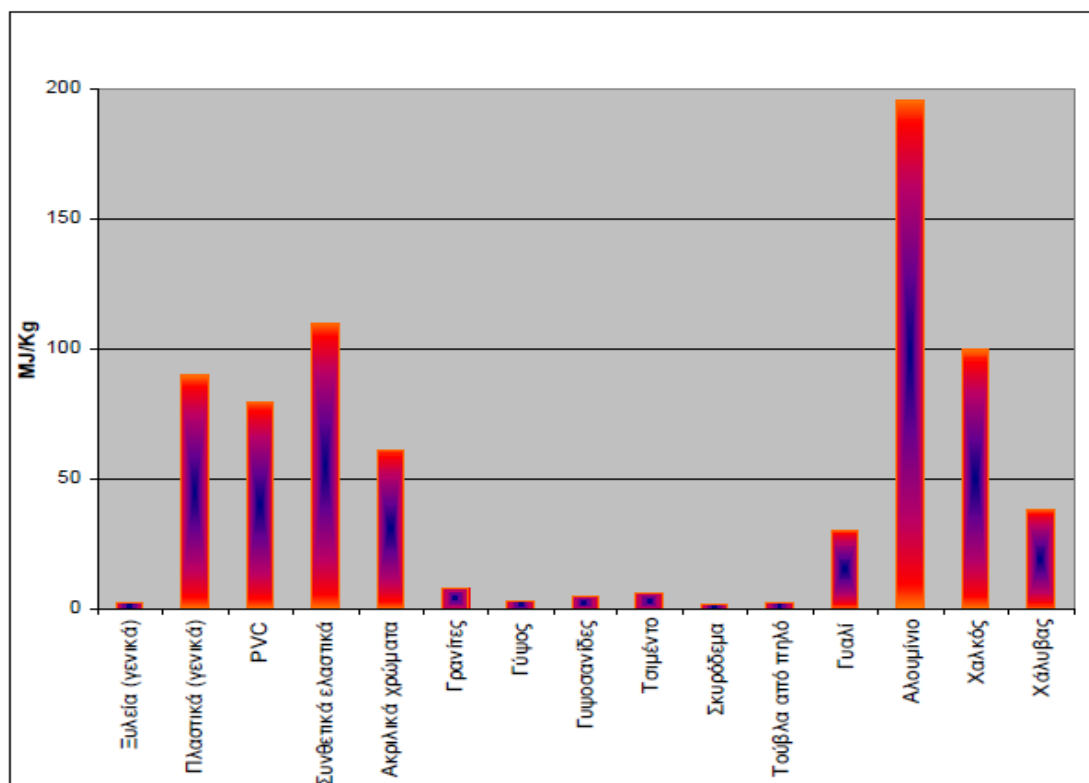
Εικόνα 2.2 Οι κυριότερες πηγές παραγωγής αερίων ρύπων που ευθύνονται για την ατμοσφαιρική ρύπανση (Αργ. Δημούδη, 2006).

Το κύριο πρόβλημα που συνδέεται με την ενσωματωμένη ενέργεια και αφορά τους αέριους ρύπους από την κατανάλωση της ενέργειας είναι η αύξηση των εκπομπών CO₂. Σήμερα ο άνθρωπος χρησιμοποιεί εντατικά τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, καταναλώνοντας σε ένα χρόνο όσο οξυγόνο παρήγαγε η φωτοσύνθεση για χίλια χρόνια. 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 περίσσια CO₂ διότι η συγκέντρωση του στην ατμόσφαιρα κατά τα τελευταία 100 χρόνια έχει αυξηθεί πολύ (από 290 σε 350 ppm). 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 (φαινόμενο του θερμοκηπίου). Σημειώνεται ότι η παραγωγή των αερίων SO₂ και NO_x είναι μικρότερη ποσοτικά καθώς οι εκπομπές του CO₂ αποτελούν το 90% των εκπεμπόμενων ρύπων. Αξίζει όμως να σημειωθεί η παραγωγή του SO₂, υπεύθυνου για την όξινη βροχή παρ' όλη την μικρή ποσοτική συμμετοχή του (Εικόνα 2.3).

Τα διαγράμματα που ακολουθούν και αναφέρονται στην ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών είναι ποιοτικού χαρακτήρα, μιας και η ενσωματωμένη ενέργεια περιέχει πολλές μεταβλητές παραμέτρους για κάθε διαφορετική περίπτωση αλυσίδας παραγωγής ενός υλικού. 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. Η ενσωματωμένη ενέργεια που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4 έχει προκύψει από τη διεθνή βιβλιογραφία.

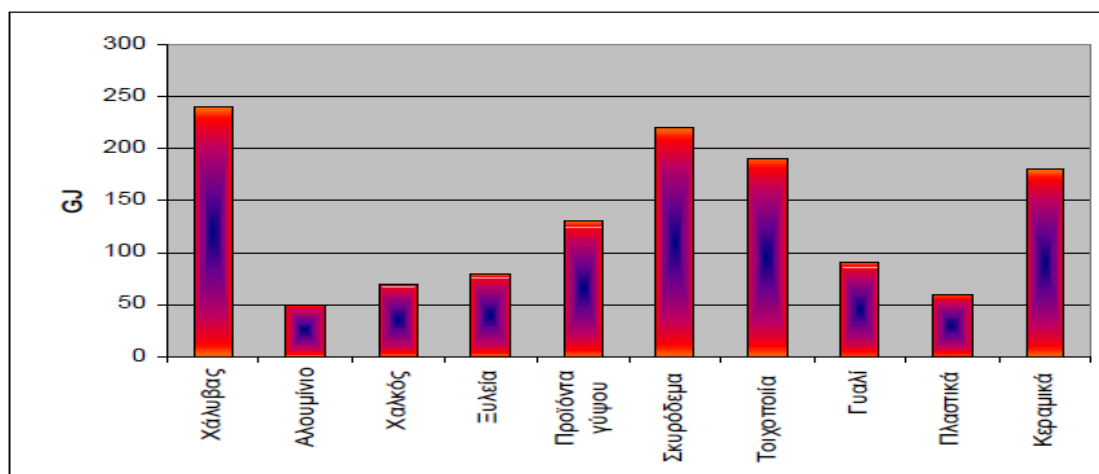


Εικόνα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας της όξινης βροχής (Αργ. Δημούδη, 2006).



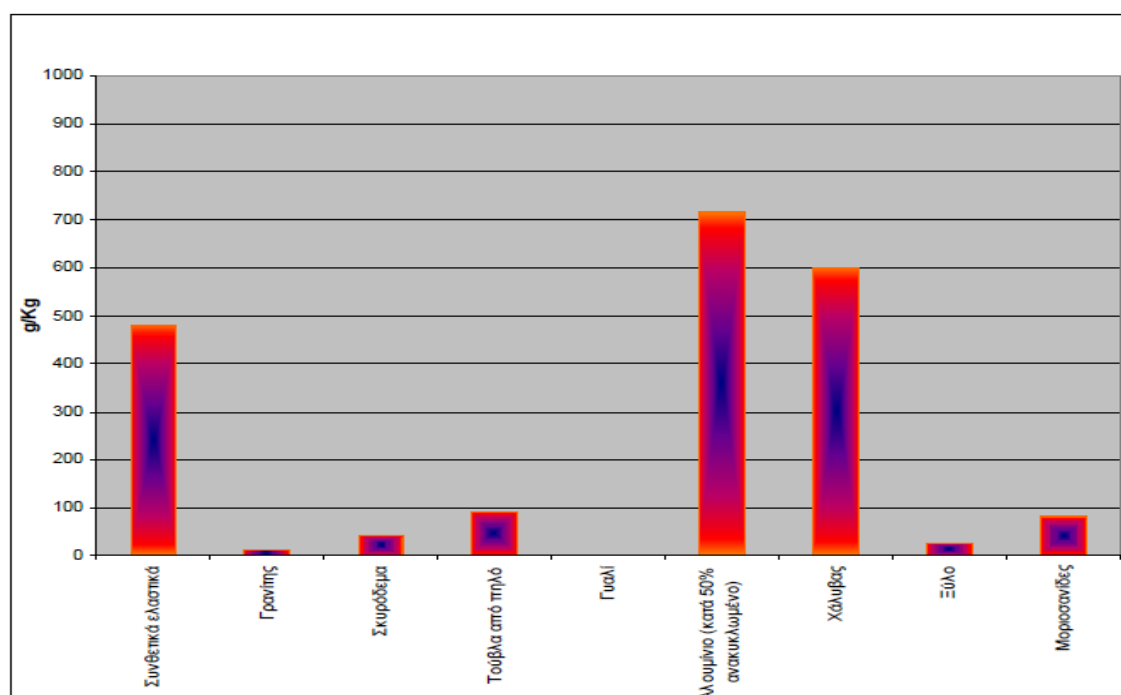
Εικόνα 2.4 Ενσωματωμένη ενέργεια για συνήθη υλικά (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005)

Από μελέτες έχει προκύψει ότι για ένα τυπικό διώροφο κτίριο η ενσωματωμένη ενέργεια που έχει καταναλωθεί σε κάθε κατασκευαστικό μέρος είναι αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5 Ενσωματωμένη ενέργεια σε τυπικό κτίριο (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005)

Στην ουσία η μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας της κατασκευής επιτυγχάνεται με τη μείωση των χρησιμοποιούμενων υλικών. Μεγάλο πρόβλημα που προκύπτει στην παραγωγή των υλικών είναι η σπατάλη της πρώτης ύλης (Εικόνα 2.6). Υλικά που αγοράζονται χωρίς να χρησιμοποιούνται, κτήρια που σχεδιάζονται για να καλύψουν ανάγκες που δεν υπάρχουν δεν αποτελούν οικολογικό σχεδιασμό. Εφόσον είναι άχρηστα, προκύπτουν ως απόβλητα ενώ ταυτόχρονα δαπανάται σημαντική ενέργεια.



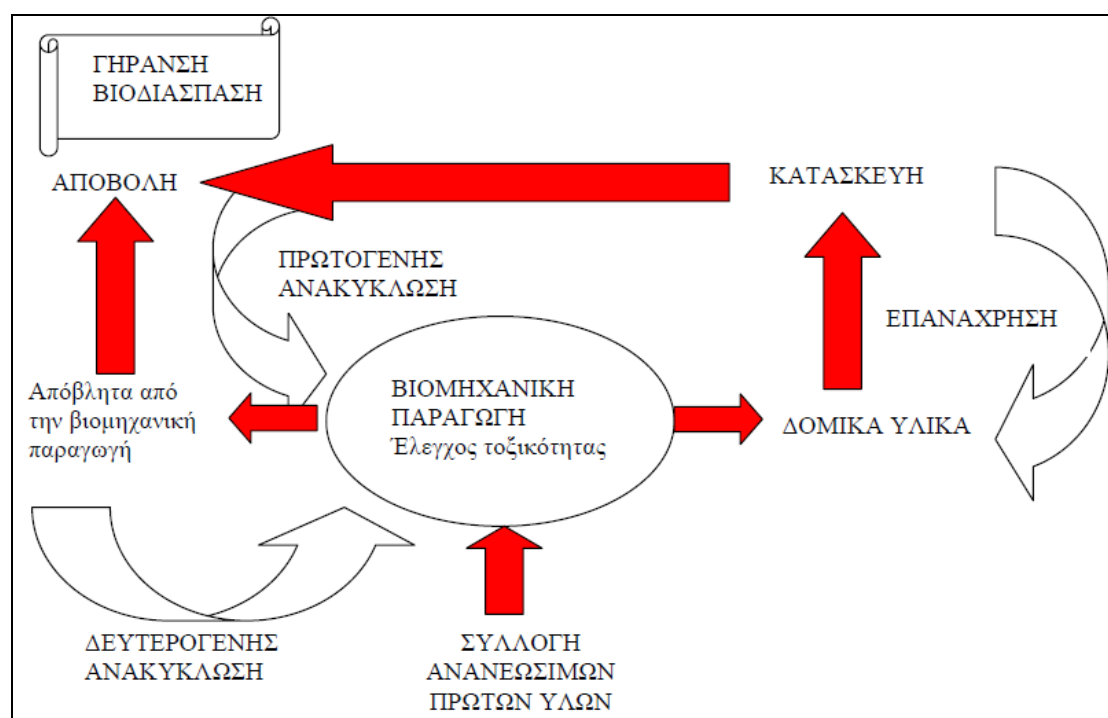
Εικόνα 2.6 Απώλειες πρώτων υλών κατά την παραγωγή συνήθων υλικών (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005)

Η χρήση πρώτων υλών από ανακυκλούμενα υλικά μειώνει σαφώς το ποσό των υλών που απαιτεί ο άνθρωπος από τη φύση για να τα δημιουργήσει. Μέχρι σήμερα υπήρχε η γενική θεώρηση ότι χρειαζόταν λιγότερη ενέργεια για να παραχθεί ένα υλικό μέσω της ανακύκλωσης από ότι να συλλεχθεί μέσω της φύσης. Αυτό πλέον έχει γίνει κατανοητό ότι δεν ισχύει πάντα και η ανακύκλωση είναι ωφέλιμη κυρίως για υλικά που έχουν την ικανότητα να ανακυκλώνονται, έχουν μεγάλη ενσωματωμένη ενέργεια παραγωγής και μικρή ενσωματωμένη ενέργεια ανακύκλωσης.

Για την οικολογικά βέλτιστη κατασκευαστική λύση αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία τα τρία R (Reuse, Reduce, Recycling) επανάχρηση, εξοικονόμηση, ανακύκλωση.

2.1.5 Ανακύκλωση

Η ανακύκλωση είναι μία απόπειρα να μιμηθεί ο άνθρωπος τους κύκλους της φύσης, οι οποίοι γενικά αποτελούν θετικά παραδείγματα αποτελεσματικής λειτουργίας και σταθερότητας και είναι υποδείγματα τέλει ανακύκλωσης (Αργ. Δημούδη, 2006, Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005). Συνήθως μετά από την κατασκευή του έργου και στο τελικό στάδιο του κύκλου ζωής, προκύπτει ένα μείζον ερώτημα: **κατεδάφιση και «απορρίματα» ή κατεδάφιση και επαναχρησιμοποίηση;**



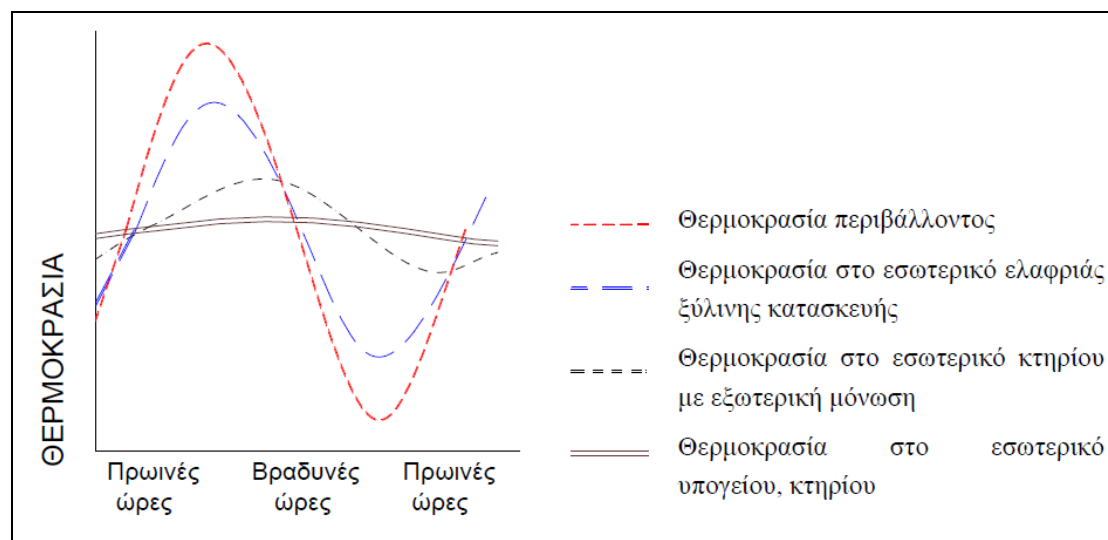
Εικόνα 2.7 Διάγραμμα ροής της ανακύκλωσης των υλικών (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005)

Πολλές φορές προκύπτει ένα υλικό να απαιτεί μεγαλύτερο κόστος και ενέργεια να το ανακυκλώσουμε ή να το επαναχρησιμοποιήσουμε παρά να το παράγουμε εξ αρχής. Εδώ προκύπτει η ηθική πλευρά της ανακύκλωσης η οποία οφείλει να επιβάλλεται. **Γενικά ισχύει η αρχή ότι τα υλικά που έχουν μικρή διαδικασία βιομηχανικής παραγωγής ανακυκλώνονται εύκολα.** Δηλαδή σε υλικά που έχει επέμβει σημαντικά

ο ανθρώπινος παράγοντας με πολύπλοκες διαδικασίες (υψηλές θερμοκρασίες και σύνθετες χημικές αντιδράσεις) είναι δύσκολο όταν υποστούν γήρανση να ανακυκλωθούν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ιδιότητας αυτής αποτελούν τα πλαστικά. Φυσικά, υλικά που βιοδιασπώνται είναι τα καλύτερα και γηράσκουν ομαλά, ακολουθώντας τη ροή και τους χρόνους της φύσης. Σήμερα πολλές φορές η κατασκευή γίνεται αποδέκτης απορριμμάτων και τα υλικά που εντάσσονται μέσα σε αυτή έχουν προκύψει από κάποια άλλη παραγωγική διαδικασία (όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3). Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα ροής της ανακύκλωσης των δομικών υλικών.

2.1.6 Θερμική συμπεριφορά κτιρίου

Παραδοσιακοί τύποι υλικών με μεγάλη θερμική μάζα είναι το νερό, οι φυσικοί λίθοι, το χώμα, το τούβλο, **το σκυρόδεμα**, το ύφασμα και τα κεραμικά. Η θερμική συμπεριφορά διαφορετικών τύπων κτιρίων παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.8.



Εικόνα 2.8 Θερμική συμπεριφορά διαφόρων τύπων κτιρίων (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005).

Οι ικανότητες της θερμικής μάζας ήταν γνωστές από την αρχαιότητα αλλά μόλις πρόσφατα άρχισαν να αναφέρονται σαν κομβικό σημείο στρατηγικής στον ενεργειακό σχεδιασμό του κτηρίου. Σήμερα τεχνικές του παρελθόντος, όπως η αξιοποίηση της θερμικής μάζας, αναφέρονται σαν εναλλακτικές μέθοδοι ψύξης και θέρμανσης. Οι τιμές της θερμικής μάζας διαφόρων υλικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4 Θερμική μάζα διαφόρων υλικών (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005)

Υλικό	Θερμική μάζα $\text{KJ/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$
Νερό	4186
Σκυρόδεμα	2060
Συμπαγή εδαφικά υλικά	1740
Τούβλο	1360

Στα σημερινά κτίρια η θερμική μάζα αποτελείται από στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την πλήρωση του κελύφους όπως τα τούβλα, οι τσιμεντόλιθοι και το σκυρόδεμα. Όπου αυτό είναι δυνατό συνιστάται η χρήση της πέτρας. Αντίθετα η χρήση υλικών όπως το ξύλο δεν ευνοούν την αποθήκευση θερμότητας. Η θερμοχωρητικότητα ενός υλικού είναι ανάλογη προς τον όγκο και την πυκνότητα του υλικού. Η τιμή της ημερήσιας θερμοχωρητικότητας διαφόρων υλικών ανάμεσα στα οποία και του σκυροδέματος ανάλογα με το πάχος τους, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5 Ημερήσια θερμοχωρητικότητα υλικών (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005)

Υλικό	Πάχος Υλικού	Ημερήσια θερμοχωρητικότητα KJ/°C m ²				
		5cm	10cm	15cm	20cm	25cm
Σκυρόδεμα		120	200	240	245	245
Φυσικός Λίθος		100	175	185	185	185
Ξύλο		80	140	150	150	150
Τούβλο		30	35	35	35	35

2.2 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Πλέον λοιπόν η βιομηχανία παραγωγής ενός δομικού υλικού οφείλει να εστιάσει στην ανάλυση του κύκλου ζωής του, για το κόστος διαχείρισης και τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής των έργων, εισάγοντας μια χρονική διάσταση στις οικονομικές εκτιμήσεις των επεμβάσεων που μέχρι τώρα προορίζονταν σταθερά στη φάση του προγραμματισμού των εργασιών και του εργοταξίου. Επίσης, γίνεται όλο και περισσότερο εμφανής η επίδραση της ενόχλησης, ακόμα και όταν δεν είναι ιδιαίτερα επιβλαβής, που προκαλούν στους χρήστες των κατασκευαζόμενων χώρων ορισμένα από τα λεγόμενα προηγμένα υλικά και προϊόντα (κόλλες, ρητίνες, βερνίκια, μονωτικά υλικά, κ.ά.), των οποίων γίνεται ευρεία χρήση στις σημερινές οικοδομές κάτω από την πίεση της επιτακτικής ανάγκης να σμικρυνθούν οι χρόνοι τοποθέτησης και το ανάλογο εργατικό κόστος.

2.2.1 Δομικά προϊόντα και τοξικότητα

Τοξικές ουσίες σε δομικά υλικά ονομάζονται οι ουσίες που όταν απελευθερώνονται από ένα δομικό προϊόν μπορεί να επηρεάσουν π.χ. την ποιότητα του εσωτερικού αέρα και την υγεία των χρηστών του κτιρίου καθώς και τα οικοσυστήματα, εάν διαφύγουν στο περιβάλλον (Αργ. Δημούδη, 2006, Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005). Η ποιότητα του αέρα του εσωτερικού χώρου εξαρτάται σημαντικά από τα υλικά κατασκευής. Έρευνα που έγινε στη Γερμανία έδειξε ότι 37% των δομικών προϊόντων είναι επιβλαβή για την υγεία (μέση τοξικότητα), ενώ το 26% είναι τοξικά ή πολύ τοξικά.

Οι απρόβλεπτες έκτασης περιβαλλοντικές μεταβολές που εκδηλώνονται ως συνέπειες χημικής ρύπανσης, οδήγησαν στη θέσπιση σειράς μέτρων για τον έλεγχο, περιορισμό και απαγόρευση της παραγωγής ή και της χρήσης ορισμένων ουσιών, οι οποίες είναι αναπόσπαστα συστατικά ή και αποτελούν τη βάση πολλών από τα οικοδομικά υλικά

ευρείας κυκλοφορίας (π.χ. απαγόρευση παραγωγής ορισμένων αφρωδών πλαστικών μονώσεων). **Οι Κοινοτικές Οδηγίες 76/464/ΕΟΚ και 80/68/ΕΟΚ για την προστασία αντιστοίχως επιφανειακών και υπόγειων νερών από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες, υποχρεώνουν τα κράτη μέλη να μηδενίσουν τη διοχέτευση στα ύδατα των ουσιών του καταλόγου I και να περιορίσουν αντίστοιχα τη διοχέτευση των ουσιών του καταλόγου II (Πίνακας 2.6). Υποχρεώνουν επίσης τα κράτη μέλη να διεξάγουν ελέγχους πριν από τη διάθεση υλικών που ενδέχεται να οδηγήσουν εμμέσως σε ρύπανση των υπόγειων υδάτων με ουσίες του καταλόγου I.**

Πίνακας 2.6 Κατάλογος τοξικών ουσιών σύμφωνα με τις Κοινοτικές Οδηγίες 76/464/ΕΟΚ και 80/68/ΕΟΚ (Αργ. Δημούδη, 2006, Αμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005).

<p>Κατάλογος I</p> <ul style="list-style-type: none">• οργανοχλωριωμένες ενώσεις• οργανοφωσφορικές ενώσεις• οργανικές ενώσεις ψευδαργύρου• καρκινογόνες ουσίες (συμπεριλαμβανομένου και αυτών του καταλόγου II)• υδράργυρος και ενώσεις υδραργύρου• κάδμιο και ενώσεις καδμίου• δυσδιάσπαστα ορυκτέλαια και υδρογονάνθρακες πετρελαίου• δυσδιάσπαστες συνθετικές ουσίες
<p>Κατάλογος II</p> <ul style="list-style-type: none">• τα ακόλουθα μέταλλα και οι ενώσεις τους: Zn, Cu, Ni, Cr, Se, As, An, Mo, Ti, Sn, Ba, Be, B, U, Va, Co, Th, Te, Ag• τα βιοκτόνα και τα παράγωγά τους (εκτός αυτών του καταλόγου I)• ουσίες που αλλοιώνουν την οσμή και τη γεύση του νερού• τοξικές ή δυσδιάσπαστες ενώσεις Si και ουσίες από τις οποίες ενδέχεται να παραχθούν, ακόμα και αν αυτές είναι βιολογικά ακίνδυνες• ανόργανες φωσφορικές ενώσεις και φώσφορος• κυανιούχες και φθοριούχες ενώσεις• ουσίες που επηρεάζουν αρνητικά το ισοζύγιο οξυγόνου και ειδικά η αμμωνία και οι νιτρώδεις ενώσεις

Οι επιπτώσεις των ουσιών αυτών στην υγεία έχουν ομαδοποιηθεί ως εξής:

- οξεία τοξικότητα,
- χρόνια τοξικότητα,
- αλλεργική δράση,
- ερεθισμός του δέρματος και των μυκογόνων,
- μεταλλαξιογόνος δράση,
- καρκινογόνος δράση,
- αναπαραγωγικές ανωμαλίες και εμβρυοτοξικότητα,
- τοξική δράση στο ανοσοποιητικό και το νευρικό σύστημα.

Αναλυτικότερα, τα κυριότερα συστατικά που συναντώνται στα δομικά υλικά είναι οι οργανικές αλογονωμένες ενώσεις που περιλαμβάνονται στους διαλύτες που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές (Κατάλογος I) και οι οργανικές ενώσεις ψευδαργύρου ως συστατικά συντήρησης του ξύλου (Κατάλογος II).

Στα επιβλαβή για την υγεία περιλαμβάνονται και προϊόντα που περιέχουν ουσίες ύποπτες ως καρκινογόνες και μεταλλαξιογόνες. Χρώματα, συγκολλητικές ουσίες και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά τα τελευταία στάδια της κατασκευής, είναι πολύ πιθανόν να περιέχουν πτητικές οργανικές ενώσεις οι οποίες είναι ιδιαίτερα τοξικές. Γι' αυτό συνιστάται η σταθεροποίηση των βαφών που περιέχουν πτητικές οργανικές ενώσεις να γίνεται πριν κατοικηθεί το σπίτι. Άλλο πρόβλημα του εσωτερικού χώρου του κτηρίου είναι ότι σε ορισμένες ξύλινες κατασκευές περιέχονται φορμαλδεΐδες οι οποίες είναι δυνατόν να εκπέμπονται από το ξύλο για διάστημα έως και επτά ετών.

Τα πετροχημικά που χρησιμοποιούνται για τα περισσότερα πλαστικά και τις συγκολλητικές ουσίες είναι συχνά τοξικά. Σχεδόν όλες οι πετροχημικές βαφές, κόλλες και ρητίνες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή οικοδομικών υλικών είναι από δομικές αλυσίδες του στυρενίου και της βενζίνης οι οποίες είναι υψηλά τοξικές και καρκινογόνες κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Σε αυτό οφείλονται οι έντονες οσμές (αρωματικοί υδρογονάνθρακες) που δημιουργούν προβλήματα ιδιαίτερα στους εργαζομένους στη φάση κατασκευής.

Άλλες ουσίες που συναντώνται στις κατασκευές και ενδέχεται να προκαλέσουν αλλεργικές αντιδράσεις, καρκίνο, αναπαραγωγικές ανωμαλίες, ακόμη και σε συγκεντρώσεις πολύ χαμηλότερες από το όριο τοξικότητας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7 Κατάλογος επικίνδυνων ουσιών στις κατασκευές (Αργ. Δημούδη, 2006).

ΟΥΣΙΑ	ΧΡΗΣΗ / ΠΑΡΟΥΣΙΑ
Αμίαντος	εξυγίανση παλαιών κτηρίων
Βενζόλιο	βενζίνη
Πριονίδια ξύλου	ξυλουργικές εργασίες
Πριονίδια ξύλου δρυός	ξυλουργικές εργασίες
Νικέλιο	ηλεκτροσυγκολλήσεις
Χρωμικός ψευδάργυρος	αφαίρεση αντισκωρικών
Κάδμιο	αφαίρεση επιχρισμάτων
Ενώσεις χρωμίου IV	προστασία ξύλου
Διοξίνες	εξυγίανση καμένων κτιρίων
Χρωμικός μόλυβδος	Αφαίρεση επιχρισμάτων
Διγλωρομεθάνιο	Διαλύτης
Φορμαλδεΐδη	καθαρισμός, απολύμανση
Συνθετικές ίνες	Μονώσεις
PCB	λαμπτήρες αερίου
Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες	Διαλύτες

Η τοξικότητα ενός οικοδομικού προϊόντος δεν αφορά μόνο τους χρήστες του κτιρίου αλλά και το εργατικό δυναμικό που έρχεται σε επαφή μαζί του κατά την εφαρμογή του στην κατασκευή. Επίσης, ο έλεγχος της τοξικότητας δεν πρέπει να περιορίζεται στην κλίμακα του εσωτερικού χώρου αλλά και σε όλα τα στάδια του κύκλου της οικοδομικής δραστηριότητας, δηλ. κατά τη λήψη των πρώτων υλών από τη φύση και τη μηχανική παραγωγή, την οικοδόμηση, τη χρήση του κτιρίου και τέλος την κατεδάφιση και απόρριψη.

Πολλά από τα σύγχρονα δομικά υλικά, όπως τα βαρέα μέταλλα και τα συνθετικά υλικά, που προέρχονται από οργανογενή ορυκτά, κυρίως τους υδρογονάνθρακες,

παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή επικινδυνότητα και τοξικότητα, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά υλικά, όπως το ξύλο και ο πηλός, που είναι κατ' εξοχήν φιλικά και ακίνδυνα. Για κάποια από αυτά υπάρχουν υπόνοιες ενώ για άλλα είναι γνωστές η τοξικότητα και οι αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των χρηστών των κτιρίων.

Διάγνωση τοξικότητας και ταξινόμηση τοξικών και επικίνδυνων ουσιών

Τα περισσότερα σύγχρονα υλικά δεν έχουν δοκιμαστεί στο χρόνο σε σχέση με τον άνθρωπο. Όμως η ύπαρξή τους στην κατασκευή και η μακροχρόνια επίδρασή τους στον άνθρωπο υπάρχει το ενδεχόμενο να είναι τοξική. Για τον λόγο αυτό αναπτύσσονται σήμερα έρευνες και πειραματικές διαδικασίες στην προσπάθεια να εντοπιστεί και να ταξινομηθεί κατά κατηγορίες η τοξικότητα διαφόρων ουσιών. **Σκοπός της ταξινόμησης των ουσιών σε κατηγορίες είναι ο προσδιορισμός όλων των τοξικολογικών, φυσικοχημικών και οικοτοξικολογικών ιδιοτήτων των ουσιών και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των παρασκευασμάτων, οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν κινδύνους κατά το συνήθη χειρισμό και τη χρήση τους.** Μετά τον προσδιορισμό των τυχόν επικίνδυνων ιδιοτήτων, η ουσία ή το παρασκεύασμα πρέπει να επισημανθεί σύμφωνα με μια αποδεκτή διαδικασία ώστε να υποδηλώνονται οι κίνδυνοι, με σκοπό την προστασία των χρηστών, του κοινού και του περιβάλλοντος. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία η ετικέτα στα δομικά προϊόντα, πρέπει να είναι ευδιάκριτη και να περιέχει ολοκληρωμένες πληροφορίες για τη χρήση και την ασφάλεια ενός προϊόντος (Αργ. Δημούδη, 2006, Αιμ. Γ. Κορωνάιος, Γ. Σαργέντης, 2005). Στον συνοπτικό Πίνακα 2.8 παρουσιάζονται τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τα οποία αναφέρονται στην τοξικότητα και σε άλλες χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών επικίνδυνες για τον άνθρωπο, το οικοσύστημα και την βιόσφαιρα.

Η χρήση συνθετικών δομικών προϊόντων στα κτίρια και ο ελλιπής αερισμός για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, έχουν συντελέσει, κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, σε προβλήματα υγείας των ενοίκων των κτιρίων. Το σύνολο των συμπτωμάτων υγείας που παρατηρούνται στους ενοίκους των κτιρίων είναι γνωστά ως σύνδρομο άρρωστων κτιρίων (sick building syndrome) και περιλαμβάνει ρινικά, αλλεργικά, αναπνευστικά και γενικότερα προβλήματα υγείας. Βεβαίως, ο μηχανισμός εμφάνισης του συνδρόμου του άρρωστου κτιρίου είναι αρκετά περίπλοκος και κυρίως επηρεάζει άτομα με αυξημένη ευαισθησία στους χημικούς παράγοντες του περιβάλλοντος. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν συστηματική καταγραφή των κυριότερων ρύπων στο εσωτερικό του κτιρίου, π.χ. CO₂, CO, VOCs, φορμαλδεΐδη, αιωρούμενα σωματίδια, ραδόνιο.

Η διάγνωση της τοξικότητας και των λοιπών νοσογόνων ιδιοτήτων ενός δομικού προϊόντος προϋποθέτει ότι η σύσταση του είναι γνωστή. Αυτό όμως δεν συμβαίνει για τις περισσότερες των περιπτώσεων. Οι περιορισμοί που ισχύουν για την τοξικότητα των δομικών προϊόντων ισχύουν και όσον αφορά στη διάγνωση της οικοτοξικότητας δηλαδή τη τοξικότητα ενός δομικού προϊόντος στις βιοκοινότητες και τα οικοσυστήματα. Αυτό γενικά είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί γιατί δεν υπάρχουν πάντα οι απαραίτητες πληροφορίες για τις ομάδες δραστικών ουσιών που χρησιμοποιούνται ή περιέχονται στα δομικά προϊόντα.

Για την οικοτοξικολογική εξέταση των δομικών προϊόντων καθώς και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων υπάρχουν κάποιες τυποποιημένες μέθοδοι, π.χ. η μέθοδος DEV-S4 σύμφωνα με το γερμανικό πρότυπο DIN 38414, η μέθοδος TCLP

(Toxicity Characteristic Leaching Procedure) της Environmental Protection Agency των ΗΠΑ.

Πίνακας 2.8 Χαρακτηριστικοί συμβολισμοί ταξινόμησης τοξικότητας ουσιών (Αργ. Δημούδη, 2006, Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005).

Σύμβολο	Ερμηνεία
E	Εκρηκτικό
F	Πολύ εύφλεκτο
T	Τοξικό
C	Διαβρωτικό
Xi	Ερεθιστικό
O	Οξειδωτικό
F+	Εξαιρετικά εύφλεκτο
T+	Πολύ τοξικό
Xn	Επιβλαβές
N	Επικίνδυνο για το περιβάλλον

Έμμεσες ενδείξεις για την οικοτοξικότητα μίας ουσίας, εκτός από τη τοξική της δράση είναι:

- η κινητικότητα της στα διάφορα μέσα (εξαρτάται από τη διαλυτότητά της στο νερό, τη σχετική πυκνότητα του υγρού, το κινηματικό ιξώδες, την πίεση ατμών και τη σχετική πυκνότητα των ατμών),
- ο χρόνος παραμονής στο περιβάλλον (εξαρτάται από τη χημική σταθερότητα και τη φυσική ή βιολογική δυνατότητα διάσπασης της ουσίας),
- η βιοσυσσωρευτική τάση (εξαρτάται από το χρόνο παραμονής στο περιβάλλον και τη λιποφιλικότητα),
- η τασιενεργός δράση (ουσίες με μεγάλη τασιενεργό δράση μειώνουν την επιφανειακή τάση όταν προστίθενται σε ένα υγρό).

Η κινητικότητα, η χημική σταθερότητα, η τασιενεργός δράση και η τοξικότητα είναι ιδιότητες ανεπιθύμητες για το περιβάλλον, αλλά επιθυμητές σε ορισμένες χρήσεις στις κατασκευές. Μεγάλη κινητικότητα, πτητικότητα, χημική αδράνεια και σταθερότητα, είναι ιδιότητες επιθυμητές για τους διαλύτες, όπως είναι ορισμένοι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες (διχλωρομεθάνιο κ.λ.π.). Οι ουσίες αυτές έχουν τοξική καρκινογόνο και μεταλλαξιογόνο δράση και ο μεγάλος χρόνος παραμονής τους και η βιοσυσσωρευτική τους τάση τις καθιστά ιδιαίτερα οικοτοξικές. Μεγάλη χημική σταθερότητα, άρα και χρόνο παραμονής στο περιβάλλον, έχουν ουσίες που χρησιμοποιούνται ως σταθεροποιητές ασταθών υλικών (προστασία από τη διάβρωση

και την οξείδωση), ως αντιπυρικά για το ξύλο και τα συνθετικά υλικά, ως πρόσθετα στα συνθετικά προϊόντα, τα βερνίκια τις κόλλες για τη βελτίωση των ελαστικών και των πλαστικών ιδιοτήτων τους. Τέτοιου είδους ουσίες είναι τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB) που είναι ταυτόχρονα βιοσυσσωρεύσιμα, τοξικά, καρκινογόνα και μεταλλαξιογόνα.

Προϊόντα που περιλαμβάνουν τασιενεργές ουσίες είναι προϊόντα καθαρισμού και γαλακτοματοποιητές (που επιτρέπουν την καλύτερη δυνατή μίξη διαφορετικών υλικών και μέσα διαχωρισμού επιφανειών). Τασιενεργές ουσίες χρησιμοποιούνται επίσης για την αύξηση της ρευστότητας του σκυροδέματος και τη βελτίωση της αντοχής του. Τέτοιου τύπου ουσίες είναι τα ορυκτέλαια, τα ορυκτέλαια με πρόσθετα, τα γαλακτώματα ορυκτελαίου σε νερό και του νερού σε ορυκτέλαιο. Οι τασιενεργές ουσίες είναι ιδιαίτερα οικολογικές στο υδάτινο περιβάλλον γιατί μειώνουν την επιφανειακή τάση του νερού και καταστρέφουν τους μικροοργανισμούς που ζουν στην επιφάνειά του.

Η τοξικότητα είναι ιδιότητα επιθυμητή για τα βιοκτόνα που χρησιμοποιούνται ως συντηρητικά του ξύλου, ως συστατικά μυκητοκτόνων επιχρισμάτων και ως βιοσταθεροποιητές σε συνθετικά προϊόντα που περιέχουν βιοαποικοδομήσιμα συστατικά (πλαστικοποιητές, φωτοσταθεροποιητές, ενισχυτικά της αντοχής). Ως βιοκτόνα χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων η φορμαλδεΰδη, φαινολικές ενώσεις, ανόργανες και οργανικές ενώσεις κασσίτερου.

Η πλειονότητα των δομικών προϊόντων δεν περιέχουν μόνο ένα, αλλά δύο ή περισσότερα συστατικά που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και δρουν σωρευτικά. Το ίδιο ισχύει και για προϊόντα που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα ή σχεδόν ταυτόχρονα στις κατασκευές. Η κινητικότητα των βαρέων μετάλλων αυξάνεται μέσα σε όξινο περιβάλλον, ο χρόνος των βιοαποδομήσιμων ουσιών επιμηκύνεται παρουσία βιοκτόνων, η τοξικότητα ορισμένων ουσιών αυξάνεται όταν η δράση τους συνδυαστεί με τη δράση άλλων ουσιών (προσθετική δράση - συνέργεια), η παρουσία διαλυτών προκαλεί την ελευθέρωση τοξικών συστατικών που ήταν δεσμευμένα στο πλέγμα ενός πολυμερούς.

Η ταξινόμηση των ουσιών και των παρασκευασμάτων ως «λίαν τοξικά», «τοξικά» ή «επιβλαβή» πραγματοποιείται σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Προσδιορισμός τοξικότητας με τις δοκιμές LD50 ή της LC50

Η ταξινόμηση ως λίαν τοξικών ή επιβλαβών ουσιών πραγματοποιείται βάσει καθορισμένων παραμέτρων και τιμών αναφοράς (Πίνακας 2.9).

Πίνακας 2.9 Αποτελέσματα δοκιμών LD τοξικότητας (Αιμ. Γ. Κορωνάιος, Γ. Σαργέντης, 2005)

Κατηγορία	LD50	LD50	LC50
	Κατάποση, (επίμυς)	Διείσδυση του δέρματος (ινδικά χοιρίδια ή κουνέλια)	Εισπνοή (ινδικά χοιρίδια)
	mg/kg	mg/kg	mg/l/4 ώρας
Πολύ τοξικές	<= 25	<= 50	<= 0,25
Τοξικές	> 25 - 200	> 50 - 400	> 0,25 - 1
Επιβλαβείς	>200 - 2000	> 200 - 2000	> 1 - 5

- Προσδιορισμός τοξικότητας με τη δοκιμή της σταθερής δόσης

Η τοξικότητα της ουσίας ή του παρασκευάσματος μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο της σταθερής δόσης χορηγουμένων σε ζώα από το στόμα. Η ταξινόμηση πραγματοποιείται βάσει της κρίσιμης δόσης - προκαθορισμένη δόση 5, 50, 500 ή 2000 mg ανά Kg σωματικού βάρους - η οποία προκαλεί καταφανώς τοξικά αλλά όχι θανατηφόρα αποτελέσματα. Ο όρος πολύ τοξικό σημαίνει ότι η χορήγηση της ουσίας προκαλεί συμπτώματα τόσο σοβαρά ώστε η χορήγηση της αμέσως ανώτερης προκαθορισμένης δόσης αναμένεται ότι θα επέφερε το θάνατο (Πίνακας 2.10).

Πίνακας 2.10. Αποτελέσματα δοκιμών τοξικότητας της μεθόδου σταθερής δόσης (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005)

Κατηγορία	Κρίσιμη δόση
	(mg/Kg σωματικού βάρους)
Πολύ τοξικό	<5
Τοξικό	5
Επιβλαβές	50 - 500

2.2.2 Πηγές αέριας ρύπανσης εσωτερικών χώρων, ανώτατα όρια και έλεγχος – εναλλακτικές λύσεις

Πολλά από τα υλικά και προϊόντα που χρησιμοποιούνται στις δομικές κατασκευές, αποτελούνται ή περιέχουν τοξικές ουσίες, οι οποίες όταν απελευθερωθούν ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα του εσωτερικού αέρα των κατασκευών.

Ο Πίνακας 2.11 παρουσιάζει ορισμένα από τα κυριότερα υλικά που προκαλούν ρύπανση του εσωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων, οι κυριότεροι παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται και οι εναλλακτικές ενέργειες για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Δεν υπάρχουν διεθνώς αποδεκτά πρότυπα για τα όρια συγκεντρώσεων των ρύπων των εσωτερικών χώρων. Ενδεικτικά δίνονται στον Πίνακα 2.12 τα ανώτατα όρια συγκεντρώσεων ρύπων εσωτερικών χώρων που προτάθηκαν να ισχύσουν στις Ολυμπιακές εγκαταστάσεις του Σίδνεϋ κατά τη διάρκεια των ολυμπιακών αγώνων.

Πίνακας 2.11 Υλικά - πηγές εσωτερικής ρύπανσης, κύριοι παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται και προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις (Αργ. Δημούδη, 2006).

Πηγή ρύπανσης	Παράμετροι προς έλεγχο	Εναλλακτικές λύσεις
Δομικά υλικά		
Κόλλες & στεγανωτικά	Διαλυτικά	Επιλογή προϊόντων χαμηλής τοξικότητας
Γυαλί	Ενδιάμεσα φύλλα και επιχρίσματα	-----
Σιδηρούχα και μη μέταλλα	Βαφή προπαρασκευής	-----
Συντήρηση ξύλου	Χρήση τοξικών συντηρητικών	Χρήση αλάτων βόρακα, ανθεκτική ξυλεία
Τούβλα και πλίνθοι	Φυσική ραδιενέργεια	Χρήση πρώτων υλών από περιοχές με χαμηλή φυσική ραδιενέργεια
Προϊόντα μπετόν	Φυσική ραδιενέργεια Προσθετικά	Χρήση πρώτων υλών από περιοχές με χαμηλή φυσική ραδιενέργεια Αποφυγή χρήσης προσθετικών από τέφρα λιγνιτωρυχείου
Θερμομονωτικά υλικά	Ίνες και εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων	Επιλογή φυσικών μονωτικών υλικών.
Υλικά εσωτερικών χώρων		
Συνθετικά ξύλα (plywood /LVL)	Εκπομπές φορμαλδεΐδης και οργανικών πτητικών ενώσεων	Επιλογή υλικών χαμηλής εκπομπής
Φύλλα πλαστικού	Εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων	Επιλογή υλικών χαμηλής εκπομπής
Γύψος / γυψοσανίδες	Χαμηλές εκπομπές αλλά εστία συγκέντρωσης ρύπων	-----
Κεραμικά πλακάκια	Εκπομπές από κόλλες / υλικά πλήρωσης αρμών	Επιλογή υλικών χαμηλής εκπομπής
Καλύψεις τοίχων		
Ταπετσαρία και χαρτί τοίχου	Εκπομπές φορμαλδεΐδης και οργανικών πτητικών ενώσεων	Επιλογή υλικών χαμηλής εκπομπής – Καθυστέρηση στη χρήση του κτιρίου μέχρι ελάττωσης των εκπομπών
Χρώματα	Αέριες εκπομπές από τα διαλυτικά και τα προσθετικά κατά και μετά τη χρήση	Επιλογή υλικών χαμηλής εκπομπής – Καθυστέρηση στη χρήση του κτιρίου μέχρι ελάττωσης των εκπομπών
Καλύψεις δαπέδων		
Χαλιά – μοκέτες	Οσμές και εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων, συσσώρευση μικροβίων	Επιλογή μη συνθετικών προϊόντων, συγκολλητικών υλικών χαμηλής εκπομπής, σχολαστικός καθαρισμός
Μουσαμάς δαπέδου (linoleum)	Εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων	Επιλογή υλικών χαμηλής εκπομπής
Πλαστικά πατώματα από βινύλιο	Μακροχρόνιες εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων	Επιλογή υλικών χαμηλής εκπομπής
Επίπλωση		
Εκπομπές φορμαλδεΐδης και οργανικών πτητικών ενώσεων από εξαρτήματα και υλικά επικάλυψης επιφανειών		Επιλογή υλικών χαμηλής εκπομπής – μη επεξεργασμένο ξύλο.
Σύστημα θέρμανσης, αερισμού και δροσισμού		
Ανάπτυξη και μεταφορά μικροοργανισμών		Ορθός σχεδιασμός και συντήρηση του συστήματος
Εξοπλισμός και Συσκευές		
Οργανικές πτητικές ενώσεις, όζον από φωτοαντιγραφικά/εκτυπωτές		Επιλογή συσκευών χαμηλής εκπομπής ρύπων
Αέρια προϊόντα καύσης από συσκευές αερίου και υγραερίου		Χρήση συστημάτων εξαερισμού
Προϊόντα καθαρισμού		
Εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων		Επιλογή καθαριστικών χαμηλής εκπομπής

Πίνακας 2.12 Όρια συγκεντρώσεων ρύπων εσωτερικών χώρων για του ολυμπιακούς αγώνες του Σίδνεϋ (Αργ. Δημούδη, 2006).

Ρύποι	Ανώτερο όριο	Στοιχεία μέτρησης
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ή 9 ppm	Μέσος όρος 8ώρου. Επιτρεπτή υπέρβαση του ορίου 1 φορά το χρόνο
Φορμαλδεύδη (HCHO)	120 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ή 0.1 ppm	Μη επιτρεπτή υπέρβαση του ορίου
Μόλυβδος (Pb)	1.5 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Μέσος όρος τριμήνου
Όζον (O ₃)	210 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ή 0.1 ppm 170 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ή 0.08 ppm	Μέγιστη ωριαία τιμή. Επιτρεπτή υπέρβαση του ορίου 1 φορά το χρόνο. Μέσος όρος 4ώρου.
Ραδόνιο (Rd)	200 Bq.m ⁻³ ή 5.4 nCi.m ⁻³	Μέσος ετήσιος όρος
Θειικά άλατα	15 mg.m ⁻³	Μέσος ετήσιος όρος
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	700 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ή 0.25 ppm 570 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ή 0.20 ppm 60 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ή 0.02 ppm	Μέσος όρος 10λέπτου. Μέση ωριαία τιμή. Μέσος ετήσιος όρος.
Ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSP)	90 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Μέσος ετήσιος όρος
Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC)	500 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Μέση ωριαία τιμή.

2.2.3 Ακτινοβολία - ραδιενέργεια

Ένας άλλος κίνδυνος που αρχίζει να ερευνάται στο κτίριο είναι η ύπαρξη ραδιενέργειας μέσα σε αυτό. Σήμερα είναι ευρεία η χρήση της ραδιενέργειας (ερευνητική, διαγνωστική, θεραπευτική, τεχνολογική κ.λπ.). Οι άνθρωποι στην κανονική ημερήσια ζωή τους εκτίθενται στην περιβαλλοντική ακτινοβολία. Οι πηγές της φυσικής ακτινοβολίας περιλαμβάνουν (Αργ. Δημούδη, 2006, Αιμ. Γ. Κορωνάιος, Γ. Σαργέντης, 2005):

- χερσαίες πηγές (ακτινοβολία που προέρχεται από τη διάσπαση φυσικών υπαρχόντων ραδιοϊσοτόπων στα πετρώματα και στο έδαφος, π.χ. ραδόνιο)
- κοσμική ακτινοβολία
- ιατρικές πηγές (ακτίνες X)
- προϊόντα πυρηνικών δοκιμών ή δυστυχημάτων σε σταθμούς παραγωγής ατομικής ενέργειας και
- άλλες ατμοσφαιρικές πηγές.

Προβλήματα στον οπλισμό του σκυροδέματος

Παρά τα λαμβανόμενα μέτρα από εθνικούς φορείς ελέγχου ραδιενεργών πηγών είναι αναπόφευκτη η αδυναμία πλήρους ελέγχου της αγοράς, διακίνησης, χρήσης και διάθεσής τους. **Η ανεξέλεγκτη αποβολή ραδιενεργών πηγών ή / και αποβλήτων δημιουργεί κατά τα τελευταία δέκα χρόνια προβλήματα στις βιομηχανίες χάλυβα και ιδιαίτερα στις χαλυβουργίες ανακύκλωσης παλαιοσιδήρου.** Το πρόβλημα εντοπίζεται στην πιθανότητα ύπαρξης ραδιενεργών υλικών στον παλαιοσίδηρο, με πιθανό επακόλουθο την παρουσία ραδιενέργειας σε προϊόντα και παραπροϊόντα της

βιομηχανίας. Στην Ελλάδα έχει καταγραφεί ένας εντοπισμός ραδιενεργού υλικού τον Αύγουστο του 1997 από γνωστή βιομηχανία. Είναι γνωστό ότι η χώρα μας εισάγει μεγάλες ποσότητες προϊόντων χάλυβα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, στους οποίους οι εισαγωγές καλύπτουν το 35% περίπου της εγχώριας ζήτησης. Οι χάλυβες αυτοί προέρχονται σε μικρό ποσοστό από χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και σε μεγαλύτερο ποσοστό από άλλες χώρες. Αν θεωρήσουμε ότι τα προϊόντα των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξάγονται δια μέσω ενός συστήματος υψηλού επιπέδου ποιότητας και ελέγχου, σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε το ίδιο και για τα προϊόντα των τρίτων χωρών. Η αυξανόμενη με αλματώδης ρυθμούς αποβολή ραδιενεργών υλικών στον παλαιοσίδηρο ανάγει το θέμα της ραδιενέργειας του χάλυβα σε ένα από τα σοβαρότερα μελλοντικά προβλήματα της χαλυβουργικής βιομηχανίας και του ελέγχου του οπλισμού του σκυροδέματος.

Ραδόνιο

Προέλευση

Όλα τα οικοδομικά υλικά που προέρχονται από τους βράχους και το χώμα, συμπεριλαμβανομένου του σκυροδέματος, περιέχουν φυσικά ραδιονουκλεΐδια ουρανίου (^{238}U), θορίου (^{232}Th), καθώς και το ραδιενεργό ισότοπο του καλίου (^{40}K). Οι παγκόσμιοι μέσοι όροι των συγκεντρώσεων των εν λόγω νουκλεϊδίων στον φλοιό της γης ανέρχονται σε 40, 40 και 400 becquerels ανά χιλιόγραμμο, περίπου, αντιστοίχως. Το ^{238}U καθώς και το ^{232}Th αποτελούν τα αρχικά ραδιονουκλεΐδια μιας ραδιενεργού αλυσίδας αποικοδόμησης που σχηματίζει σε αλληλουχία ραδιονουκλεΐδια, συμπεριλαμβανομένου του ραδονίου (^{226}Ra), και η οποία ολοκληρώνεται τελικά με σταθερά ραδιονουκλεΐδια μολύβδου. Επομένως το αέριο ραδόνιο 222 (^{222}Rn) είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ευγενές αέριο που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της φυσικής διάσπασης των στοιχείων θόριο και ουράνιο, τα οποία υπάρχουν σε ποικίλες ποσότητες στα πετρώματα και στο έδαφος. Είναι άοσμο, άχρωμο και άγευστο και ως εκ τούτου δεν μπορεί να ανιχνευθεί από τις ανθρώπινες αισθήσεις.

Επικινδυνότητα

Το ραδόνιο 222 (^{222}Rn) διασπάται σε ραδιενεργά στοιχεία, δύο από τα οποία το πολώνιο 218 (^{218}Po) και το πολώνιο 214 (^{214}Po) εκπέμπουν σωματίδια άλφα, τα οποία είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά στο να βλάπτουν τους ιστούς των πνευμόνων και ενέχουν τον κίνδυνο για την πρόκληση του καρκίνου των πνευμόνων στους ανθρώπους. Όσο υψηλότερη είναι η έκθεση στο ραδόνιο, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος. Άμεσες δόσεις ακτινοβολίας άλφα στο εσωτερικό των πνευμόνων θεωρείται ότι προκαλούν περισσότερους θανάτους από καρκίνο των πνευμόνων από ότι οποιαδήποτε άλλη αιτία, με εξαίρεση το κάπνισμα. Ενδεικτικά όταν ζει κάποιος σε χώρο με ραδόνιο ο κίνδυνος προσβολής με καρκίνο ισούται με τον κίνδυνο που διατρέχει ένας καπνιστής που καπνίζει 20 τσιγάρα την ημέρα. 50.000 άτομα περίπου πεθαίνουν κάθε χρόνο στον πλανήτη μας από καρκίνο εξαιτίας του ραδονίου.

Επομένως, τα αδρανή και το τσιμέντο Portland, συστατικά του σκυροδέματος, ενδεχομένως περιέχουν ραδιονουκλεΐδια ουρανίου (^{238}U), ραδονίου (^{226}Ra) και

θορίου (^{232}Th) τα οποία με την πάροδο του χρόνου παράγουν αέριο ραδόνιο και άλλα αέρια όπως το πολώνιο, που όπως προαναφέρθηκε, αποδεδειγμένα προκαλούν καρκίνο του πνεύμονα. Ο ρυθμός εκπομπής ραδονίου από το σκυρόδεμα εξαρτάται από την ειδική ενεργότητα του ραδονίου (^{226}Ra) και από το πορώδες του σκυροδέματος.

Σε πολλές πολιτείες των ΗΠΑ είναι υποχρεωτική η μέτρηση του ραδονίου, πριν την έκδοση της οικοδομικής άδειας. Η Τσεχία διαθέτει ένα κρατικό δίκτυο 300.000 μετρητών ραδονίου. Σύμφωνα με έρευνα Ελληνικού Πανεπιστημίου, 12 σημεία του Ελληνικού χώρου ξεπερνούν κατά πολύ τα όρια ασφαλείας και 25 τα όρια κινδύνου. Όμως δυστυχώς στη χώρα μας κανένα μέτρο δεν παίρνεται στον χώρο της οικοδομής, παρά το γεγονός ότι το πρόβλημα ήταν γνωστό εδώ και πολλές δεκαετίες σε χώρες όπως η Σουηδία, οι ΗΠΑ και άλλες όπου ήδη έχουν ληφθεί σημαντικές αποφάσεις και έχουν γίνει ουσιαστικές ενέργειες στον τομέα αντιμετώπισής του. Στην Ελλάδα οι περιοχές με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε ραδόνιο (ραδιενέργειας) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.13.

Η συγκέντρωση ραδιενέργειας σε Bq/m^3 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c (\text{Bq/m}^3) = C (\mu\text{g/m}^3) * SA (\text{Ci/gr})$$

όπου SA (Ci/gr ή Bq/g ή dps/s) είναι η ειδική ραδιενέργεια του στοιχείου δηλαδή ο αριθμός ραδιενεργών διασπάσεων το δευτερόλεπτο (Λαζαρίδης, 2005).

Πίνακας 2.13 Οι περιοχές με τη μεγαλύτερη συσσώρευση ραδονίου στην Ελλάδα (bequerel / m^3) (http://www.buildings.gr/greek/eksoplismos/oikologika_ilika/radonio.htm)

Χωριό	Νομός	Συσσώρευση ραδονίου (Bq/m^3)
Νεράιδα	Θεσπρωτίας	511
Μελιβοία	Ξάνθης	460
Κέντρο Πόλης	Καβάλας	350
Σέλερο	Ξάνθης	320
Πρασινάδα	Δράμας	280
Μύκονος	Κυκλάδων	280
Δεσκάτη	Γρεβενών	279
Πεντάλοφο	Κοζάνης	258
Νικίσιανη	Καβάλας	237
Κέντρο Πόλης	Θεσσαλονίκης	220
Δοξάτο	Δράμας	211
Γενισέα	Ξάνθη	200

Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για την προστασία από ιοντίζουσες ακτινοβολίες

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 1999 (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:91998E3490:EL:HTML>) σε σχέση με την παρουσία ουρανίου στο σκυρόδεμα κατασκευών αναφέρει τα εξής:

Η οδηγία 89/106/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21^{ης} Δεκεμβρίου 1988 για την σύγκλιση των νομοθετικών, κανονιστικών και διοικητικών διατάξεων των κρατών μελών **όσον αφορά τα προϊόντα του τομέα των δομικών υλικών θεσπίζει βασικές απαιτήσεις για τις κατασκευαστικές εργασίες** (EEL40/11.2.1989). Αυτές πρέπει να

σχεδιάζονται και να εκτελούνται κατά τρόπον ώστε η εκπομπή επικίνδυνου ραδονίου να μην συνιστά απειλή για την υγεία των διαμενόντων ή των γειτόνων.

Η σύσταση της Επιτροπής 90/143/Ευρατόμ της 21^{ης} Φεβρουαρίου 1990 σχετικά με την προστασία του πληθυσμού από την έκθεση στο ραδόνιο μέσα στα κτίρια **θεσπίζει, για τις μέλλουσες κατασκευές, επίπεδα σχεδιασμού για την έκθεση στο ραδόνιο (EEL80/27.3.1990). Τα επίπεδα σχεδιασμού (όρια) αφορούν σε μέση ετήσια συγκέντρωση αερίων ραδονίου 200 becquerels ανά κυβικό μέτρο.** Τα επίπεδα σχεδιασμού αποβλέπουν στο να βοηθηθούν οι αρχές στη θέσπιση κανονισμών, προτύπων ή κωδίκων για τις κατασκευαστικές πρακτικές, σε περιστάσεις υπό τις οποίες τα επίπεδα σχεδιασμού θα μπορούσαν να αποτελέσουν το αντικείμενο υπερβάσεων.

Η οδηγία 96/29/Ευρατόμ του Συμβουλίου της 13^{ης} Μαΐου 1996 περί **θεσπίσεως των βασικών προτύπων ασφαλείας για την προστασία της υγείας των εργαζομένων και του ευρέος κοινού από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες**, καθορίζει ένα πλαίσιο για τον έλεγχο της έκθεσης κατά την εργασία, εντός του οποίου η παρουσία φυσικών πηγών ακτινοβολίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων ή ατόμων από το ευρύ κοινό (EEL159/29.6.1996). Τα κράτη μέλη προσδιορίζουν τις δραστηριότητες που εντάσσονται στον εν λόγω προβληματισμό και δύνανται, ειδικότερα, να προσδιορίζουν την χρήση των οικοδομικών υλικών με αναβαθμισμένα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας ως εργασιακής δραστηριότητας κατά την έννοια του τίτλου VII.

Το τρέχον ειδικό ερευνητικό πρόγραμμα για την προστασία από τις ακτινοβολίες περιέχει **επτά συμβάσεις για το ραδόνιο**. Αυτές αφορούν: την εκτίμηση της επικινδυνότητας που συνεπάγεται η εισπνοή των προϊόντων αποικοδόμησης του ραδονίου, τον κίνδυνο προκλήσεως καρκίνου των πνευμόνων και την έκθεση στο ραδόνιο σε κατοικίες, τους κινδύνους από το ραδόνιο στα κατασκευαστικά υλικά, την αναδρομική αξιολόγηση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε περιοχές που επηρεάζονται από εξορυκτικές δραστηριότητες ουρανίου και την αλληλοσύγκριση των παθητικών ανιχνευτών ραδονίου.

Ραδόνιο – Εσωτερικό κτιρίου

Όταν το ραδόνιο απελευθερωθεί, διαφεύγει από τους πόρους και τις ρωγμές των πετρωμάτων και εισέρχεται στην ατμόσφαιρα. Το ραδόνιο στον εξωτερικό αέρα, όπου αυτό αραιώνεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις, αποτελεί σημαντικά μικρότερο κίνδυνο απ' ό,τι στον εσωτερικό αέρα. Η συγκέντρωση ραδονίου στο εσωτερικό των κτιρίων οφείλεται στη γεωλογική προέλευση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του κτιρίου αλλά και στη γεωλογική σύσταση του εδάφους και των πετρωμάτων στα οποία έχει κατασκευαστεί το κτίριο.

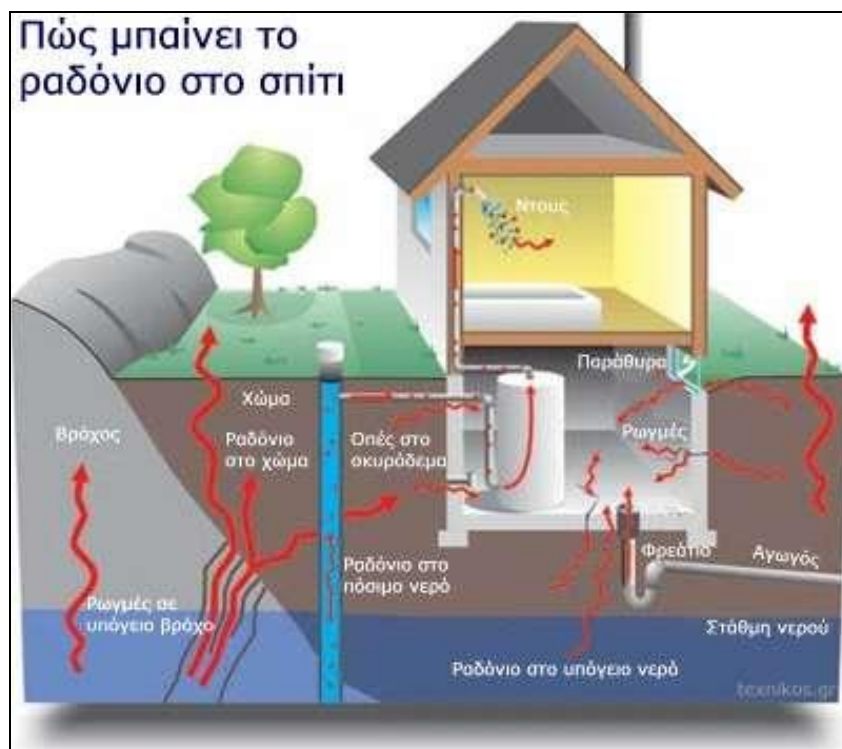
Παράγεται στο έδαφος από τη μεταστοιχείωση του ραδίου και ουρανιούχων πετρωμάτων. Απαντάται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε μεταμορφωσιγενή, πυριγενή πετρώματα, όπως ο γρανίτης, ενώ απουσιάζει σε περιοχές με ιζηματογενή πετρώματα, όπως είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα, τα οποία είναι τα πιο συνηθισμένα στην Ελλάδα.

Το ραδόνιο που παράγεται στο εσωτερικό των πετρωμάτων, παγιδεύεται και διαφεύγει αργά στην ατμόσφαιρα μέσω των πόρων και των ρωγμών στο σκυρόδεμα.

Όταν εισέλθει στην ατμόσφαιρα αραιώνεται και διασκορπίζεται και για αυτό το λόγο η συγκέντρωσή του στον ατμοσφαιρικό είναι αρκετά χαμηλή.

Η σύνθεση του εδάφους κάτω και γύρω από ένα σπίτι επηρεάζει τα επίπεδα του ραδονίου και την ευκολία με την οποία μεταναστεύει προς το εσωτερικό του σπιτιού. **Το ραδόνιο διεισδύει στο κτίριο από το έδαφος μέσω των υπογείων χώρων ή εκπέμπεται στο εσωτερικό από τα δομικά υλικά**, όπως το τσιμέντο που έχει παραχθεί από ουρανιούχα πετρώματα τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί στην τοιχοδομή ή στα δάπεδα. Η είσοδος του ραδονίου μέσα στο σπίτι από το έδαφος μπορεί να γίνει μέσω ρωγμών στα δάπεδα και στα στοιχεία από σκυρόδεμα, μέσω των σωλήνων αποχέτευσης των δαπέδων, μέσω αντλιών φρεατίων αποστράγγισης, μέσω των κατασκευαστικών αρμών και μικροσκοπικών ρωγμών ή πόρων στους τοίχους (Εικόνα 2.9).

Επειδή το ραδόνιο είναι πολύ βαρύ (είναι το πιο πυκνό γνωστό αέριο) τείνει να συγκεντρώνεται στις βάσεις των κτιρίων και για αυτό τα επίπεδα του ραδονίου είναι γενικά υψηλότερα στις βάσεις των σπιτιών και στα δωμάτια των ισόγειων, τα οποία είναι σε επαφή με το έδαφος (http://www.texnikos.gr/sick/sick_02.shtml).



Εικόνα 2.9 Τρόποι με τους οποίους το ραδόνιο μπαίνει στο εσωτερικό κτιρίου.

Άλλες πηγές ραδονίου είναι το νερό που προέρχεται από υδροφόρα στρώματα σε ουρανιούχα πετρώματα καθώς και σε ορισμένες περιπτώσεις, ο εξωτερικός αέρας, ιδίως σε κλειστές κοιλάδες όταν επικρατούν φαινόμενα θερμοκρασιακής αναστροφής (θερμός αέρας σε μικρό ύψος παγιδεύεται από ψυχρά ανώτερα στρώματα αέρα).

Μέθοδοι για τη μείωση του ραδονίου στα κτίρια

Καταρχήν, σε υφιστάμενα κτίρια (http://www.buildings.gr/greek/eksoplismos/oikologika_ilika/radonio.htm), είναι απαραίτητο να γίνεται:

- Έλεγχος του σπιτιού για την ύπαρξη ραδονίου. Αυτό είναι εύκολο και αρκετά φτηνό.
- Επισκευή του σπιτιού, εάν το επίπεδο ραδονίου σε αυτό είναι πάνω από 4 picocuries ανά λίτρο (>4pCi/L).
- Μείωση των επιπέδων ραδονίου που είναι μικρότερα των 4pCi/L επειδή και αυτά εμπεριέχουν κάποιο κίνδυνο.

Οι κύριες στρατηγικές ελέγχου και μείωσης των συγκεντρώσεων ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους ενός κτιρίου είναι:

- ο καλός αερισμός των κατοικήσιμων χώρων και ιδιαίτερα των υπογείων ώστε να ελαττώνονται οι συγκεντρώσεις ραδονίου στον εσωτερικό αέρα (σε αρκετές περιπτώσεις είναι επαρκής λύση του προβλήματος),
- ο εντοπισμός των σημείων εισόδου του ραδονίου στην κατασκευή και η σφράγιση τους,
- η στεγανοποίηση του κτιρίου και ιδιαίτερα των ρωγμών ώστε να αποκλειστεί η διείσδυση ραδονίου από το έδαφος,
- η επιλογή μη ραδιενεργών κατασκευαστικών υλικών. (Αδρανή όπως ο γρανίτης, αποτελούν πηγή ραδονίου εντός του σκυροδέματος.)

Κατασκευαστικοί τρόποι αποφυγής του ραδονίου στο χώρο της κατασκευής

Μια ποικιλία από κατασκευαστικές λύσεις είναι διαθέσιμες στους ιδιοκτήτες σπιτιών και περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, συστήματα αερισμού στα θεμέλια του σπιτιού. Τα καινούργια σπίτια μπορούν να χτιστούν με χαρακτηριστικά που εμποδίζουν την είσοδο ραδονίου και επιτρέπουν την αντιμετώπιση των προβλημάτων του ραδονίου, τα οποία θα μπορούσαν να εμφανισθούν στο μέλλον. Αυτά κοστίζουν ελάχιστα εάν τοποθετηθούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής του σπιτιού παρά σε ένα ήδη υπάρχον σπίτι. Το κόστος των επισκευών για την μείωση του ραδονίου εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής του σπιτιού και από άλλους παράγοντες (http://www.buildings.gr/greek/eksoplismos/oikologika_ilika/radonio.htm).

Υπάρχουν δύο τρόποι αποφυγής του ραδονίου στο χώρο της οικοδομής:

- Η αεριζόμενη θεμελίωση που συνίσταται στη δημιουργία, ουσιαστικά, ενός δεύτερου δαπέδου πάνω από το δάπεδο του υπογείου (με ενδιάμεσο κενό) ή στην τοποθέτηση ειδικών πλαστικών τεμαχίων, τύπου igloo, που βοηθούν στη συγκέντρωση των ρύπων και την απόρριψή τους εκτός οικοδομής (αεριζόμενα δάπεδα). Οικονομική λύση, είναι επίσης και η δημιουργία ενός δικτύου φρεατίων, κάτω από το δάπεδο, που συνδέονται μεταξύ τους με πλαστικούς σωλήνες και οδηγούν με σωλήνα το ραδόνιο εκτός οικοδομής. Στην αγορά διατίθενται και έτοιμα φρεάτια δαπέδων.
- Η χρήση ειδικών στεγανοποιητικών μεμβρανών που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Δυστυχώς, στην Ελλάδα, δεν υπάρχουν παρά ελάχιστα ειδικευμένα προϊόντα, ενώ στην Ευρώπη ενεργοποιούνται τουλάχιστον 10 εταιρείες παραγωγής ειδικών στεγανοποιητικών μεμβρανών. Τον τελευταίο καιρό, η

γνωστή εταιρεία RENOVAT εισήγαγε στην Ελλάδα αυτοκόλλητη μεμβράνη της γερμανικής εταιρείας CERESIT που δημιουργεί ένα φράγμα ραδονίου από το έδαφος.

Σχετικά ερευνητικά προγράμματα

Κατά το παρελθόν έχουν διεξαχθεί διάφορες έρευνες, όπως λόγω χάρη των Renken και Rosenberg (1995), που κατέδειξαν ότι **ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς αερίου ραδονίου μέσω συμπαγούς σκυροδέματος είναι η διάχυση**. Επίσης, τα ερευνητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι τα επίπεδα αερίου ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους εξαρτώνται από τον τύπο του μίγματος σκυροδέματος. Έχει μελετηθεί το πορώδες, η διαπερατότητα και ο συντελεστής διάχυσης για μίγματα διαφορετικής σύνθεσης και η προκαταρκτική έρευνα έδειξε ότι **τα χαρακτηριστικά μεταφοράς της ακτινοβολίας σε ό,τι αφορά το σκυρόδεμα ως φράγμα του ραδονίου εξαρτώνται από τον τύπο του μίγματος** (αναλογίες και συστατικά). Επομένως κρίθηκε απαραίτητη η συνέχιση της έρευνας προς αυτήν την κατεύθυνση. Αναλυτικά, τα αποτελέσματα ερευνητικών προγραμμάτων για τη μελέτη του σκυροδέματος ως «πηγή» ή ως «φράγμα» ραδονίου αναπτύσσονται στο υποκεφάλαιο 3.5.

2.2.4 Οικολογικές και βιο-οικολογικές ιδιότητες δομικών υλικών

Από την ανάγκη να δοθεί μια συνθετική απάντηση (αναγκαστικά διεπιστημονική) στα διάφορα προβλήματα που περιληπτικά παρουσιάστηκαν, γεννήθηκε η **βιο-οικοδομική**, ακριβώς σαν πεδίο σύγκρισης και πειραματισμού από τεχνικούς, μελετητές και τον κόσμο της παραγωγής, οι οποίοι ενεργοποιούνται στους διάφορους τομείς, ερευνώντας για μια καλύτερη ποιότητα στην κατασκευή. Όπως προαναφέρθηκε, οι αρχικές αιτίες ενός μεγάλου μέρους των παθολογικών φαινομένων (αλλεργικές εκδηλώσεις, πονοκέφαλοι, δυσχέρεια συγκέντρωσης, κ.λπ.) που προσβάλλουν τους χρήστες του σύγχρονου κτηρίου, υπάρχουν πράγματι στα ίδια τα υλικά κατασκευής, είτε λόγω της εσωτερικής τους σύνθεσης, είτε λόγω των διαδικασιών παραγωγής τους, είτε λόγω της τελικής επεξεργασίας (φινιρίσματα) στην οποία υποβάλλονται. *Μια μελέτη συνειδητά βιο-οικολογική πρέπει λοιπόν να ξεκινά εξετάζοντας κατά προτεραιότητα θέματα σχετικά με τη φυσικότητα της κατασκευής, τόσο στην περίπτωση ενός νέου κτιρίου όσο και σε εκείνη μιας ανακατασκευής.* Στην τελευταία περίπτωση πρέπει στην πρώτη θέση να βάλουμε την εργασία αναγνώρισης της υλικής σύστασης του έργου στο οποίο πρόκειται να γίνει η επέμβαση, ώστε να προβλεφθεί π.χ. σε υφιστάμενα κτίρια η αντικατάσταση των στοιχείων εκείνων που είναι ενδεχομένως επιβλαβή για την υγεία των ενοίκων με οικολογικότερα δομικά στοιχεία.

Πριν από λίγα χρόνια ήταν αδιανόητο να βρει κανείς μερικά έστω απλά οικολογικά οικοδομικά υλικά στην Ελλάδα και έπρεπε να καταφύγει στην εισαγωγή τους, και μάλιστα με μεγάλο κόστος, από το εξωτερικό. Ευτυχώς, *σήμερα και η ελληνική αγορά κατακλύζεται από προϊόντα και υπηρεσίες υψηλού επιπέδου και μπορεί κανείς να βρει σχεδόν τα πάντα και μάλιστα σε τιμές ανταγωνιστικές των συμβατικών - και πολλές φορές ρυπογόνων - οικοδομικών υλικών.* Δεν υπάρχει λοιπόν καμία πλέον δικαιολογία για τη μη χρησιμοποίηση οικολογικών οικοδομικών υλικών, καθώς ο μύθος του υψηλότερου κόστους καταρρέει σιγά - σιγά, με το επιχείρημα της σύγκρισης του κόστους. Υπάρχουν πια οικολογικά θερμομονωτικά υλικά που

κοστίζουν 5% φτηνότερα από τα συμβατικά. Υπάρχουν ακόμα, εναλλακτικοί σοβάδες, που αν κανείς συνυπολογίσει το γεγονός ότι γλυτώνει το βάψιμο, κοστίζουν φτηνότερα από τους συμβατικούς. Επίσης, τα χρώματα ήπιας χημείας κοστίζουν το ίδιο με τα τοξικά συμβατικά.

Μία πρώτη σύγκριση μεταξύ σκυροδέματος και άλλων δομικών υλικών έγινε στο υποκεφάλαιο 2.1 σε σχέση με την εμπεριεχόμενη ενέργεια. Π.χ. στον Πίνακα 2.3 όπου παρουσιάζεται η εμπεριεχόμενη ενέργεια και τα ισοδύναμα εκπομπών CO₂ και SO₂ διαφόρων οικοδομικών υλικών, φαίνεται ότι **το σκυρόδεμα έχει πολύ χαμηλότερη εμπεριεχόμενη ενέργεια και εκπομπές αερίων ρύπων κατά την παραγωγή του, σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά** όπως την άσφαλο, το χάλυβα κ.ά.

Ακολουθεί στη συνέχεια μια σύντομη παρουσίαση του σκυροδέματος ως προς οικολογικές και βιο-οικολογικές παραμέτρους του, καθώς και η παρουσίαση ορισμένων «εγγυημένα» οικολογικών προϊόντων (http://www.themistsipiras.gr/eco_materials.html). Παρουσιάζεται τέλος, η ευρωπαϊκή στρατηγική προς έναν αιεφόρο σχεδιασμό και περιβαλλοντική διαχείριση στον κατασκευαστικό κλάδο.

Σκυρόδεμα

Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα πραγματοποιούνταν έρευνες για την αντικατάσταση του ξύλου. Ο Johann Alex Eriksson προσπαθώντας να αντικαταστήσει το ξύλο με ένα ισότροπο υλικό με τα ίδια χαρακτηριστικά (καλή θερμική συμπεριφορά, μονολιθική κατασκευή, εύκολο στην χρήση) και χωρίς τα μειονεκτήματα, (αντοχή σε πυρκαγιά και οργανική αποσύνθεση) εφηύρε το 1924 το πρώτο ελαφροσκυρόδεμα το οποίο δεν βιοδιασπάται τόσο εύκολα όσο το ξύλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι σήμερα ανάμεσα στα είδη σκυροδέματος (types of concrete) περιλαμβάνονται το **οπλισμένο σκυρόδεμα** (Reinforced Concrete), το **κατασκευασμένο επιτόπου** Cast-in-place Concrete, τα **προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος** (Precast Concrete), τα **λιθοσώματα από σκυρόδεμα** (Concrete Masonry Units, CMUs), το **κυσλωτό ή αερικό σκυρόδεμα ή πορομπετόν** (χαμηλής πυκνότητας σκυρόδεμα, λόγω περιεχόμενου αέρα ή κενών) (Autoclaved Cellular Concrete, ACC ή Aerated, AAC) που αναπνέει (διαπνέον υλικό) και έχει σχεδόν διπλάσιες τιμές θερμομονωτικών ιδιοτήτων από το συμβατικό σκυρόδεμα (Ballard and Rant, 2006). Επίσης **έχουν αναπτυχθεί τύποι σκυροδέματος με πρόσθετα – πρόσμικτα** **οποίοι επιδεικνύουν οικολογικές ιδιότητες** (air-entraining, accelerating, retarding, superplasticizers - water reducing, fly ash, pozzolanes, όπως αυτά αναλύονται στο κεφάλαιο 1 και το κεφάλαιο 3).

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα που συνδέονται με το σκυρόδεμα εντοπίζονται κυρίως στα προβλήματα που συνεπάγεται η εξόρυξη των πρώτων υλών και η παραγωγή του τσιμέντου, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 1.2. Το σκυρόδεμα αποτελείται από αδρανή, τσιμέντο και νερό. Το τσιμέντο είναι η κύρια συνιστώσα για την παρασκευή σκυροδέματος. Απαιτούνται επίσης 1200 με 1500 κιλά αδρανή για να παραχθεί ένας τόνος τσιμέντου και έξι εκατομμύρια Btu ενέργεια (5-6 MJ/Kg) ανάλογα με τη μέθοδο και το καύσιμο που χρησιμοποιείται. Επειδή γενικά οι εγκαταστάσεις παραγωγής είναι μακριά από την κατασκευή, η μεταφορά του σκυροδέματος απαιτεί και αυτή μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα είναι τα πλέον οικολογικά από πλευράς εμπεριεχόμενης ενέργειας για τους εξής λόγους:

- Αξιοποιείται όλο το υλικό (μείωση του χαμένου υλικού) αφού το υλικό χυτεύεται με ακρίβεια σε καλούπια σε σχέση με τον ξυλότυπο της οικοδομής.
- Δεν είναι απαραίτητη η κοπή ξύλου για την κατασκευή ξυλοτύπων.
- Είναι ευκολότερη η παραγωγή του δομικού στοιχείου και το υλικό περιέχει λιγότερη ενσωματωμένη ενέργεια (περίπου 4 MJ/kg).

Άλλο πρόβλημα στο σκυρόδεμα είναι η χρήση τοξικών προσθέτων, όπως π.χ. αμιάντου (αμιαντοτσιμέντο) για το οποίο σήμερα υπάρχουν ενδείξεις ότι είναι καρκινογόνο και έχει απαγορευθεί. Επίσης, τα κεραμικά τούβλα αντικαθίστανται συνήθως με **αερικά σκυροδέματα** τα οποία όμως χρησιμοποιούν διάφορα πρόσθετα για να επιτύχουν τις επιδιωκόμενες ιδιότητές τους. Επειδή η εφαρμογή των υλικών αυτών είναι πρόσφατη **δεν έχουν πιστοποιηθεί ακόμη για την τοξικότητά τους.**

Όσον αφορά στο οπλισμένο σκυρόδεμα υπάρχει επίσης και ο κίνδυνος από τον οπλισμό σε περίπτωση που έχει εκτεθεί σε ραδιενέργεια.

Σημαντικό πρόβλημα επίσης στο σκυρόδεμα είναι ότι **υπάρχουν τεράστιες ποσότητες σκυροδέματος που δεν ανακυκλώνονται.** Έχει υπολογιστεί ότι σχεδόν 50.000.000 τόνοι από σκυρόδεμα αποβάλλονται στις χωματερές κάθε χρόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ελάχιστο από το σκυρόδεμα αυτό επαναχρησιμοποιείται ή ανακυκλώνεται. Στη χώρα μας η ανακύκλωση σκυροδέματος βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο, όπως αναλύεται στο υποκεφάλαιο 3.3. **Το κόστος αυτών των αποβλήτων είναι τεράστιο** και για το λόγο αυτό υπάρχουν σε εξέλιξη έρευνες για την προσπάθεια επαναχρησιμοποίησης του σκυροδέματος. Μέχρι σήμερα έχει αποδειχθεί εργαστηριακά (χωρίς να εφαρμοστεί στη βιομηχανία) ότι **είναι δυνατός ο διαχωρισμός του οπλισμού από το σκυρόδεμα, αλλά είναι μία οικονομικά ασύμφορη διαδικασία.** Για το λόγο αυτό τα ανακυκλούμενα σκυροδέματα χρησιμοποιούνται συνήθως σαν αδρανή για εξυγίανση οδοστρωμάτων, εδαφών κ.α. (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005).

Προϊόντα που οι ειδικοί θεωρούν ότι είναι εγγυημένα «πράσινα»

1. **Ωστενικός χάλυβας:** Ο κανονικός δομικός χάλυβας προκαλεί μια μεταβολή του γήινου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όπως μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί μετακινώντας μια μαγνητική πυξίδα κατά μήκος μιας ράβδου του σιδηροπλισμού. Χωρίς να υπερβάλουμε τονίζοντας τις πιθανές επιδράσεις αυτής της μεταβολής στον ανθρώπινο οργανισμό, κάτι που είναι πραγματικά δύσκολο να εκτιμηθεί, παραμένει γεγονός ότι πολλές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα γέρνουν πρόωρα λόγω της διαδικασίας της ενανθράκωσης και της επακόλουθης οξειδωσης των εκτεθειμένων ράβδων του σιδηροπλισμού. Ο ωστενικός χάλυβας, λόγω της χαρακτηριστικής του σύνθεσης, *είναι μη μαγνητικός και ανοξειδωτος.* Μοναδικό μειονέκτημά του, το υψηλό του κόστος.
2. **Ωμη Άργιλος:** Η ωμή άργιλος, κατάλληλα σχηματισμένη με τη μορφή ωμόπλινθων ή χυτή σε καλούπια που μοιάζουν με αυτά του σκυροδέματος, αποκαλύπτεται ότι είναι ένα *άριστο δομικό υλικό όσον αφορά στη μηχανική ανοχή, στη θερμική μόνωση και στη δυνατότητα «αναπνοής» των εξωτερικών τοίχων.* Εξάλλου, σε ολόκληρη την περιοχή της Μεσογείου υπάρχει μακρά παράδοση στη χρήση αυτού του υλικού.
3. **Ασβέστης:** Είναι ένα προϊόν που προτείνεται από τους υποστηρικτές της βιοοικοδομικής για κάθε τύπο επιφανειακών τελειωμάτων των τοίχων, επειδή

«αναπνέει», επιτρέποντας έτσι μια σταθερή ανταλλαγή αέρα μεταξύ εσωτερικού χώρου και εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ εξάλλου, είναι εύκολη η συντήρηση και η ανακατασκευή του στις ζώνες που υφίσταται φθορές με τον χρόνο.

4. **Κόλλα από καουτσούκ:** Οι κόλλες από συνθετικές ρητίνες μπορούν να γίνουν πηγές επιβλαβών αναθυμιάσεων για τον άνθρωπο. Αντίθετα, η κόλλα από καουτσούκ είναι φυσικό προϊόν, ατοξικό, αρκετά σταθερή, που διατηρεί τις συγκολλητικές της ιδιότητες στον χρόνο.
5. **Κετσές από καρύδα:** Συνιστάται από το εξειδικευμένο Ινστιτούτο Οικοδομικής Βιολογίας (Institut fur Baubiologie) του Ρόχενχαϊμ (Γερμανία), ως ένα από τα «πράσινα» υλικά. Ο κετσές από καρύδα έχει πολλά πλεονεκτήματα σαν ηχομονωτικό υλικό σε επενδύσεις οροφών, όπου συμβάλλει σημαντικά στην απόσβεση των ταλαντώσεων και στην εξασθένιση της μετάδοσης των θορύβων.
6. **Ξύλο:** Η οργανική αποσύνθεση του ξύλου χαρακτηρίζει το ξύλο σαν οικολογικό δομικό υλικό. Έτσι το ξύλο είναι ένα από τα κύρια υλικά της βιοοικοδομικής. Εκτός από αυτό, και παρά την αντίθετη διάδοση, *το ξύλο αντέχει από τη φύση του στη φωτιά, όταν έχει το κατάλληλο πάχος.* Είναι σημαντικό, ωστόσο, να μην αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά του με επεξεργασία με προϊόντα χημικής προέλευσης (εντομοκτόνα, μυκητοκτόνα, κ.ά.) που αποτελούν πηγή βλαβερών αναθυμιάσεων, αλλά να χρησιμοποιούνται και για αυτούς τους σκοπούς φυσικά προϊόντα.
7. **Ξύλο εμποτισμένο με μαγνήσιο:** Εκτιμάται ιδιαίτερα στη βιοοικοδομική, ιδιαίτερα από τον καθηγητή και μεγάλο γκουρού της βιοοικονομικής Anton Schneider του Ινστιτούτου Οικοδομικής Βιολογίας του Ρόζενχαϊμ, ήδη από το 1979. Μερικά από τα κυριότερα πλεονεκτήματά του, είναι *η καλή θερμική και ακουστική του μόνωση, η ικανότητα αναπνοής, η μικρή υγρασκοπικότητα, το γεγονός ότι είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και μη ραδιενεργό.*
8. **Κερί από μέλισσες:** Βαθμολογημένο με το 3 (το μεγαλύτερο βαθμό που μπορεί να δώσει το Ινστιτούτο του Ρόζενχαϊμ), *το κερί των μελισσών είναι το καλύτερο μέσο για το φινίρισμα και την προστασία των ξύλινων δαπέδων και άλλων ξυλοκατασκευών.*
9. **Πλέγμα γιούτας:** Στην κατασκευή εσωτερικών μονωτικών επιχρισμάτων με βάση φόδρα από πλέγμα γιούτας, απορροφώνται οι τάσεις, λόγω της συστολής που προκαλεί η εξάτμιση του νερού του κονιάματος, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία μικρών ρηγματώσεων και στην περίπτωση αυτή επίσης, πρόκειται για ένα φυσικό υλικό που προέρχεται από μια ανανεώσιμη πηγή και μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί στην οικοδομική.
10. **Φελλός:** Είναι ένα άριστο μονωτικό και ηχοαπορροφητικό υλικό. Ο φελλός συμπιεσμένος σε φύλλα χωρίς κόλλα ή τριμμένος σε κόκκους, είναι ένα καλό παράδειγμα ενός φυσικού υλικού ανανεώσιμου και απόλυτα μη τοξικού.
11. **Πέτρα:** Σημαντικό είναι το γεγονός ότι σε μια παραδοσιακή κατοικία που ερειπώθηκε, δεν μένει τίποτα το ενοχλητικό στο οικόπεδο να τη θυμίζει εκτός από μερικούς λαξευμένους λίθους. *Οι λίθοι αυτοί είναι εύκολο να επαναχρησιμοποιηθούν στην ανακατασκευή ενός ισομεγέθους κτηρίου στον χώρο της παλαιάς οικοδομής.* Μικρού όγκου κατασκευές με τοιχοποιία από φυσικούς λίθους οι οποίες ανακυκλώνουν φυσικούς λίθους παλαιών

κατασκευών του χώρου, είναι οικονομικότερο και απλούστερο να κατασκευαστούν από κατασκευές με οπλισμένο σκυρόδεμα.

Τέλος, όπως προτείνεται από αρκετούς μηχανικούς που ασχολούνται με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό και την οικολογική δόμηση (http://www.themistsipiras.gr/eco_materials.html, http://www.ecolife.gr/images/ecohouse_2011/ecohouse_2011.pdf) μία σύγχρονη οικολογική κατασκευή μπορεί να έχει φέροντα οργανισμό (σκελετό), τόσο με φέρουσα τοιχοποιία, όσο και με οπλισμένο σκυρόδεμα και να κτισθεί τόσο με τούβλα, όσο και με πέτρα. Η βάση του (θεμελίωση), ανάλογα με την σεισμικότητα της περιοχής κατασκευής του, με την κλίση του οικοπέδου, και με την σύσταση του εδάφους μπορεί επίσης, να είναι με οπλισμένο σκυρόδεμα. Η θερμομόνωσή του θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 7.5 εκατοστά, με οικολογικά υλικά, όπως είναι ο ηρακλίτης, το μαλλί προβάτου, μονωτικά από κέναφ ή ίνες καλαμποκιού και όχι με χημικά και καρκινογόνα υλικά. Επίσης, μπορεί να βαφτεί με οικολογικά χρώματα. Το τσιμέντο κατασκευής του δεν πρέπει να έχει ραδιενεργό τέφρα και οι ράβδοι οπλισμού, δεν θα πρέπει να έχουν ραδιενέργεια (με σχετικά πιστοποιητικά από τους προμηθευτές τσιμέντου και οπλισμού). Τα κουφώματα κατά προτίμηση θα πρέπει να είναι ξύλινα και η επεξεργασία της προτεινόμενης ξύλινης στέγης, να γίνει με μη-τοξικά εμποτιστικά του ξύλου (π.χ. βαρικό άλας, κλπ.). Τέλος, της τοποθέτησης του κτιρίου στον χώρο, καλό είναι να έχει προηγηθεί γεωβιολογική μελέτη, με μέτρηση των γραμμών του δικτύου Χάρτμαν, από ειδικευμένους επιστήμονες, μέτρηση της γεω- και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της ευρύτερης περιοχής και του ραδονίου. Στην φάση της θεμελίωσης για την αποφυγή συγκέντρωσης του πτητικού και επικίνδυνου για την υγεία, αερίου ραδονίου, σε περιοχές εγκατάστασης με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου θα πρέπει να κατασκευάζονται ειδικά φρεάτια ή / και τοποθετούνται ειδικές μεμβράνες.

Η ανάγκη για αιεφόρες κατασκευές

Σήμερα η κατασκευή στην Ευρώπη καταναλώνει το 50% των φυσικών πρώτων υλών, το 40% της ενέργειας και παράγει περισσότερο από το 50% των απορριμμάτων. Η αναπτυξιακή σημασία της, ως του μεγαλύτερου σήμερα βιομηχανικού κλάδου στην Ευρώπη με προβλεπόμενη αύξηση δαπανών και ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας, απαιτεί την εναρμόνισή της με τα διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα όσον αφορά στην σχέση της με το περιβάλλον (Α. Μοροπούλου, 2009).

Η στρατηγική του αιεφόρου σχεδιασμού συνομολογημένη από την Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Έρευνας & Τεχνολογίας για την Κατασκευή (ECTP: European Construction Technology Platform, <http://www.ectp.org/>), με πρωταγωνιστικό ρόλο και της ομόλογης Ελληνικής Πλατφόρμας (<http://www.hctp.tee.gr/>), έχει ιδιαίτερη δυναμική, δεδομένου ότι εκφράζει από κοινού τη «βιομηχανία» της κατασκευής, τους φορείς έρευνας, τεχνολογίας και καινοτομίας, τους φορείς χρήστες – δημόσιους και ιδιωτικούς – καθώς και τους κοινωνικούς φορείς. Η Ελληνική Πλατφόρμα Έρευνας και Τεχνολογίας για την Κατασκευή συντονίζεται με την Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Έρευνας και Τεχνολογίας για την Κατασκευή στους 3 βασικούς άξονες: την αναμόρφωση της βιομηχανίας των κατασκευών, το δημόσιο συμφέρον και τις απαιτήσεις των χρηστών και της κοινωνίας και τέλος την αιεφορία της ανάπτυξης και του περιβάλλοντος με την θέσπιση και υλοποίηση της αιεφόρου κατασκευής.

Η Εθνική Στρατηγική βασίζεται στην στρατηγική της Ελληνικής Πλατφόρμας Έρευνας & Τεχνολογίας για την Κατασκευή. Οι προτεραιότητες που έχουν θεσπιστεί

για την Αειφόρο Κατασκευή έχουν να κάνουν με την εισαγωγή καινοτομιών για την ενίσχυση της αειφορίας των κατασκευών/υποδομών προς την κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων των κατασκευών στο περιβάλλον (σωστή διαχείριση των ενεργειακών πόρων και των πρώτων υλών για τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος) καθ'όλη τη διάρκεια ζωής τους, καθώς και της ελαχιστοποίησης της δράσης των περιβαλλοντικών φορτίων στην κατασκευή και αύξηση του χρόνου ζωής αυτής. Η αειφόρος κατασκευή εμπλέκεται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των δομικών υλικών: το στάδιο πριν την κατασκευή (εξόρυξη, σύνθεση-παραγωγή, συσκευασία και μεταφορά), το κατασκευαστικό στάδιο (κατασκευή, εγκατάσταση, χρήση, διατήρηση) και το στάδιο «μετα-κτιριακής» χρήσης (διάθεση των υλικών: επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση ή απόρριψη). Η αύξηση του χρόνου ζωής της κατασκευής (βιώσιμα υλικά και κατασκευαστικές τεχνικές και τεχνολογίες) και η εισαγωγή υψηλής μετρητικής τεχνολογίας παρακολούθησης και ελέγχου υλικών, έργων, παραγωγικών διαδικασιών, σε πραγματικό χρόνο και σε πραγματική κλίμακα, με παράλληλο σχεδιασμό και ανάπτυξη βάσεων δεδομένων, συστημάτων ποιότητας, έμπειρων συστημάτων για την αποτίμηση των δεδομένων, καθώς και την ανάδειξη δεικτών αναγκαιότητας επέμβασης και κατωφλίων προειδοποίησης και συναγερμού, αποτελούν τα βασικά αντικείμενα του σχεδιασμού της αειφόρου ανάπτυξης.

Η ευρωπαϊκή στρατηγική προς έναν αειφόρο σχεδιασμό και μία περιβαλλοντική διαχείριση του κατασκευαστικού κλάδου εκφράζεται με σαφήνεια μέσα από τους στόχους τόσο της Ευρωπαϊκής όσο και της Ελληνικής Πλατφόρμας Έρευνας και Τεχνολογίας που πρέπει να εφαρμοστούν ως το 2030. Οι **στόχοι αυτοί για την αειφόρο κατασκευή** αφορούν:

- α) τη μείωση των καταναλισκόμενων ενεργειακών, υδατικών πόρων και πρώτων υλών κατά 30%,
- β) τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών, της κατασκευής και του τρόπου παραγωγής του δομημένου περιβάλλοντος κατά 40%,
- γ) τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων του περιβάλλοντος στην κατασκευή, με διασφάλιση της ποιότητάς της, με ελάχιστο κόστος και στο μέγιστο χρόνο ζωής κατά 50% και
- δ) την αειφόρο διαχείριση των κτιριακών υποδομών και των μεταφορών σε όλο τον κύκλο ζωής τους.

Για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την παραγωγή και απόρριψη των υλικών έχει τεθεί ο στόχος της μείωσης κατά 30% στη χρήση φυσικών πρώτων υλών κατά την παραγωγή, της επαναχρησιμοποίησης κατά 100% των κατασκευών και των απορριμμάτων από κατασκευές και της μείωσης κατά 30% του ποσοστού διοξειδίου κατά την παραγωγή τους.

Τέλος, σε ότι αφορά τη βελτίωση της χρήσης των πόρων στα κτίρια και τις υποδομές με τη χρήση βελτιωμένων υλικών, μέχρι το 2030 θα πρέπει οι μονωτικές και αποθηκευτικές ιδιότητες (θερμικές, ακουστικές, ηλεκτρομαγνητικές) να αυξηθούν κατά 20% σε σχέση με τα σύγχρονα υλικά, η ενέργεια που καταναλώνεται για τις μεταφορές να μειωθεί κατά 30% με τη χρήση βελτιστοποιημένων υλικών στους δρόμους και η συνολική κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές να μειωθούν κατά 50% κατά τη συνολική διάρκεια ζωής των νέων κτιρίων.

Το δομημένο περιβάλλον οφείλει να συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών, παράλληλα όμως καταναλώνει ενέργεια, υλικά και νερό, τα οποία

επιβαρύνουν το περιβάλλον και υποβαθμίζουν την ποιότητα ζωής. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η αναζήτηση, στην κατεύθυνση της αειφόρου ανάπτυξης, κατάλληλου σχεδιασμού, για τη διασφάλιση της αειφορίας και της οικονομικής αποδοτικότητας των κατασκευών, καθώς και χρήσης καινοτόμων τεχνολογιών για την παρακολούθηση και τον έλεγχο τόσο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κατασκευής, όσο και για την αύξηση του χρόνου ζωής της. Είναι απαραίτητη η χρήση βασικών εργαλείων παρακολούθησης και αποτίμησης κινδύνων, όπως **επί τόπου Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος**, και περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως π.χ. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 2.3). Άλλωστε το κόστος ενός προϊόντος αναπόφευκτα πλέον εμπεριέχει μέσα του την έννοια της ανάλυσης του κύκλου ζωής του προϊόντος, η οποία συνυπολογίζει τα περιβαλλοντικά κόστη από κάθε φάση του κύκλου ζωής του.

Με τη χρήση του μη καταστρεπτικού ελέγχου είναι δυνατή η αποτίμηση της έκτασης των φθορών και των ελαττωμάτων μιας κατασκευής, σε πραγματική κλίμακα, με μικρό κόστος. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν μία βάση για μελλοντικές μελέτες και μία χρήσιμη πηγή για την ανάπτυξη προγραμμάτων συνεχούς παρακολούθησης και διατήρησης των δομών αυτών. **Οι μη καταστρεπτικές τεχνικές σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους ελέγχου των υλικών και των κατασκευών παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα**, όπως η δυνατότητα εξέτασης επί τόπου, η διατήρηση της ακεραιότητας της εξεταζόμενης δομής, η γρήγορη αποκάλυψη των αποτελεσμάτων χάρη στο υψηλό τεχνολογικό επίπεδο των οργάνων που χρησιμοποιούνται, η παροχή τόσο ποιοτικών αλλά και ποσοτικών αποτελεσμάτων κ.ά.

2.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΦΙΛΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.3.1 Γενικά για την περιβαλλοντική αξιολόγηση δομικών υλικών

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αξιολόγησης των δομικών υλικών οι οποίες χαρακτηρίζονται ποιοτικές ή ποσοτικές ή ποσοτικά ποιοτικές. Επιπλέον, κάποιες από αυτές λαμβάνουν υπόψη την ανάλυση ολόκληρου του κύκλου ζωής των υλικών και κάποιες άλλες όχι. Επομένως οι μέθοδοι περιβαλλοντικής αξιολόγησης διακρίνονται σε:

- αυτές που επιδιώκουν την *αξιολόγηση και κατάταξη των δομικών υλικών και προϊόντων ως προς την περιβαλλοντική τους φιλικότητα* (με σήμανση ή βαθμολόγηση),
- αυτές που χρησιμοποιούνται για την *ποσοτικοποίηση και αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών*, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης του κύκλου ζωής των υλικών (Life Cycle Analysis, LCA).

Σε κάθε μέθοδο χρησιμοποιούνται διαφορετικοί παράμετροι αξιολόγησης και για κάθε παράμετρο διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας.

Η «περιβαλλοντική - οικολογική προτίμηση» για παράδειγμα είναι μια ποιοτική μέθοδος αξιολόγησης των υλικών που δεν λαμβάνει υπόψη τον κύκλο ζωής των υλικών, ενώ η «οικολογική αειφορία δομικών υλικών» είναι μια ποσοτική μέθοδος

που περιλαμβάνει την ανάλυση του κύκλου ζωής των υλικών. Τέλος, η πολυκριτηριακή ανάλυση είναι μια μέθοδος που μπορεί να χαρακτηριστεί ποσοτική και ποιοτική μαζί, όπως αναλύεται και στη συνέχεια. Σε επόμενο υποκεφάλαιο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των μεθόδων περιβαλλοντικής αξιολόγησης που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα (Αργ. Δημούδη, 2006).

Οι κύριοι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση αναφέρονται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των υλικών και καλύπτουν:

- την περιβαλλοντική καταστροφή από την εξόρυξη των πρώτων υλών,
- τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών,
- το βαθμό ανάκτησης των πρώτων υλών,
- την ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή των υλικών,
- το βαθμό της παραγωγής αποβλήτων και απορριμμάτων κατά το στάδιο της παραγωγής και το βαθμό ρύπανσης που προκαλείται.

Αξίζει να αναφερθεί τέλος, ότι η εξεργειακή ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο ελέγχου των δομικών υλικών κατά το σχεδιασμό αειφόρου κατασκευής.

Επειδή το θέμα των οικολογικών υλικών είναι ευρύ και απασχολεί ιδιαίτερα τη σύγχρονη κοινωνία, για τη συστηματικότερη αντιμετώπιση των παραμέτρων που πρέπει να εξεταστούν, αναπτύσσεται σήμερα μια νέα επιστήμη, η οποία ονομάζεται «Επιστήμη Ζωής-Χρόνου-Μηχανικού». Η επιστήμη αυτή αναλύει τις σχέσεις των υλικών με βάση τον κύκλο ζωής τους, αλλά και την ίδια την κατασκευή στο σύνολό της, με βάση τα στάδια του κύκλου ζωής της. Τέλος, αξίζει να παρατηρηθεί ότι το θέμα της οικολογικής δόμησης γενικά και ιδιαίτερα το θέμα των οικολογικών υλικών, σίγουρα δεν είναι λυμένο. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχει ακόμα ένας αδιαμφισβήτητος και συγκεκριμένος αλγόριθμος που να το υποστηρίζει.

Ανάλυση Ενέργειας - Εξέργειας

Ο κατασκευαστικός κλάδος μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της αειφόρου ανάπτυξης γενικότερα. Η ανάλυση τόσο της ενέργειας όσο και της εξέργειας που χρησιμοποιείται στις κατασκευές βοηθά στην αποτίμηση της αποδοτικότητας του κλάδου και στην διεξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στον τρόπο μείωσης των πλέον ενεργοβόρων σύνθετων υλικών και διεργασιών. Η δυναμική των κατασκευαστικών επιχειρήσεων αυξάνεται συνεχώς και η πλειοψηφία τους καταναλώνει σχετικά υψηλά ποσά ενέργειας τα οποία καλύπτονται με τη χρήση αργού πετρελαίου, ντίζελ, υγραερίου, ηλεκτρισμού και ασφάλτου.

Η **εξέργεια** θεωρείται ως το θεμελιώδες μέτρο της θερμοδυναμικής απόκλιση ενός συστήματος θεώρησης από το περιβάλλον του. *Είναι ίση με το ανώτατο ποσό του έργου που μπορεί να εκτελέσει το σύστημα όταν οδηγείται αναστρέψιμα σε θερμοδυναμική ισορροπία ως προς το περιβάλλον αναφοράς.* Τα τελευταία χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες σχετικά με το τσιμέντο και την εξέργεια – εξεργειακή ανάλυση παραγωγής τσιμέντου, με την ανάλυση ενέργειας και εξέργειας μύλου πρώτων υλών σε εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου, με την ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση περιστροφικού καυστήρα σε τσιμεντοβιομηχανία – και μελέτες σχετικά με τα υλικά και συστήματα κτιριακών χρήσεων – εξεργειακή ανάλυση θερμικών διεργασιών στη βιομηχανία των δομικών υλικών, εκτίμηση των μεθόδων εξεργειακής κατανάλωσης σε ενεργοβόρα συστήματα κτιριακής χρήσης. Η

εξεργειακή ανάλυση του σκυροδέματος αποδεικνύει τη μεγάλη περιβαλλοντική επιβάρυνση, λόγω αυξημένης εξεργειας, κατά τη μέθοδο παραγωγής κλίνκερ. Το αποτέλεσμα αυτό προσφέρει γόνιμο έδαφος για εποικοδομητικές προτάσεις με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τσιμέντου. Επομένως, η εξεργειακή ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο ελέγχου των δομικών υλικών κατά τον σχεδιασμό της αειφόρου κατασκευής (Α. Μοροπούλου, 2009).

Ανάλυση του κύκλου ζωής

Η **Ανάλυση του Κύκλου Ζωής** είναι μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων (*ποσοτική μέθοδος αξιολόγησης*) που συνδέονται με κάποιο προϊόν, δραστηριότητα ή διεργασία *προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον.* Η ανάλυση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Πρόκειται δηλαδή για ένα εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης και λήψης αποφάσεων που σκοπό έχει να αποτιμήσει τις επιδράσεις από τη χρήση ενέργειας και την επεξεργασία υλικών, συμπεριλαμβανομένης της αποβολής των αποβλήτων στο περιβάλλον όπως και να εκτιμήσει τις δυνατότητες επίτευξης περιβαλλοντικών βελτιώσεων σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής είναι διεθνώς αποδεκτή, ως μέσο για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών διαδικασιών και υπηρεσιών, καθώς και για τη δημιουργία στόχων για την πρόληψη δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και, κατά συνέπεια, την ενίσχυση της ποιότητας ζωής με στόχο ένα υγιές περιβάλλον. Εξετάζει τα δομικά υλικά από τη βάση της παραγωγής τους μέχρι την τελική τους διάθεση σύμφωνα με την σειρά διεθνών προτύπων ISO 14040. Προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αξιολογεί τις δυνατότητες μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας. Η εφαρμογή της μεθόδου είναι θεμελιώδους σημασίας για τη βιωσιμότητα των κτιρίων και των κατασκευών γενικότερα. Δεν είναι μόνο μία ένδειξη προς ένα φιλικό προς το περιβάλλον προϊόν, αλλά και η οδός προς μία πράσινη κατασκευαστική αγορά.

Η βιβλιογραφία είναι αρκετά πλούσια και περιλαμβάνει κυρίως την ανάλυση του κύκλου ζωής για διάφορα κτιριακά στοιχεία, όπως οι τοιχοποιίες, τα υλικά στέγης, τα ξύλινα προϊόντα κατασκευής, την επαναχρησιμοποίηση υλικών, καθώς και την ενεργειακή ανάλυση του κύκλου ζωής δομικών υλικών για κατασκευές σε περιοχές συγκεκριμένων περιβαλλοντικών συνθηκών. Επιπλέον, έχει πραγματοποιηθεί μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής κονιαμάτων. Παράλληλα, η περιβαλλοντική αξιολόγηση υλικών και διεργασιών του τομέα κατασκευής έχει επιχειρηθεί στο παρελθόν για συγκεκριμένες κατασκευές και λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Πολλές μελέτες έχουν επικεντρώσει το ενδιαφέρον τους στη διαχείριση του κύκλου ζωής των κτιρίων, λαμβάνοντας υπόψη τα συστήματα θέρμανσης – ψύξης, φωτισμού, μαγειρέματος, μόνωσης κλπ.

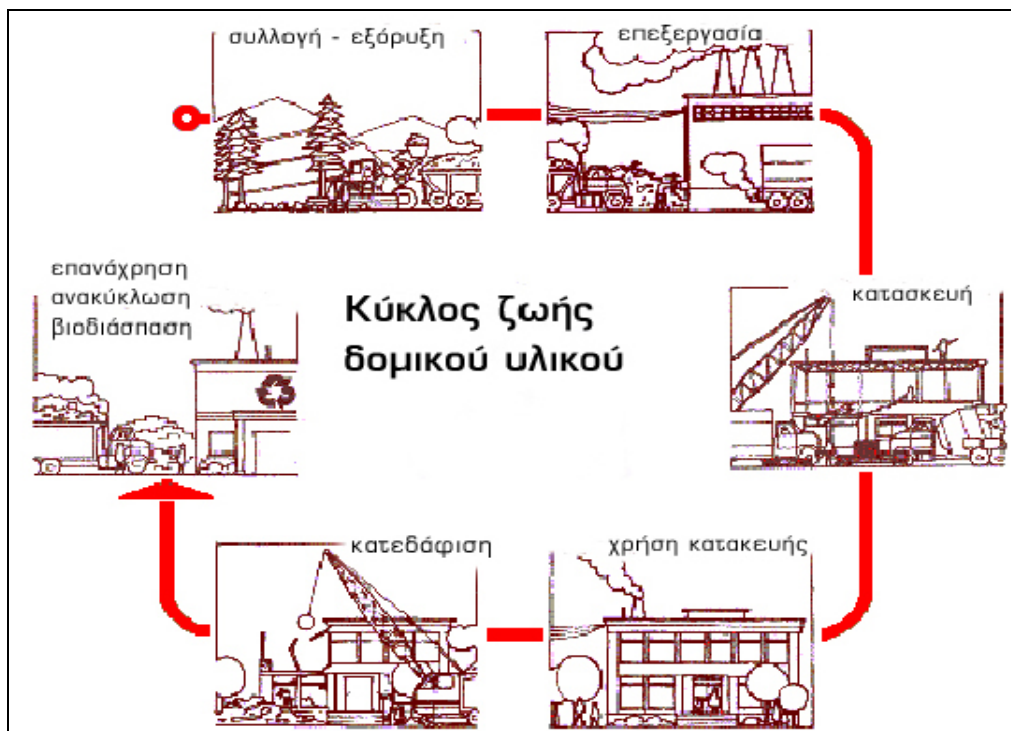
Ο κύκλος ζωής ενός οικοδομικού υλικού περιέχει τα εξής στάδια (Εικόνα 2.10):

- Συλλογή - εξόρυξη πρώτων υλών
- Μεταφορά πρώτων υλών

- Βιομηχανική παραγωγή - επεξεργασία
- Κατασκευή
- Χρήση της κατασκευής
- Κατεδάφιση
- Επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, βιοδιάσπαση, τελική διάθεση

Για τα περισσότερα οικοδομικά υλικά το μεγαλύτερο μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποδίδεται στα δύο πρώτα στάδια, αλλά καθώς μεγαλώνει το πρόβλημα των αποβλήτων, γνωρίζουμε ότι αυξάνεται σημαντικά και το πρόβλημα που προκύπτει λόγω της κατεδάφισης και αποβολής τους. Δηλαδή σε όλη τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος, από την εξόρυξή του, την διαδικασία παραγωγής του, μέχρι και τη χρήση του, παράγονται απόβλητα. Με την ολοκλήρωση της χρήσιμης διάρκειας ζωής του, το ίδιο το κτήριο, θεωρείται άχρηστο και κατατάσσεται στην κατηγορία των αποβλήτων. Στη Δυτική Ευρώπη παράγονται ετησίως πέντε δισεκατομμύρια τόνοι στερεών αποβλήτων από τα οποία 5% είναι κατασκευαστικά απόβλητα.

Είναι προφανές ότι η περιβαλλοντική επίπτωση σε υλικά με μικρό χρόνο ζωής είναι πολύ μεγαλύτερη από υλικά που έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Το πρόβλημα που προκύπτει όμως, σε όλες αυτές τις μελέτες είναι η πιστοποίηση της αντοχής των υλικών στις ειδικές συνθήκες που έχουν διαμορφωθεί με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα το μάρμαρο θεωρείτο, μέχρι σήμερα, πολύ ανθεκτικό υλικό. Σήμερα όμως λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της όξινης βροχής διαπιστώνουμε ότι γυψοποιείται και να αποσαθρώνεται με ταχύτατους ρυθμούς. Αυτό σημαίνει ότι τα υλικά δεν έχουν πιστοποιηθεί στις νέες συνθήκες του περιβάλλοντος, πράγμα που πλέον δυσκολεύει ιδιαίτερα τον προσδιορισμό του χρόνου ζωής τους.



Εικόνα 2.10 Διάγραμμα ροής του κύκλου ζωής ενός δομικού υλικού (Αιμ. Γ. Κορωνάιος, Γ. Σαργέντης, 2005).

Σύμφωνα με τον ορισμό της A.K.Z., για την εφαρμογή της στην περίπτωση ενός κτιρίου απαιτείται ο προσδιορισμός των στοιχείων κατανάλωσης μάζας και ενέργειας για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, από την κατασκευή ως την κατεδάφισή του. Προκειμένου δε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί αυτός ο προσδιορισμός απαιτείται η εκτίμηση των στοιχείων για το σύνολο των εργασιών που διεξάγονται, καθώς και για το σύνολο των δομικών υλικών και ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται.

Στην Ευρώπη η ανάπτυξη της συνδυάστηκε με την εξάπλωση του οικολογικού σήματος (Κανονισμός EOK 880/92) και σε διεθνές επίπεδο αναμένεται ακόμη μεγαλύτερη εξάπλωση της A.K.Z. μέσω της ένταξής της στη σειρά προτύπων ISO 14040. *Για την αξιολόγηση της οικολογικής συμπεριφοράς ενός υλικού υπάρχει σχετική διεθνής βιβλιογραφία, για την ενσωματωμένη ενέργεια, την ικανότητα ανακύκλωσης, καθώς επίσης και για διάφορες άλλες παραμέτρους που αφορούν σε οικολογικά κριτήρια επιλογής των υλικών. Στην ουσία όμως απαραίτητο είναι να υπάρξει αξιολόγηση των υλικών που χρησιμοποιούνται και στην Ελλάδα του 21ου αιώνα. Η έλλειψη μιας τέτοιας βάσης δεδομένων για την Ελλάδα καθιστά υποχρεωτική την προσφυγή σε βάσεις δεδομένων για την Ελλάδα καθιστά υποχρεωτική την προσφυγή σε βάσεις δεδομένων άλλων, κατά προτίμηση ευρωπαϊκών χωρών. Στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων και τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών δομικών υλικών, όχι όμως απαραίτητα για την εξαγωγή απόλυτων μεγεθών (Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Σαργέντης, 2005, Α. Μοροπούλου, 2009, <http://www.ecosmes.net/cm/navContents?l=EL&navID=1caSmesIntro&subNavID=1&pagID=1>).*

Στον Ελλαδικό χώρο, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής κάνει την εμφάνισή της μέσα από διάφορα προγράμματα, όπως το πρόγραμμα Sustainable Construction (SUSCON), που παρήγαγε εργαλεία, όπως το SusCon Eco-design, και αποτελέσματα που συμβάλλουν στην αειφορία της κατασκευής και το ερευνητικό πρόγραμμα, eLCA, που στοχεύει στην ανάπτυξη μιας απλοποιημένης μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής που να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί από τις Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις.

Τονίζεται ότι αυτό που δεν έχει μελετηθεί σε βάθος και θα πρέπει να εφαρμοστεί για την σωστή διαστασιολόγηση των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής του σκυροδέματος, αλλά και των υπολοίπων δομικών υλικών και στοιχείων μίας κατασκευής, είναι η επίπτωση των περιβαλλοντικών φορτίων στα δομικά υλικά. Ο περιβαλλοντικός παράγοντας θα πρέπει να ποσοτικοποιηθεί και να ενσωματωθεί στις εφαρμογές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής ώστε αυτή να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στις κατασκευές αλλά και ταυτόχρονα εκτίμησης της ανθεκτικότητας των κατασκευών στα περιβαλλοντικά φορτία.

Σε ότι αφορά ειδικά το **τσιμέντο**, πρόσφατα έχουν γίνει κάποιες εφαρμογές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, οι οποίες έχουν αποδείξει πως **ιδιαίτερο βάρος πρέπει να δοθεί στην πολιτική διαχείρισης των αποβλήτων του προϊόντος καθώς και στη φάση παραγωγής του**, κατά την οποία οι εκπομπές στον αέρα είναι σημαντικές και οφείλονται κυρίως στην ενέργεια που χρησιμοποιείται.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες για την ποσοτική καταγραφή και εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και **στον τομέα παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος** εφαρμόζοντας τη μέθοδο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Η εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στο σκυρόδεμα αποτιμά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και θέτει τους στόχους και τα όρια όσον αφορά στις ισοδύναμες εκπομπές kg CO₂ που

επιδρούν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη (global warming effect, GW), στις ισοδύναμες εκπομπές kg SO₄ που επιδρούν στην οξίνιση (acidification), στις ισοδύναμες εκπομπές kg PO₄ που επιδρούν στον ευτροφισμό (eutrophication) και στις ισοδύναμες εκπομπές kg αιωρούμενων σωματιδίων που επιδρούν στην χειμερινή αιθαλομίχλη (winter smog). Όλες οι παραπάνω ισοδύναμες εκπομπές έχουν άμεση συνάρτηση με την επιλογή των πρώτων υλών του σκυροδέματος.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου **διαπιστώθηκαν αρκετές φορές αδυναμίες και κενά της μεθόδου**, όπως η απαίτηση σε χρόνο και ειδικές γνώσεις, η έλλειψη βασικών στοιχείων και ορίων για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων και τέλος η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων. **Με βάση αυτές τις αδυναμίες αναπτύσσονται σήμερα εύχρηστα και αποτελεσματικά εργαλεία στον τομέα παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος σε μορφή λογισμικού (π.χ. το ENVI.CON) τα οποία καλύπτουν τα κενά της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και στοχεύουν στη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας, στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τέλος στην παραγωγή οικολογικού σκυροδέματος.**

ENVI.CON

Σε ό,τι αφορά την **ανάλυση του κύκλου ζωής του σκυροδέματος**, ως παράδειγμα, παρατίθενται στη συνέχεια τα αποτελέσματα μιας ελληνικής ερευνητικής ομάδας (Α. Γ. Μπίσκα, Ν. Οικονόμου, 2006) από την εφαρμογή της μεθόδου αλλά και από την ανάπτυξη πρότυπου λογισμικού συστήματος περιβαλλοντικής διαχείρισης (ENVI.CON).

Αυτοί μελέτησαν αρχικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή 1m³ έτοιμου σκυροδέματος με χρήση της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ISO 14040-14043, η οποία εφαρμόζεται σε δύο εργοστάσια παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος για δύο κύρια είδη σκυροδέματος, C16/20 και C20/25. Οι κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν είναι η κατανάλωση σε πρώτες ύλες, πρόσθετα υλικά, ενέργεια, υλικά συντήρησης, οι εκπομπές σε αέρα, νερό, έδαφος και η δημιουργία θορύβου. **Τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στα δύο εργοστάσια σκυροδέματος** συνοψίζονται ως εξής:

- α) τα εργοστάσια παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος συμβάλλουν κατά κύριο λόγο σε ένα και μόνο παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα, της εξόρυξης πρώτων υλών (μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων), εξαιτίας της μεγάλης κατανάλωσης αδρανών υλικών,
- β) οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή 1m³ σκυροδέματος C16/20 είναι κατά το πλείστον μικρότερες σε σχέση με αυτές του 1m³ C20/25 (χωρίς να παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές),
- γ) οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του Α' εργοστασίου από την παραγωγή 1m³ σκυροδέματος C16/20 είναι κατά το πλείστον μεγαλύτερες από αυτές του Β' εργοστασίου, ενώ οι ετήσιες περιβαλλοντικές επιδράσεις του Β' εργοστασίου είναι μεγαλύτερες από αυτές του Α' εργοστασίου, λόγω μεγαλύτερης ετήσιας παραγωγής.

Παράλληλα **διαπίστωσαν αδυναμίες και ελλείψεις της μεθόδου LCA** κατά την εφαρμογή της. Συγκεκριμένα η διαδικασία για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των εισαγομένων και εξαγομένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποδείχθηκε δύσκολη και χρονοβόρα, ενώ τα τελικά αποτελέσματα αποδείχθηκαν γενικά και ανούσια (τα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος συμβάλλουν κατά κύριο λόγο σε ένα και μόνο

παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα της εξόρυξης υλών). Παράλληλα, διαπιστώθηκε αδυναμία της μεθόδου να θέσει όρια στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα) και να συμπεριλάβει κι άλλα σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως τα εργατικά ατυχήματα, τις πυρκαγιές και τις διαρροές χημικών ουσιών. Επίσης, κατά την εκτίμηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν βάσεις δεδομένων άλλων χωρών (ατελείς), λόγω της απουσίας αντίστοιχης βάσης με ελληνικά δεδομένα.

Δημιουργήθηκε λοιπόν η ανάγκη ανάπτυξης ενός εύχρηστου, ολοκληρωμένου και αποτελεσματικού Συστήματος Περιβαλλοντικής Διαχείρισης στον τομέα παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος, που θα καλύπτει τα κενά και τις αδυναμίες της μεθόδου LCA και θα οδηγεί σε ουσιαστικά συμπεράσματα. Έτσι οι παραπάνω ερευνητές ανέπτυξαν ένα **πρότυπο λογισμικό σύστημα περιβαλλοντικής διαχείρισης στον τομέα παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος, το ENVI.CON** το οποίο βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic και ονομάζεται έτσι από τα αρχικά των λέξεων Environment και Concrete. Αναλυτικότερα, το ENVI.CON δεν απαιτεί ειδικές γνώσεις, είναι φιλικό προς το χρήστη, περιλαμβάνει όλες τις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οδηγεί στην εξαγωγή χρήσιμων και ουσιαστικών συμπερασμάτων και παρουσιάζει τα αποτελέσματα σε μορφή λειτουργικών πινάκων και διαγραμμάτων σε όλα τα τμήματα της παραγωγικής διαδικασίας. Επίσης, ορίζει το βαθμό σπουδαιότητας και θέτει όρια για όλες τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τόσο ο βαθμός σπουδαιότητας, όσο και τα όρια, τα οποία προκύπτουν κατόπιν αναλύσεως και επεξεργασίας δεδομένων θεωρούνται απαραίτητα για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Οι πιο σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στα εργοστάσια παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος που προκύπτουν από την εφαρμογή του Envi.Con είναι τα υγρά απόβλητα (επιφανειακά), τα στερεά απόβλητα που προέρχονται από πρώτες ύλες, καυσαέρια οχημάτων / μηχανημάτων έργων, η ηλεκτρική ενέργεια, το πετρέλαιο κίνησης και ο θόρυβος. Αναλυτικότερα:

Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το 1m³ σκυροδέματος C16/20 δείχνει ότι το Α' εργοστάσιο υπερβαίνει τα όρια στην κατανάλωση νερού γεώτρησης (49%) και στη δημιουργία υγρών αποβλήτων που καταλήγουν στην επιφάνεια του εδάφους (134kg/m³ σκυροδέματος) και στο υπέδαφος (31%). Αντίστοιχα, το Β' εργοστάσιο παρουσιάζει υπέρβαση των ορίων μόνο στην κατανάλωση του νερού ύδρευσης (2%) και στα υγρά απόβλητα που καταλήγουν στο δίκτυο αποχέτευσης (2%) και στο υπέδαφος (20,6%). Τα υγρά απόβλητα (επιφανειακά) προέρχονται κυρίως από τα πλυσίματα του αναμικτήρα (10,5%), των αναδευτήρων (78%) και των αντλιών σκυροδέματος (11%). Οι μεγάλες ποσότητες κατανάλωσης νερού γεώτρησης οφείλονται κυρίως στην έλλειψη περιβαλλοντικής εκπαίδευσης και στον πλούσιο υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής. Η μείωση, όμως των αποθεμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς επίσης η επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για μερική ή ολική ανακύκλωση των υγρών αποβλήτων. Τα υγρά απόβλητα, σύμφωνα με έρευνες που έγιναν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ακόμη και ως νερό αναμίξεως, αρκεί να μειωθεί το pH τους. Η συλλογή των υγρών αποβλήτων και των νερών της βροχής, καθώς επίσης η περιβαλλοντική εκπαίδευση των εργαζομένων θεωρούνται βασικά για τη μείωση της κατανάλωσης νερού και της δημιουργίας υγρών αποβλήτων.

Υπέρβαση των ορίων παρατηρείται ακόμη στη δημιουργία στερεών αποβλήτων και στα δύο εργοστάσια. Στο Α' εργοστάσιο η δημιουργία στερεών αποβλήτων από

πρώτες ύλες υπερβαίνει το όριο κατά 1140%, ενώ στο Β' κατά 618%. Υπέρβαση επίσης παρατηρείται και στη δημιουργία στερεών αποβλήτων από τα βαρέλια των ορυκτελαίων και τα δοχεία των γράσων. Τα στερεά απόβλητα από πρώτες ύλες (αδρανή και τσιμέντο) δημιουργούνται κυρίως από τις επιστροφές του νωπού σκυροδέματος, το οποίο κρίνεται ακατάλληλο για άλλη χρήση (41%) και από το σκυρόδεμα που φέρουν οι αντλίες σκυροδέματος και το εναποθέτουν στο χώρο του εργοστασίου μετά το πέρας των εργασιών (44,5%). Η ανακύκλωση, λοιπόν, του σκυροδέματος θεωρείται απαραίτητη και πραγματοποιείται ήδη σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες. Παράλληλα, η παραγωγή παραπροϊόντων σκυροδέματος οδηγεί σε μείωση των στερεών αποβλήτων από πρώτες ύλες.

Επίσης, υπέρβαση των ορίων παρατηρείται στο Α' εργοστάσιο στην κατανάλωση πετρελαίου κίνησης (2,5%) και στη δημιουργία καυσαερίων (σε ορισμένες διεργασίες). Συγκεκριμένα στα καυσαέρια παρατηρείται υπέρβαση των στερεών σωματιδίων PM (18%) και των οργανικών πτητικών ενώσεων VOC (25%). Στο Β' εργοστάσιο παρατηρείται υπέρβαση στη δημιουργία καυσαερίων σε περισσότερες διεργασίες σε σχέση με το Α' και κυρίως στα στερεά σωματίδια (η οποία φθάνει και το 57%), καθώς επίσης στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (11%). Μείωση της δημιουργίας των καυσαερίων και της κατανάλωσης πετρελαίου κίνησης επιτυγχάνεται κυρίως με την αντικατάσταση των παλιών οχημάτων / μηχανημάτων έργων και την τακτική συντήρησή τους. Μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί, είτε χρησιμοποιώντας άλλη μορφή ενέργειας, είτε με την αντικατάσταση/ συντήρηση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

Όσον αφορά το θόρυβο, υπέρβαση των ορίων για τους εργαζόμενους παρατηρείται και στα δύο εργοστάσια και σε ορισμένες διεργασίες, όπως στο στάδιο της φόρτωσης-μεταφοράς-εκφόρτωσης αδρανών, στη συντήρηση του συγκροτήματος, στο στάδιο της αναμίξεως κ.λπ. Μείωση του θορύβου μπορεί να επέλθει για παράδειγμα με την αντικατάσταση παλιών οχημάτων και παλιού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, με τη διατήρηση γεμάτων με αδρανή των σιλό αδρανών, με τη χρήση κατάλληλων μέσων ατομικής προστασίας από τους εργαζόμενους κ.λπ. Επίσης, υπέρβαση των ορίων του θορύβου για το περιβάλλον διαπιστώνεται στο Α' εργοστάσιο, λόγω της θέσης του εργοστασίου (περιοχή με αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο). Στην περίπτωση αυτή μείωση του θορύβου μπορεί να επιτευχθεί, είτε με την κατασκευή τοιχοποιίας, είτε με κατάλληλη δενδροφύτευση στην περίμετρο του εργοστασίου.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται η σπουδαιότητα και η χρησιμότητα του πρότυπου λογισμικού συστήματος περιβαλλοντικής διαχείρισης Envi.Con στον τομέα παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος όχι μόνο στον ελλαδικό χώρο, αλλά και παγκοσμίως (λόγω έλλειψης αντίστοιχων εργαλείων σε άλλες χώρες). Αξίζει να σημειωθεί ακόμη, ότι το σύστημα αυτό με ορισμένες τροποποιήσεις δύναται να εφαρμοσθεί και σε άλλους τομείς παραγωγής δομικών υλικών, όπως του τσιμέντου, των κεραμικών, των ασφαλομιγμάτων κ.λπ. και να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα, που αφορούν βασικά περιβαλλοντικά προβλήματα (υγρά και στερεά απόβλητα, ενέργεια, θόρυβο κ.λπ.). Τέλος, τονίζεται ότι δεν αρκεί η συνειδητοποίηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων στον τομέα παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος, αλλά επιβάλλεται η άμεση εφαρμογή ολοκληρωμένων και αποτελεσματικών συστημάτων περιβαλλοντικής διαχείρισης για την παραγωγή οικολογικού σκυροδέματος.

Πολυκριτηριακή ανάλυση

Η **Πολυκριτηριακή Ανάλυση** είναι κλάδος της επιστήμης της επιχειρησιακής έρευνας. Είναι μια *ποσοτικά ποιοτική μέθοδος αξιολόγησης* πολλαπλών και κατά κανόνα, αντικρουόμενων κριτηρίων κατά τη λήψη μίας απόφασης. Τα τελευταία χρόνια, με τη θεώρηση και της περιβαλλοντικής-οικολογικής συνιστώσας, η ανάγκη επιλογής, όσο το δυνατόν βέλτιστης πολιτικής απόφασης έχει καταστήσει την πολυκριτηριακή ανάλυση βασικό εργαλείο υποστήριξης της λήψης αποφάσεων.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση *προϋποθέτει αφενός τη διατύπωση όλων των κριτηρίων που σχετίζονται με τη λήψη της απόφασης με ποσοτικούς όρους και αφετέρου την ενσωμάτωση τους σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση, η οποία είναι γνωστή ως συνάρτηση χρησιμότητας*. Η πρώτη προϋπόθεση είναι δύσκολο να υλοποιηθεί όταν τα κριτήρια είναι υποκειμενικά ή δεν μπορούν παρά να βαθμονομηθούν με ποιοτικούς όρους (π.χ., η τοξικότητα των υλικών). Για το λόγο αυτό, γενικά χρησιμοποιούνται κλίμακες με μικρό αριθμητικό εύρος. Η δεύτερη προϋπόθεση ενέχει τον κίνδυνο υποτίμησης ή υπερτίμησης ορισμένων κριτηρίων σε σχέση με τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα τη διατύπωση μεροληπτικών συναρτήσεων χρησιμότητας. Εξάλλου μπορεί να διατυπωθούν διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας για το ίδιο πρόβλημα και με διαφορετικές εκφράσεις για κάθε διαφορετική εφαρμογή. Παρ'όλο που έχει προταθεί ένα μεγάλο πλήθος τεχνικών αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων, η εξάλειψη της μεροληψίας κατά την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης δεν μπορεί να επιτευχθεί.

Η χρησιμότητα της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι αδιαμφισβήτητη (ποσοτικοποιεί το πρόβλημα και οδηγεί σε λήψη αποφάσεων) μολονότι δεν είναι απολύτως αντικειμενική. Μέχρι σήμερα όμως είναι το μοναδικό νοητικό εργαλείο για να αντιμετωπίσουμε τέτοιου τύπου σύνθετα (πολυκριτηριακά) προβλήματα αποκτώντας ποσοτική και ταυτόχρονα και ποιοτική εικόνα. Στην ουσία λοιπόν η πολυκριτηριακή ανάλυση εκφράζει την αντίληψη του μελετητή επάνω στο πρόβλημα ερμηνεύοντας την λύση ποσοτικά, χωρίς απαραίτητα η λύση που παρουσιάζεται να είναι μονοσήμαντη.

2.3.2 Μέθοδοι περιβαλλοντικής αξιολόγησης δομικών υλικών

Μέθοδος «Οικολογική Προτίμηση»

Η συνηθέστερη μέθοδος που εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια για την αξιολόγηση των δομικών υλικών με οικολογικά κριτήρια είναι η «**Οικολογική Προτίμηση, Environmental Preference Method – EPM**». Η μέθοδος Οικολογικής Προτίμησης πρωτοπαρουσιάστηκε στην Ολλανδία το 1991 από τον ιδιωτικό φορέα Woon/Energie και εκδόθηκε στα αγγλικά το 1996. Η οικολογική προτίμηση χρησιμοποιήθηκε στην Ολλανδία για την ταχεία ενημέρωση του κοινού και των κατασκευαστών σχετικά με τα δομικά υλικά που κρίνονται φιλικά προς το περιβάλλον με βάση ένα ή περισσότερα οικολογικά κριτήρια.

Βασίζεται στην ποιοτική κατάταξη των δομικών υλικών και προϊόντων σε 4 διαβαθμισμένες κατηγορίες προτίμησης ανάλογα με την φιλικότητά τους προς το περιβάλλον, από την περισσότερο περιβαλλοντικά φιλική (προτίμηση 1) έως τη μη προτεινόμενη (προτίμηση 4). Η περιβαλλοντική προτίμηση μπορεί να γίνει τόσο για νέες κατασκευές όσο και για ανακαινίσεις κτιρίων και δίνει τη δυνατότητα στο

χρήστη να διαλέξει, σε κάθε στάδιο κατασκευής, το περισσότερο περιβαλλοντικά φιλικό υλικό. Τα υλικά αξιολογούνται βάσει των παρακάτω παραμέτρων:

- επάρκεια πρώτων υλών,
- οικολογική καταστροφή που προκαλείται από την εξόρυξη / συλλογή των πρώτων υλών,
- κατανάλωση ενέργειας σε όλα τα στάδια παραγωγής, περιλαμβανομένου και της ενέργειας μεταφοράς τους,
- κατανάλωση νερού,
- ηχητική ρύπανση και ρύπανση από οσμές,
- επικίνδυνες εκπομπές, όπως αυτές που μπορεί να οδηγήσουν στη μείωση της στιβάδας του όζοντος,
- συμβολή στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και στη δημιουργία όξινης βροχής,
- θέματα υγείας,
- κίνδυνος καταστροφών,
- ευχέρεια επισκευών,
- επαναχρησιμοποίηση,
- απόβλητα.

Η οικολογική προτίμηση βασίζεται σε ένα συχνά ενημερωμένο εγχειρίδιο που περιλαμβάνει **συγκριτικούς πίνακες** που επιτρέπουν την κατάταξη των δομικών υλικών. **Η μέθοδος της οικολογικής προτίμησης δεν είναι τόσο αυστηρή όσο θα ήταν η υποβολή όλων των δομικών προϊόντων σε πλήρη ανάλυση του κύκλου ζωής.** Είναι όμως εύκολη στη χρήση γιατί διευκολύνει τον μελετητή ή τον καταναλωτή να επιλέξει το δομικό υλικό για τη χρήση που επιθυμεί ελαχιστοποιώντας τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε πολύ επιτυχημένα σε περισσότερους από 50% τοπικούς δήμους στην Ολλανδία για τη δημιουργία προδιαγραφών για δομικά υλικά και τις κατασκευές καθώς επίσης και από εταιρείες δομικών υλικών για την ετήσια αξιολόγηση και κατάταξη των δομικών τους προϊόντων.

Η μέθοδος της οικολογικής προτίμησης εφαρμόζεται και στη Μ. Βρετανία. Σε πρόσφατη έκδοση του Green Building Handbook 1999 η αξιολόγηση των προϊόντων γίνεται με βάση την **πολυκριτηριακή ανάλυση**. Με άλλα λόγια η περιβαλλοντική συμπεριφορά των υλικών αναλύεται σε συνιστώσες οι οποίες έχουν διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας. Έτσι ο χρήστης έχει τόσο τη συγκεντρωμένη βαθμολογία όσο και στοιχεία για την περιβαλλοντική επίπτωση των υλικών σε επί μέρους αποδέκτες (έδαφος, ατμόσφαιρα, νερό) ή περιοχές ενδιαφέροντος (υγεία, ενεργειακή κατανάλωση κ.α.).

Υπάρχει όμως η ανάγκη της εύκολης αναγνώρισης από τον χρήστη για την άμεση επιλογή ενός υλικού. Επομένως, για τη διευκόλυνση των καταναλωτών, θετικό αποτέλεσμα θα είχε η πιστοποίηση από ένα εθνικό ή διεθνώς αποδεκτό οικολογικό σήμα. Για το λόγο αυτό έχουν καθιερωθεί διάφορα **οικολογικά σήματα** που πιστοποιούν τον οικολογικό χαρακτήρα των προϊόντων. Ένα τέτοιο σήμα αποτελεί εγγύηση για τον καταναλωτή ότι το προϊόν που χρησιμοποιεί στην κατασκευή έχει

συνολικά τις λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον σε σύγκριση με άλλα προϊόντα που επιτελούν την ίδια λειτουργία. Ο "γαλάζιος άγγελος" είναι από τα περισσότερο αναγνωρισμένα οικολογικά σήματα και χορηγείται στη Γερμανία σε πιστοποιημένα οικολογικά προϊόντα. Προϊόντα με την πιστοποίηση αυτή κυκλοφορούν και στην Ελλάδα.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, η χορήγηση Ευρωπαϊκού οικολογικού σήματος θεσπίστηκε από τον κανονισμό ΕΟΚ/880/92. Στην οδηγία της ΕΟΚ/880/92 προτείνεται ο παραπάνω πίνακας για την αξιολόγηση της οικολογικής συμπεριφοράς ενός υλικού. Σε επόμενο υποκεφάλαιο γίνεται μια εκτενής ανάλυση του κοινοτικού οικολογικού συστήματος απονομής οικολογικού σήματος και των κριτηρίων απονομής οικολογικού σήματος για σκληρές επενδύσεις δαπέδων όπως π.χ. για πλάκες επίστρωσης από σκυρόδεμα.

Μέθοδος «Σύστημα αξιολόγησης δομικών υλικών»

Η μέθοδος «**Σύστημα αξιολόγησης δομικών υλικών - Building Material Assessment System, BMAS**» (1994) στοχεύει στην ποσοτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δομικών υλικών. Τα δομικά υλικά αξιολογούνται βάσει ενός «οικολογικού δείκτη», ο οποίος προκύπτει από την αξιολόγηση διαφόρων περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η «οικολογική τιμή» των δομικών στοιχείων προκύπτει από το σύνολο των ποσοτήτων των δομικών υλικών. Το άθροισμα των επί μέρους «οικολογικών τιμών» των δομικών στοιχείων δίνει τη συνολική βαθμολογία της περιβαλλοντικής επίπτωσης του κτιρίου. Βασίζεται βεβαίως σε κάποιες παραδοχές για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν τα δομικά υλικά.

Μέθοδος «Οικολογική αειφορία δομικών υλικών»

Η μέθοδος «**Οικολογική αειφορία δομικών υλικών – Buildings Material Ecological Sustainability, BMES**» (Lawson and Partidge, 1995) είναι επίσης μία ποσοτική μέθοδος αξιολόγησης, όπου τα δομικά υλικά αξιολογούνται βάσει 16 περιβαλλοντικών κριτηρίων που αναφέρονται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, τα οποία ταξινομούνται σε 3 κύριες κατηγορίες:

- ανάλωση πρώτων υλών,
- ρύπανση που προκαλείται,
- εμπιερχόμενη ενέργεια.

Για την αξιολόγηση όλου του κτιρίου, αθροίζονται όλοι οι επιμέρους δείκτες και δίνουν τη συνολική βαθμολογία αξιολόγησης.

Η διαφορά μεταξύ της προηγούμενης μεθόδου (BMAS) και αυτής (BMES), είναι ότι με τη δεύτερη μέθοδο (BMES) γίνεται αποτίμηση για ολόκληρο τον κύκλο ζωής των υλικών.

Μέθοδος «Βήμα προς Βήμα περιβαλλοντικός έλεγχος δομικών υλικών»

Η μέθοδος «**Βήμα προς Βήμα περιβαλλοντικός έλεγχος δομικών υλικών**» προτείνει μία διαίρεση του συνολικού κύκλου ζωής των δομικών υλικών σε βήματα αξιολόγησης ακολουθώντας ιεραρχική και όχι χρονολογική σειρά.

Διακρίνονται 4 φάσεις του κύκλου ζωής των υλικών:

- 1) στάδιο κατασκευής και χρήσης,
- 2) στάδιο εξόρυξης και παραγωγής των πρώτων υλών
- 3) στάδιο βιομηχανικής παραγωγής των υλικών,
- 4) στάδιο επαναχρησιμοποίησης ή απόθεσης,

και για κάθε φάση αναγνωρίζονται 3 κριτήρια.

Η μέθοδος δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στο στάδιο της χρήσης του κτιρίου. Οι διαδικασίες για την ενσωμάτωση των υλικών στην κατασκευή του κτιρίου θεωρείται ότι αποτελούν μέρος του σταδίου της χρήσης. Ως επόμενης βαρύτητας στάδιο θεωρείται το στάδιο της εξόρυξης και παραγωγής πρώτων υλών, δεδομένου ότι η κατασκευή των κτιρίων καταναλώνει κατά κανόνα μεγάλες ποσότητες πρώτων υλών. Ακολουθεί το στάδιο της βιομηχανικής παραγωγής των υλικών κατά το οποίο σε πολλές περιπτώσεις παράγονται ή εκπέμπονται επικίνδυνες ουσίες, τοξικά κατάλοιπα, κ.λ.π. Τελευταίο σε βαρύτητα είναι το στάδιο της αποξήλωσης – απομάκρυνσης, κατά το οποίο προκύπτουν μεγάλες ποσότητες στερεών οικοδομικών απορριμμάτων, με δυνατότητες είτε ανακύκλωσης τους είτε χρήσης τους για κάποιες δευτερεύουσες εφαρμογές (όπως π.χ. ως υλικά επιχώσεων). Ορισμένα υλικά, κατά περίπτωση, μπορεί να οδηγήσουν σε μετατόπιση της βαρύτητάς τους, όπως για τα συνθετικά υλικά είναι πιθανόν να έχει μεγαλύτερη βαρύτητα οι επιβαρύνσεις που προκύπτουν από το στάδιο της βιομηχανικής παραγωγής τους.

Ανάλογα με την ιδιαιτερότητα κάθε συγκεκριμένου έργου (νέα κατασκευή, επισκευή ή ανακαίνιση κτιρίου) τα κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως αυστηρά κριτήρια επιλογής με σκοπό τον αποκλεισμό υλικών που δεν ανταποκρίνονται σε αυτά ή ως κατευθυντήριες και συμβουλευτικές ενδείξεις για τη διαδικασία επιλογής.

Μέθοδος «Ανάλυση της εμπειριεχόμενης ενέργειας»

Με τη μέθοδο «**Ανάλυση της εμπειριεχόμενης ενέργειας**» γίνεται υπολογισμός της ενέργειας που καταναλώνεται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός υλικού με στόχο:

- να προσδιοριστούν ποσοτικά και ποιοτικά το ποσό της ενέργειας που απαιτείται ώστε να μειωθούν οι τιμές της και να βελτιωθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της,
- να προσδιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κατανάλωση της παραπάνω ενέργειας.

Η εμπειριεχόμενη ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους, όπως η μέθοδος της απευθείας μέτρησης «Process analysis» και η μέθοδος με πίνακες «εισερχόμενων (εισροών) – εξερχόμενων (εκροών)» (input –output). Βέβαια, η πολυπλοκότητα των δεδομένων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της εμπειριεχόμενης ενέργειας δημιουργεί αβεβαιότητες ως προς τις τιμές της.

2.3.3 Οικολογική σήμανση

Οικολογικά σήματα

Σε πολλές χώρες της Κοινότητας, διάφοροι οικονομικοί φορείς, τόσο δημόσιοι όσο και ιδιωτικοί, ανέλαβαν σχετικές πρωτοβουλίες για την απονομή κάποιου οικολογικού σήματος σε προϊόντα και υπηρεσίες. Τα μέτρα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις διαφέρουν από το ένα κράτος μέλος στο άλλο, και παρότι συνιστούν αξιόλογη πρόοδο, αποτελούν ασυντόνιστες προσπάθειες που καταβάλλονται για την προστασία του περιβάλλοντος. Για το συντονισμό των περιβαλλοντικών δράσεων σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης εκπόνησε το Κοινοτικό Σύστημα Απονομής Οικολογικού Σήματος. Έως τα τέλη του έτους 2002 περίπου 10.000 προϊόντα έφεραν ένα από τα ευρωπαϊκά, εθνικά ή τοπικά οικολογικά σήματα ή το σήμα με το λουλούδι της Ε.Ε.

Από τα εθνικά οικολογικά σήματα το πιο γνωστό και παλιότερο περιβαλλοντικό σήμα απονομής προϊόντων ή υπηρεσιών είναι ο γερμανικός 'Γαλάζιος Άγγελος' (Εικόνα 2.11), ο οποίος τέθηκε σε ισχύ από το 1977 (www.blauer-engel.de). Το σήμα χορηγείται από μία ανεξάρτητη επιτροπή σε προϊόντα, συστήματα και διαδικασίες που σε σύγκριση με άλλα προϊόντα που επιτελούν τις ίδιες λειτουργίες είναι ιδιαίτερα φιλικά προς το περιβάλλον.



Εικόνα 2.11 Το οικολογικό σήμα 'Γαλάζιος Άγγελος' (Αργ. Δημούδη, 2006).

Άλλα εθνικά περιβαλλοντικά σήματα που απονέμονται είναι ο «Σκανδιναβικός Κύκνος» στις Σκανδιναβικές χώρες από το 1980, το Γαλλικό «NF – Environment» από το 1990, το Αυστριακό Umweltzeichen – Baome από το 1991, το Ισπανικό «Aenor – Medio Ambiente» από το 1993.

Κοινοτικό Οικολογικό Σύστημα Απονομής Οικολογικού Σήματος

Το **Οικολογικό Σήμα** απονέμεται στα προϊόντα με τις μικρότερες επιπτώσεις για το περιβάλλον. Το σήμα «Λουλούδι» είναι δηλαδή ένα λογότυπο που δηλώνει ότι ένα προϊόν (ή κα μία υπηρεσία) είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Αφού τους χορηγηθεί η σχετική σήμανση, οι κατασκευαστές μπορούν να χρησιμοποιούν στα εγκεκριμένα προϊόντα τους, το επίσημο λογότυπο, δηλ. ένα λουλούδι με τα 12 αστέρια (Εικόνα 2.12).

Το κοινοτικό σύστημα απονομής οικολογικού σήματος είναι προαιρετικό, σε αντίθεση με το σήμα CE, δηλαδή οι κατασκευαστές μπορούν να αποφασίζουν ελεύθερα αν θέλουν να υποβάλουν σχετική αίτηση για ένα ή περισσότερα προϊόντα τους. Οι κατασκευαστές, έμποροι και άλλοι επιχειρηματίες που τηρούν τις προϋποθέσεις και επιλέγουν να το αποκτήσουν, συμβάλλουν στη βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών και αποκτούν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Το οικολογικό αυτό σήμα όμως μπορεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς για το κοινό όταν διαλέγει τα προϊόντα που θα αγοράσει.



Εικόνα 2.12 Το οικολογικό σήμα της Ε.Ε., γνωστό και ως «Λουλούδι»

Το σύστημα λαμβάνει υπόψη για την πιστοποίηση των προϊόντων ή υπηρεσιών τους εξής περιβαλλοντικούς παράγοντες:

- ποιότητα του αέρα και των υδάτων,
- προστασία του εδάφους,
- εξοικονόμηση ενέργειας,
- διαχείριση φυσικών πόρων,
- πρόληψη της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη,
- προστασία της στιβάδας του όζοντος,
- περιβαλλοντική ασφάλεια,
- προστασία βιοποικιλότητας,
- θόρυβο, κ.ά.

Τα κριτήρια αυτά αφορούν όλα τα στάδια της ζωής του προϊόντος από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι την τελική διάθεση στο τέλος της ζωής του.

Χάρη στο οικολογικό σήμα, ο καταναλωτής είναι σε θέση να αναγνωρίζει τα προϊόντα που σέβονται το περιβάλλον σ' ολόκληρο τον κόσμο, ανεξάρτητα από τη χώρα κατασκευής τους και οι επιχειρήσεις μπορούν να αποδεικνύουν στους καταναλωτές ότι τα προϊόντα τους ανταποκρίνονται στα αυστηρά οικολογικά πρότυπα που καθορίζονται για το οικολογικό σήμα. Το μεγάλο πλεονέκτημα του οικολογικού σήματος, είναι η ευρωπαϊκή του διάσταση. Καθώς είναι ένα σήμα που εγκρίνεται από έναν Αρμόδιο Φορέα Κράτους Μέλους, μπορεί να χρησιμοποιείται και στα υπόλοιπα κράτη μέλη. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι κατασκευαστές δεν χρειάζεται να υποβάλλουν αίτηση σε κάθε χώρα, όπου κυκλοφορεί το προϊόν τους και αποφεύγουν έτσι τις δαπανηρές και χρονοβόρες διαδικασίες.

Διαδικασία καθορισμού κριτηρίων και διαδικασία απονομής οικολογικού σήματος

Το σύστημα βασίζεται στον Κοινοτικό Κανονισμό 880/92 της 23^{ης} Μαρτίου 1992 και στον αναθεωρημένο Κανονισμό αριθ. Ε.Ε. 1980/2000 της 17^{ης} Ιουλίου 2000 περί «αναθεωρημένου κοινοτικού συστήματος απονομής οικολογικού σήματος» (Παράρτημα ΙΙ) ο οποίος αναφέρεται σε όλα τα βιομηχανικά προϊόντα εκ των οποίων εξαιρούνται τα τρόφιμα, τα ποτά και τα φαρμακευτικά είδη.

Για τη δημιουργία του νομικού πλαισίου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απονομή του σήματος σε μια κατηγορία προϊόντων, απαιτείται πρώτα η έκδοση μιας Απόφασης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η απόφαση αυτή, στο πλαίσιο του κανονισμού ΕΟΚ 880/92 και του αναθεωρημένου Ε.Ε. 1980/2000, θεσπίζει τα οικολογικά κριτήρια με βάση τα οποία θα κριθεί και θα αξιολογηθεί ένα προϊόν για να του απονεμηθεί το σήμα «λουλούδι». Κατά κανόνα, τα οικολογικά κριτήρια που θεσπίζονται με τη διαδικασία αυτή ισχύουν για τρία χρόνια και στη συνέχεια μπορούν να αναθεωρούνται.

Οι προϋποθέσεις απονομής του Οικολογικού Σήματος καθορίζονται ανά κατηγορία προϊόντων και βάσει των ειδικών οικολογικών κριτηρίων, που έχουν ψηφιστεί για κάθε μία από αυτές. Οι κατηγορίες των δομικών προϊόντων των οποίων τα κριτήρια ήδη ψηφίστηκαν είναι:

- *μπογιές και βερνίκια εσωτερικών χώρων,*
- *σκληρές επενδύσεις δαπέδων (φυσικές πέτρες, συσσωματωμένοι λίθοι, πλάκες επίστρωσης από σκυρόδεμα, πλακίδια μωσαϊκού, κεραμικά πλακίδια και αργιλικά πλακίδια).*

και είναι σε επεξεργασία τα κριτήρια για τα μονωτικά υλικά.

Τα οικολογικά κριτήρια που ψηφίζονται για κάθε κατηγορία προϊόντος καθορίζονται με βάση τη μελέτη ολόκληρου του κύκλου ζωής τους, δηλαδή της παραγωγής – εξόρυξης πρώτων υλών, της παραγωγής, της διανομής, της χρήσης και της απόρριψής τους. Κατά τη διάρκεια της μελέτης των φάσεων αυτών, αξιολογούνται λεπτομερώς οι επιπτώσεις για το περιβάλλον. Λαμβάνονται επίσης υπόψη τα υλικά που υπεισέρχονται στη σύνθεση του προϊόντος. Το οικολογικό σήμα δεν απονέμεται, λοιπόν, βάσει θεωρητικά επιλεγμένων κριτηρίων, αλλά ύστερα από εμπειριστατωμένη μελέτη των αλληλεπιδράσεων όλων των παραγόντων του συγκεκριμένου προϊόντος με το περιβάλλον.

Το κοινοτικό οικολογικό σήμα απονέμεται από το Συμβούλιο Οικολογικής Σήμανσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EUEB) που υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. **Κάθε κράτος μέλος ορίζει έναν αρμόδιο φορέα ο οποίος χειρίζεται όλες τις σχετικές διαδικασίες και απονέμει το οικολογικό σήμα.** Οι κατασκευαστές ή οι εισαγωγείς πρέπει να απευθύνονται στον φορέα αυτόν στη χώρα όπου το προϊόν κατασκευάζεται ή διατίθεται στο εμπόριο για πρώτη φορά ή εισάγεται από τρίτη χώρα. Στην Ελλάδα, αρμόδιος Εθνικός Φορέας είναι το Α.Σ.Α.Ο.Σ. – Ανώτατο Συμβούλιο Απονομής Οικολογικού Σήματος, στο οποίο συμμετέχουν εκπρόσωποι της βιομηχανίας, περιβαλλοντικών οργανώσεων και οργανώσεων καταναλωτών.

Μόλις ένας αρμόδιος φορέας αποφασίσει ότι μπορεί να απονείμει ένα οικολογικό σήμα, κοινοποιεί την απόφασή του στην Επιτροπή, η οποία ενημερώνει αμέσως τους άλλους αρμόδιους φορείς. Εάν, εντός 30 ημερών, από την κοινοποίηση δεν προβληθεί καμία αντίρρηση, το σήμα μπορεί να απονεμηθεί και να χρησιμοποιείται για το συγκεκριμένο προϊόν σε όλα τα κράτη μέλη. Εάν κάποια χώρα διατυπώσει

αντιρρήσεις, λαμβάνεται απόφαση σε κοινοτικό επίπεδο. Η σύννομη χρησιμοποίηση του οικολογικού σήματος ελέγχεται βάσει μιας τυποποιημένης σύμβασης που υπογράφεται μεταξύ της επιχείρησης, και του αρμόδιου φορέα. Η διάρκεια ισχύος της σύμβασης αυτής εξαρτάται από τη διάρκεια ισχύος των οικολογικών κριτηρίων που κατά κανόνα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι τριετής. Κατά συνέπεια, είναι προτιμότερο για τις επιχειρήσεις να υποβάλλουν τις αιτήσεις τους όσο πιο σύντομα γίνεται από τότε που θεσπίστηκαν και δημοσιεύτηκαν τα οικολογικά κριτήρια και όχι στο τέλος της περιόδου ισχύος τους.

Κριτήρια απονομής οικολογικού σήματος για σκληρές επενδύσεις δαπέδων

Τα κριτήρια για την απονομή του οικολογικού σήματος για τις σκληρές επενδύσεις δαπέδου *αποσκοπούν στον περιορισμό:*

- της μείωσης των επιπτώσεων στους φυσικούς πόρους,
- της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας,
- της μείωσης των εκπομπών τοξικών ή άλλων ρυπογόνων ουσιών,
- της μείωσης της χρήσης επικίνδυνων ουσιών.

Τα **κριτήρια απονομής του σήματος για τις σκληρές επενδύσεις δαπέδου** είναι (www.europa.eu.int/eur-lex/pri/el/oj/dat/2002/l-094/l-094200204111e/00130027.pdf) τα εξής:

- η διαχείριση της εξόρυξης των πρώτων υλών (μόνο για τα φυσικά προϊόντα),
- ο αποκλεισμός καρκινογόνων, τοξικών και οικοτοξικών ουσιών από την επιλογή των πρώτων υλών (για όλα τα προϊόντα επένδυσης δαπέδου),
- οι μειωμένες εκπομπές στερεών σωματιδίων και στυρενίου στον αέρα, καθώς και η μειωμένη έκλυση αιωρούμενων στερεών και βαρέων μετάλλων στο νερό κατά την επεξεργασία των πρώτων υλών (μόνο για φυσικά προϊόντα),
- ο περιορισμός στην κατανάλωση ενέργειας και νερού και οι μειωμένες εκπομπές στον αέρα κατά τη διαδικασία παραγωγής (μόνο για επεξεργασμένα προϊόντα),
- η διαχείριση των αποβλήτων και των καταλοίπων που προέρχονται από την παραγωγή του προϊόντος,
- η μειωμένη απελευθέρωση επικίνδυνων ουσιών κατά το στάδιο της χρήσης τους (μόνο για εμφιαλωμένα πλακίδια),
- η καταλληλότητα προς χρήση που πιστοποιείται από μεθόδους ISO, CEN,
- η ενημέρωση του καταναλωτή με συστάσεις για την αποδοτική χρήση και συντήρηση του προϊόντος και επεξηγήσεις σχετικά με τον κύκλο ανακύκλωσης ή διάθεσής τους.

3 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΣ / ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η σχέση «περιβάλλοντος – σκυροδέματος» είναι θεμελιώδης για την επίτευξη της αειφορίας στην κατασκευή. Οι βιομηχανίες τσιμέντου και σκυροδέματος είναι από τις μεγαλύτερες στον κόσμο και υπάρχει έντονη προσπάθεια για βελτίωση και παραγωγή νέων προϊόντων. Κατά κύριο λόγο, ο άξονας πάνω στον οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιείται αυτή η αλλαγή είναι η μείωση του CO₂ στην παραγωγική βιομηχανία.

Αναλυτικότερα, οικολογικό ή «πράσινο» σκυρόδεμα (ecological or 'green' concrete) σχεδιάζεται σε διάφορα μέρη του κόσμου, ωστόσο ο ορισμός του διαφέρει κατά περίπτωση, δεν υπάρχει δηλαδή ένας μόνο αποδεκτός ορισμός. **Το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται ως οικολογικό ή «πράσινο»:**

- 1) *όταν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που προέρχονται από την παραγωγή του αλλά και οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι χαμηλότερες από εκείνες που προέρχονται από την παραγωγή συμβατικού σκυροδέματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί π.χ. εάν αξιοποιηθούν παραπροϊόντα άλλων διεργασιών (π.χ. ιπτάμενη τέφρα) ή εάν μεταβληθεί η παραγωγική διεργασία του σκυροδέματος (π.χ. χρήση εναλλακτικών καυσίμων) ή εάν το τσιμέντο έχει μειωμένη συμμετοχή στο σκυρόδεμα σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, καθώς το τσιμέντο θεωρείται ως το συστατικό του σκυροδέματος με το μεγαλύτερο οικολογικό αποτύπωμα και τις μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις. Στην τελευταία περίπτωση, βασικός στόχος είναι η αντικατάσταση του τσιμέντου από άλλα υλικά και με την προϋπόθεση ότι το τελικό υλικό διατηρεί ή / και βελτιώνει τις επιθυμητές ιδιότητες του σκυροδέματος, το αποτέλεσμα είναι ένα οικολογικότερο σκυρόδεμα. Το ζητούμενο άρα είναι η βελτιστοποίηση των αναλογιών του μίγματος των συστατικών του σκυροδέματος.*
- 2) *όταν λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα ανακύκλωσής του και η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών του επιπτώσεων (συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών CO₂, κατά ολόκληρο τον κύκλο ζωής του. Στα πλαίσια αυτά, είναι σημαντική η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Analysis, LCA) και η εκτίμηση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του σκυροδέματος καθόλη τη διάρκεια ζωής του.*

Οι τρόποι ελαχιστοποίησης του οικολογικού αποτυπώματος της βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος εστιάζουν, όπως προαναφέρθηκε, κυρίως στην ελάττωση των εκπομπών CO₂ κατά την παραγωγική διαδικασία. Έχουν μελετηθεί, και σε αρκετές περιπτώσεις έχουν εφαρμοστεί στην πράξη, διάφοροι **τρόποι ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και κυρίως ελάττωσης των εκπομπών CO₂ από την παραγωγική διαδικασία του σκυροδέματος** (ουσιαστικά της τσιμεντοβιομηχανίας) αλλά και ολόκληρου του κύκλου ζωής του σκυροδέματος:

A) Αλλαγές στην παραγωγική διεργασία:

- Ο προσφορότερος τρόπος ελάττωσης του παραγόμενου CO₂ είναι η *αύξηση της αποδοτικότητας στην παραγωγή ενέργειας μέσα στην περιστροφική κάμινο*, κάτι που τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται ότι είναι εφικτό (υποκεφάλαιο 3.2.1).
- Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν *εναλλακτικά καύσιμα* (φυσικό αέριο, τσόφλια καρπών ροδάκινων, κ.λπ.) που παράγουν μικρότερες ποσότητες CO₂ αλλά και *απορρίμματα* με υψηλή θερμογόνο δύναμη (υποκεφάλαιο 3.2.2).
- Η *βελτιστοποίηση των διεργασιών παραγωγής αδρανών υλικών με τη χρήση κωνικών έναντι των κρουστικών θραυστήρων* οδηγώντας σε αύξηση των χρήσιμων προϊόντων, προσφέρει σημαντικό περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος από την παραγωγή χρήσιμου υλικού, από τη μείωση της εξορυσσόμενης ποσότητας ασβεστολιθικού υλικού και από τη μειωμένη επιφάνεια απόθεσης του λεπτόκοκκου υλικού (υποκεφάλαιο 3.2.3).

B) Ανακύκλωση – Επαναχρησιμοποίηση σκυροδέματος:

Σήμερα οι όγκοι του σκυροδέματος που πρέπει να απομακρυνθούν, μεγαλώνουν συνεχώς προκαλώντας σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Πολλά τεχνικά έργα κατεδαφίζονται λόγω υπέρβασης των ορίων τους, νέων αναγκών, φυσικών καταστροφών κλπ. Αλλά και οι βιομηχανίες σκυροδέματος δημιουργούν απορρίμματα (στοιχεία προκατασκευής, δοκίμια μετά το σπάσιμο, επιστροφές σκυροδέματος λόγω καθυστερήσεων, μη αποδοχής ή κακού υπολογισμού της ποσότητας). *Θραυσμένο σκυρόδεμα από κατεδαφίσεις ή από τις βιομηχανίες παραγωγής του* μπορεί να αξιοποιηθεί ως υποκατάστατο των φυσικών αδρανών εξοικονομώντας πρώτες ύλες και ενέργεια, με συνακόλουθο τις μικρότερες εκπομπές CO₂. Έτσι, το σκυρόδεμα με τέτοια ανακυκλωμένα αδρανή αποτελεί υλικό φιλικό προς το περιβάλλον (υποκεφάλαιο 3.3).

Γ) Σχεδιασμός «πράσινων» σύνθετων τσιμέντων με την αξιοποίηση προσμίκτων

Για την παραγωγή οικολογικού σκυροδέματος, με μειωμένο περιεχόμενο σε τσιμέντο Portland, μπορούν να αξιοποιηθούν διάφορα πρόσθετα - πρόσμικτα (υλικά αντικατάστασής του). Με τον τρόπο αυτό παρατηρείται μείωση της απαιτούμενης ενέργειας παραγωγής, μείωση των εκπομπών CO₂ αλλά και αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες (υποκεφάλαιο 3.4).

Ως *πρόσμικτα* ορίζονται τα ενεργά ή μη σωματίδια που δημιουργούν μια συνδετική δομή μεταξύ των αδρανών ή των συσσωματωμάτων αδρανών ή απλά δημιουργούν έναν βελτιωμένο δεσμό μεταξύ gel τσιμέντου και των αδρανών. Ως πρόσμικτα δηλαδή θεωρούνται *συνδετικές (binders)* ή *πληρωτικές (fillers)* ουσίες. Τα προϊόντα της αντίδρασης αποτελούνται από το gel τσιμέντου ή τη λεγόμενη κόλλα που ενώνει τα αδρανή. Εκτός της συνδετικής τους ικανότητας, αυτά τα λεπτά σωματίδια συχνά βελτιώνουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιστοποιώντας την *particle packing πυκνότητα* και ελαττώνοντας τις απαιτήσεις σε νερό (filler effect). Τα υλικά αυτά μπορεί είτε να υπάρχουν στη φύση είτε να παρασκευάζονται τεχνητά. Μάλιστα, σήμερα σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή γίνεται αποδέκτης «απορριμμάτων»,

δηλαδή τα υλικά που εντάσσονται μέσα σε αυτήν έχουν προκύψει από κάποια άλλη παραγωγική διαδικασία (βιομηχανικά παραπροϊόντα).

Το τσιμέντο Portland δύναται να αντικατασταθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Καταρχήν στην τσιμεντοβιομηχανία το τσιμέντο Portland μπορεί να αντικατασταθεί από υλικά, όπως σκωρία υψικαμίνων ή ιπτάμενη τέφρα. Αυτά τα υλικά συνήθως είναι αναμειγμένα ή ακόμα και συναλεσμένα (co-grinded) με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν συνεχείς – σταθερές και καλές ιδιότητες. Το νέο προϊόν - τσιμέντο έχει τέτοια σύσταση που όταν χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα έχει την ίδια αντοχή που αποκτάει το κανονικό τσιμέντο Portland σε 28 ημέρες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εάν για παράδειγμα γίνεται άλεση σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες μέσω της αύξησης της ενεργού επιφάνειας, επιταχύνουν την αντίδραση των αντιδρώντων σωματιδίων. Το τσιμέντο που παράγεται με αυτόν τον τρόπο θεωρείται ως βασικό υλικό, στο οποίο όμως η περιεκτικότητα σε τσιμέντο Portland ελαττώνεται μέσω αντικατάστασης του συμβατικού τσιμέντου με πληρωτικές ή συνδετικές ουσίες.
- Ένας δεύτερος τρόπος αντικατάστασης του τσιμέντου είναι η υποκατάστασή του κατά ένα μέρος από άλλο συνδετικό ή λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό στο φρέσκο μίγμα σκυροδέματος. Με τον τρόπο αυτόν, οποιοσδήποτε τύπος τσιμέντου δύναται να αντικατασταθεί από λεπτά υλικά όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα, κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων, σκόνη ασβεστόλιθου κ.ά. Πραγματοποιούνται διάφορες έρευνες οι οποίες στοχεύουν στην βελτιστοποίηση των συστατικών του μίγματος του σκυροδέματος για την παραγωγή οικολογικού σκυροδέματος.

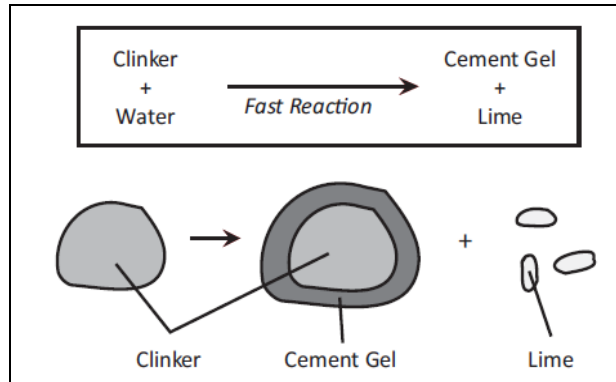
Αναλυτικότερα, έχει μελετηθεί ο σχεδιασμός σύνθετων τσιμέντων με πρόσμικτα που παρουσιάζουν υδραυλικές, ποζολανικές και πληρωτικές ιδιότητες:

- **Υδραυλικές ιδιότητες** έχουν το κλίνκερ, οι ασβεστούχες ιπτάμενες τέφρες, ο ψημένος σχιστόλιθος καθώς και η σκωρία υψικαμίνων. Τα υλικά αυτά είναι τεχνητά και προκύπτουν ως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών. Πιο συγκεκριμένα, υδραυλικά ονομάζονται τα ανόργανα υλικά που με απλή ανάμιξη με νερό αναπτύσσουν μη αντιστρέψιμες αντοχές (φαινόμενο υδραυλικής σκλήρυνσης). Φορέας της υδραυλικής σκλήρυνσης στα υλικά αυτά, τα οποία χρησιμοποιούνται με την μορφή κονιών, είναι οι ασβεστοπυριτικές ενώσεις που περιέχουν, οι οποίες με προσθήκη νερού ενυδατώνονται σχηματίζοντας C-S-H ($x\text{CaO}\cdot y\text{SiO}_2\cdot z\text{H}_2\text{O}$), δηλαδή δίνουν ενυδατωμένες ασβεστοπυριτικές ενώσεις. Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άσβεστο (CaO) και πυριτικά (SiO_2), τα επιμέρους συστατικά των υδραυλικών συνδετικών υλικών μπορούν να διαχωριστούν σε:

1. Υδραυλικά συστατικά με λόγο $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 2$

Χαρακτηριστικός αντιπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι το **κλίνκερ** του τσιμέντου Portland με λόγο:

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 3$$



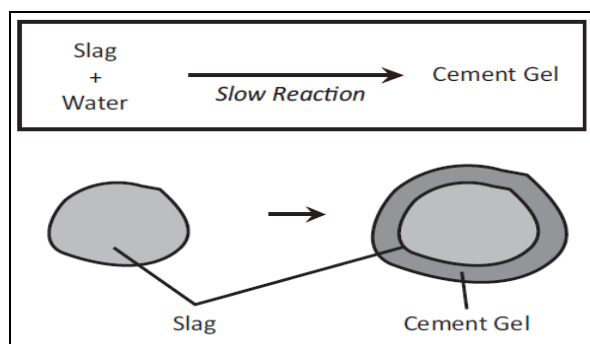
Εικόνα 3.1 Η αντίδραση του κλίνκερ με το νερό για την παραγωγή gel τσιμέντου (Fennis, 2011).

Έτσι το κλίνκερ αντιδρώντας με το νερό σχηματίζει ένα αδιάλυτο συστατικό, gel τσιμέντου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1 και από την αντίδραση αυτή παράγεται υδροξείδιο του ασβεστίου.

2. Συστατικά με έμμεσες υδραυλικές ιδιότητες με λόγο:

$$\frac{CaO}{SiO_2} = 1 - 1,5$$

Υδραυλικά σωματίδια και σε αυτή την περίπτωση αντιδρούν με το νερό για να σχηματίσουν gel τσιμέντου, όμως αυτή η αντίδραση είναι πολύ αργή και χρειάζεται να ενεργοποιηθεί (Εικόνα 3.2). Επειδή ο στόχος είναι η αντικατάσταση του κλίνκερ στο gel τσιμέντου, η αξιοποίηση σωματιδίων αυτής της κατηγορίας, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων είναι ένα από τα αντιδρώντα που χρειάζεται ενεργοποίηση. Πιθανοί ενεργοποιητές είναι αλκαλικοί ή θεικοί. Το υδροξείδιο του ασβεστίου που προέρχεται από την αντίδραση του τσιμέντου Portland δημιουργεί ένα ισχυρά αλκαλικό περιβάλλον που μπορεί να δράσει ως ενεργοποιητής για τη σκωρία υψικαμίνων. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν και οι ασβεστούχες ιπτάμενες τέφρες.



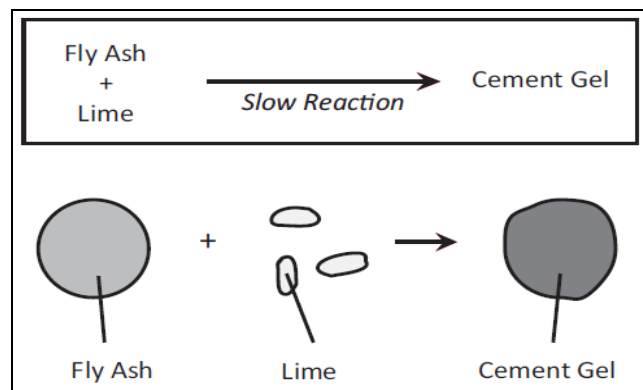
Εικόνα 3.2 Η αντίδραση των σωματιδίων σκωρίας υψικαμίνων με το νερό (Fennis, 2011).

- **Ποζολανικές** ιδιότητες έχουν οι φυσικές ποζολάνες (π.χ. Θηραϊκή και Μηλαϊκή γη), οι τόφοι και οι διατομίτες, τα οποία είναι φυσικά πετρώματα, καθώς και η όξινη (πυριτική) ιπτάμενη τέφρα, η πυριτική πεπάλη

(σιδηροπυρίτιο), ο ρυζοφλοιός και κάποιες ψημένες ποζολάνες και σχιστόλιθοι, τα οποία είναι τεχνητά υλικά. Ποζολάνες ή ποζολανικά υλικά ονομάζονται πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά που δεν περιέχουν ενεργή άσβεστο (CaO) παρά μόνο ενεργό SiO₂ και δεν σκληρύνονται αυτοτελώς. Έχουν όμως την δυνατότητα να ενώνονται με την υδράσβεστο Ca(OH)₂ και να σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις, που δημιουργούν επίσης μια δομή gel τσιμέντου και με το χρόνο σκληρύνονται και αποκτούν μικρές ή μεγαλύτερες αντοχές (Εικόνα 3.3). Τα ποζολανικά συστατικά παρουσιάζουν λόγο:

$$\frac{CaO}{SiO_2} \sim 0,1 - 0,3$$

Η ταχύτητα της αντίδρασης εξαρτάται από τη λεπτότητα των σωματιδίων και την αλκαλικότητα του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα η πυριτική παιπάλη αντιδρά γρηγορότερα από την ιπτάμενη τέφρα εξαιτίας της λεπτομέρειας των σωματιδίων. Ο μέγιστος βαθμός ποζολανικού υλικού που αντιδράει εξαρτάται από την ποσότητα του υδροξειδίου του ασβεστίου στο νερό, το οποίο προκύπτει από την αντίδραση παραγωγής τσιμέντου Portland από κλίνκερ.



Εικόνα 3.3 Η αντίδραση σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας με υδροξείδιο του ασβεστίου (Fennis, 2011).

Για να χρησιμοποιηθεί μια ποζολάνη για την παρασκευή τσιμέντων τύπου II ή III πρέπει να ικανοποιεί την δοκιμή δραστηριότητας που προβλέπει ο Κανονισμός, δηλαδή να παρουσιάζει συμβατική αντοχή τουλάχιστον 5 Μpa. Στην Ελλάδα υπάρχουν ηφαιστιογενείς γαίες με ποζολανικές ιδιότητες σε πολλές περιοχές, όπως η Θήρα (Θηραϊκή γη), η νήσος Μήλος (Μηλαϊκή γη), τα νησιά Γιαλί και Νίσυρος των Δωδεκανήσων, στο νομό Πέλλης και αλλού.

- **Πληρωτικές** ιδιότητες έχουν ο ασβεστόλιθος (CaCO₃) και η πυριτική άμμος που είναι φυσικά υλικά. Πληρωτικές ουσίες (fillers) ονομάζονται υλικά, συνήθως αδρανή, σε λεπτότατο καταμερισμό, τα οποία δεν συμβάλλουν στην ανάπτυξη των αντοχών, είναι δηλαδή λεπτά σωματίδια που δεν αντιδρούν ενεργά προς σχηματισμό gel τσιμέντου. Παρόλο που τα πληρωτικά υλικά δεν αντιδρούν εύκολα, έχουν θετική επίδραση στις ιδιότητες του σκυροδέματος, καθώς γεμίζουν τα κενά μεταξύ μεγαλύτερων συσσωματωμάτων σωματιδίων.

Τα λεπτά σωματίδια όχι μόνο αυξάνουν την λεγόμενη πυκνότητα πακεταρίσματος σωματιδίων (particle packing density) και ελαττώνουν τις απαιτήσεις σε νερό, αλλά επιπλέον δημιουργούν έναν βελτιωμένο δεσμό μεταξύ gel τσιμέντου και των αδρανών. Ο λόγος είναι ότι τα λεπτομερή πληρωτικά υλικά επηρεάζουν τη δημιουργία και τον προσανατολισμό των μεγάλων κρυστάλλων στο gel τσιμέντου. Τα λεπτά σωματίδια δρουν ως πόλοι πυρηνοποίησης πάνω στους οποίους το gel τσιμέντου επικάθεται. Ειδικά στη ζώνη γύρω από μεγαλύτερα σωματίδια αυτό οδηγεί σε πιο ισχυρή δομή τσιμέντου. Αυτά επομένως προστίθενται στο συνδετικό υλικό σαν πληρωτικά υλικά σε κατάλληλη κοκκομετρία, διότι αφενός δεν μειώνουν τις αντοχές, αφετέρου έχουν καλή συνάφεια με τα προϊόντα ενυδάτωσης. Επιπλέον τα fillers σε μικρές ποσότητες επιδρούν ευνοϊκά στο εργάσιμο και την υδατοπερατότητα. Η δράση τους είναι κυρίως μηχανική, δηλαδή δρουν σαν λιπαντικό για το εργάσιμο. Σπανίως παρουσιάζουν και ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες. Αυτό όμως εξαρτάται από το αρχικό υλικό από το οποίο προέρχεται το filler.

Τα παραπάνω υλικά με υδραυλικές, ποζολανικές και πληρωτικές ιδιότητες διαμορφώνουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα των τσιμέντων στα οποία χρησιμοποιούνται, δηλαδή τη χημική σύνθεση και την εσωτερική δομή του gel τσιμέντου. Συνεπώς οι ιδιότητες του σκυροδέματος διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται και μπορούν να παραχθούν με διαφορετικούς συνδυασμούς σύνθετα τσιμέντα τα οποία να καλύπτουν τις ιδιαίτερες ανάγκες μιας συγκεκριμένης κατασκευής. Η τάση είναι να παράγονται σύνθετα τσιμέντα με περισσότερα από δύο άλλα κύρια συστατικά έτσι ώστε να αξιοποιούνται στο μέγιστο οι καλές ιδιότητες των υλικών αυτών. Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι η θηραϊκή γη χρησιμοποιείται από τις ελληνικές βιομηχανίες τσιμέντου ως πρόσμικτο ποζολανικό υλικό τσιμέντου από το 1930 περίπου.

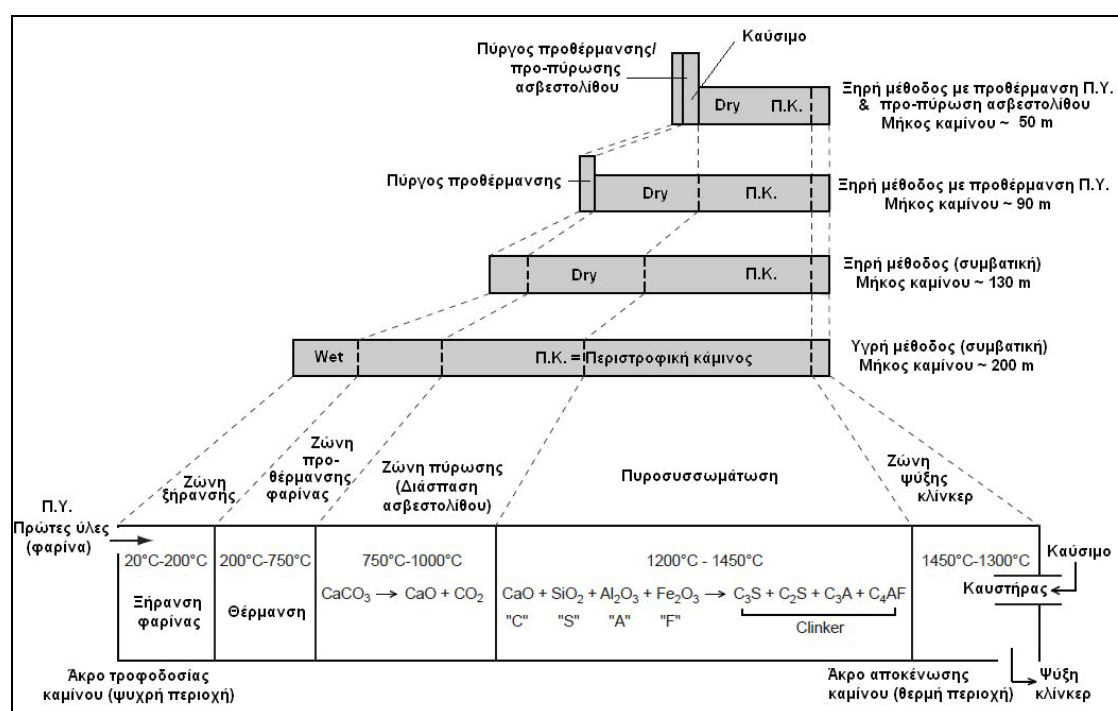
Τα αποτελέσματα ερευνών που αφορούν αναλυτικά τον τρόπο που οι αλλαγές στην εσωτερική δομή του, λόγω των πληρωτικών και συνδετικών ουσιών, επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος, συνοψίζονται στο υποκεφάλαιο 3.4. Στο ίδιο υποκεφάλαιο αναπτύσσονται τα ερευνητικά αποτελέσματα καθώς και εφαρμογές οικολογικού σκυροδέματος στην Ελλάδα αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο. Τονίζονται και ειδικές περιπτώσεις καινοτομιών, όπως η αξιοποίηση παραπροϊόντων της ίδιας της βιομηχανίας παραγωγής σκυροδέματος, π.χ. της σκόνης από την θραύση των αδρανών και των υπολειμμάτων μίγματος σκυροδέματος από πλύση των μηχανημάτων, η διερεύνηση της χρήσης παραπροϊόντων άλλων βιομηχανικών διεργασιών που δεν αξιοποιούνται προς το παρόν στο σκυρόδεμα π.χ. της στάχτης από καύση της λάσπης που παράγεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Τέλος, πέρα από τα παραπάνω, διεξάγεται και έρευνα σχετική με τη μεταφορά ραδονίου δια μέσου του σκυροδέματος. Πέρα από τις διάφορες τεχνολογικές λύσεις που προτείνονται στο υποκεφάλαιο 2.2 σχετικά με τη δράση του σκυροδέματος ως φράγματος ραδονίου, έχει διεξαχθεί αρκετή έρευνα που αφορά την επίδραση της σύνθεσης του σκυροδέματος στη δράση του ως πηγή ή φράγμα ραδονίου (υποκεφάλαιο 3.5).

3.2 ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ

3.2.1 Μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στην περιστροφική κάμινο

Ο προσφορότερος τρόπος ελάττωσης του παραγόμενου CO₂ είναι η **ελάττωση της καταναλισκόμενης ενέργειας μέσα στην περιστροφική κάμινο**, κάτι που τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται ότι είναι εφικτό. Οι διάφορες μέθοδοι και διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν με την πάροδο του χρόνου για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου φαίνονται στο Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4 Σχέση μεταξύ μεθόδου παραγωγής του κλίνκερ τσιμέντου και του μήκους της περιστροφικής καμίνου και κατανομή των ζωνών κατεργασίας μέσα στην κάμινο (Τσακαλάκης, 2010).

Η κατανάλωση ενέργειας (ποσότητα καυσίμου) που είναι απαραίτητη στην παραγωγή του κλίνκερ, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη μέθοδο κατεργασίας της φαρίνας, αλλά και από τις αντίστοιχες διατάξεις. Οι καταναλώσεις αυτές, είναι:

- 3000-3800 MJ/t κλίνκερ για ξηρή μέθοδο παραγωγής με 3-6 στάδια προθέρμανσης/πύρωσης ασβεστολίθου (dry process preheater/precalciner)
- 3100-4200 MJ/t κλίνκερ για ξηρή μέθοδο παραγωγής με διάφορα στάδια προθέρμανσης (dry process preheater)
- 3300-4500 MJ/t κλίνκερ ημι-ξηρή/ημι-υγρή μέθοδο παραγωγής (Lepol-kiln)
- Έως 5000 MJ/t κλίνκερ για ξηρή μέθοδο παραγωγής σε μεγάλου μήκους καμίνους (dry process long kilns)
- 5000-6000 MJ/t κλίνκερ για υγρή μέθοδο παραγωγής σε μεγάλου μήκους καμίνους (wet process long kilns)
- 3100-4200 MJ/t κλίνκερ για κατακόρυφες φρεατώδεις καμίνους.

Στον Πίνακα 3.1 συγκρίνονται αναλυτικά οι θερμικές καταναλώσεις σε διατάξεις ξηρής μεθόδου (preheater/precalciner) και υγρής μεθόδου παραγωγής κλίνκερ. Οι επιπλέον ενεργειακές καταναλώσεις στην παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου αφορούν στις τεχνολογικά αναπόφευκτες ενεργειακές απώλειες της διεργασίας, οι οποίες καταγράφονται στον πίνακα.

Η θερμότητα για τη λειτουργία της περιστροφικής καμίνου και την επιτέλεση των αντιδράσεων πυροσυσσωμάτωσης (κλινκεροποίηση) προκύπτει από την καύση των χρησιμοποιούμενων καυσίμων.

Πίνακας 3.1 Ενεργειακές απαιτήσεις στην παραγωγή του κλίνκερ (Τσακαλάκης, 2010).

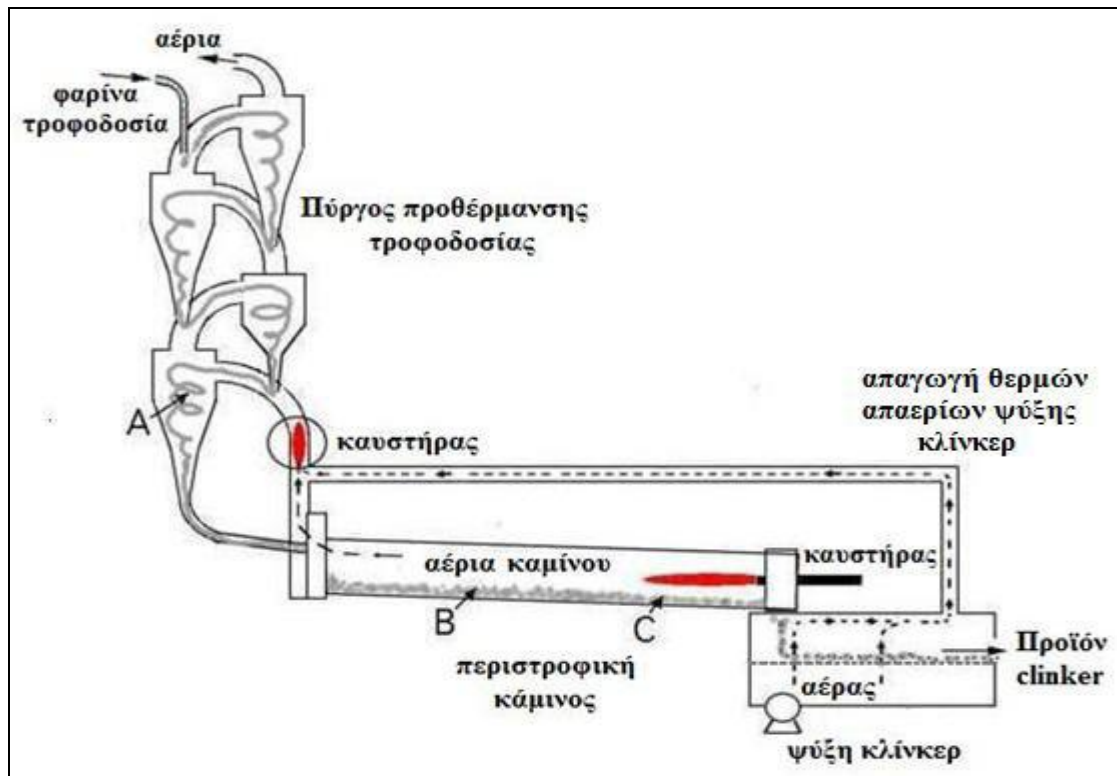
Κατανάλωση ενέργειας στην παραγωγή του κλίνκερ (MJ/t κλίνκερ)	Μέθοδος παραγωγής	
	Ξηρή	Υγρή
Θεωρητική απαίτηση θερμότητας στις χημικές αντιδράσεις παραγωγής κλίνκερ	1807	1741
Εξάτμιση υγρασίας πρώτων υλών	13	2364
Απώλεια θερμότητας στα απαέρια και στη σκόνη	623	753
Θερμικές απώλειες στο κλίνκερ	88	59
Απώλεια θερμότητας στον αέρα ψύξης του κλίνκερ	427	100
Απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία και μεταφορά	348	682
ΣΥΝΟΛΟ	3306	5699
Κατανάλωση άνθρακα (t / t κλίνκερ) (Θερμογόνος δύναμη χρησιμοποιούμενου άνθρακα 25.3 GJ/ t)	0.13	0.23
Κατανάλωση άνθρακα τ. Ινδίας (t / t κλίνκερ) (Θερμογόνος δύναμη χρησιμοποιούμενου άνθρακα 16.74 GJ/ t)	0.20	0.34

Επομένως, για λόγους μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας και του χρόνου παραμονής του υλικού, η κύρια μέθοδος παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου είναι η ξηρή μέθοδος (Εικόνα 3.5) με προθέρμανση της φαρίνας και μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου (Preheater-precalciner). Στα διάφορα στάδια της ξηρής αυτής διεργασίας γίνονται οι παρακάτω διεργασίες:

- 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 - 1000°C).
- Σχηματισμός ενδιάμεσων φάσεων από την αντίδραση των πρώτων υλών μεταξύ τους μέσα στην κάμινο (θερμοκρασίες 1000 - 1200°C).
- Πυροσυσσωμάτωση και σχηματισμός σφαιριδίων κλίνκερ (θερμοκρασίες 1200-1450°C) μέσα στην κάμινο και κατόπιν ψύξη του κλίνκερ.

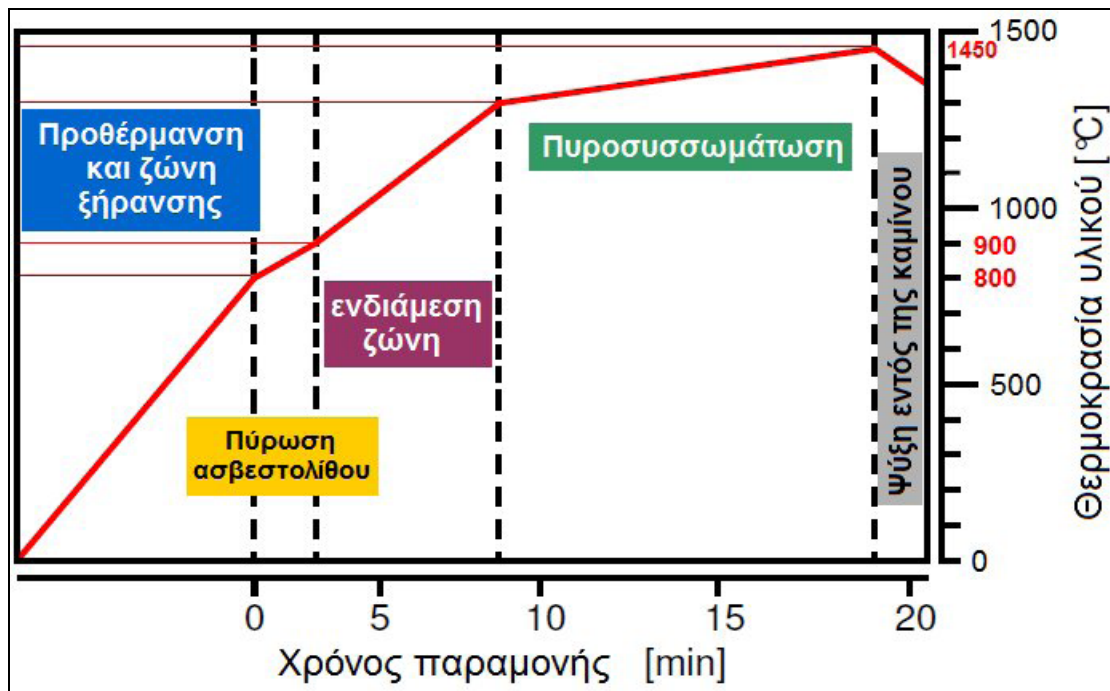
Στις καμίνους αυτού του τύπου (preheater-precalciner), η ξήρανση, η απομάκρυνση του συνδεδεμένου νερού στις πρώτες ύλες, η προθέρμανση στη θερμοκρασία πύρωσης και η μερική διάσπαση (πύρωση) του ασβεστολίθου γίνονται εκτός της περιστροφικής καμίνου στον πύργο προθέρμανσης και προ-πύρωσης (preheater/precalciner). Στις καμίνους τύπου preheater 30-40% της πύρωσης γίνεται εκτός της καμίνου, ενώ στις καμίνους τύπου precalciner 90-95%, αντιστοίχως. Αυτό

τελικά καθορίζει και το μήκος που καταλαμβάνει η ζώνη πύρωσης και η ζώνη πυροσυσσωμάτωσης εντός της καμίνου, το οποίο διαμορφώνεται σε 60% και 35%, αντιστοίχως. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι απαραίτητο (Εικόνα 3.5), μέρος (50-65%) του απαιτούμενου καυσίμου της διεργασίας να εισαχθεί στην περιοχή του προασβεστοποιητή του πύργου προθέρμανσης/πύρωσης της τροφοδοσίας με αντίστοιχη μείωση της ποσότητας του εισαγόμενου καυσίμου στην έξοδο της καμίνου.



Εικόνα 3.5 Διάταξη ξηρής μεθόδου παραγωγής κλίνκερ με προθέρμανση της τροφοδοσίας και πύρωση του ασβεστολίθου (Preheater/Precalciner) (Τσακαλάκης, 2010).

Το καύσιμο, που εισάγεται στον precalciner, καίεται με τη βοήθεια των θερμών αερίων που προέρχονται από την κάμινο ή από την ψύξη του κλίνκερ σε θερμοκρασίες χαμηλότερες και η διεργασία της καύσης έχει μεγάλη απόδοση. Το ομογενοποιημένο υλικό (φαρίνα) κινείται κατ' αντίρροή με τα ανερχόμενα θερμά αέρια και παραμένει λίγα μόνο δευτερόλεπτα (20-90s) στη θερμότερη περιοχή (θερμοκρασία 850-900°C) του precalciner, η δε διάσπαση του ασβεστολίθου ολοκληρώνεται σε ποσοστό 90-95% πριν την εισαγωγή της φαρίνας στην περιστροφική κάμινο. Η τέφρα από το καύσιμο ενσωματώνεται ικανοποιητικά στη φαρίνα της τροφοδοσίας και τελικώς στο κλίνκερ. Στην Εικόνα 3.6 δίνεται η κατανομή του χρόνου και η διακύμανση των θερμοκρασιών στις διάφορες ζώνες εντός της καμίνου.



Εικόνα 3.6 Ξηρή μέθοδος παραγωγής κλίνκερ με προθέρμανση της τροφοδοσίας και πύρωση του ασβεστολίθου (Preheater/Precalciner) - Θερμοκρασιακό προφίλ και χρόνος παραμονής του υλικού σε κάθε περιοχή (Τσακαλάκης, 2010).

Στις διατάξεις αυτές διοχετεύεται μικρότερη ποσότητα καυσίμων/θερμότητας στην έξοδο της καμίνου, οπότε η προ-διάσπαση (precalcination) του ασβεστολίθου στον πύργο επιτρέπει την ταχύτερη διέλευση του υλικού μέσα από το κυρίως τμήμα της περιστροφικής καμίνου. Έτσι, επιτυγχάνεται μείωση του μήκους και της διαμέτρου της καμίνου όπως επίσης και του χρόνου παραμονής-κατεργασίας του υλικού, μείωση του κόστους επένδυσης και προκαλείται επιμήκυνση του χρόνου ζωής της πυρίμαχης επένδυσης (πυρίμαχα τούβλα). Επίσης, οι ποσότητες των αερίων NO_x , που παράγονται, είναι μικρότερες λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας καύσης του καυσίμου, ενώ στη διάταξη precalciner είναι δυνατή η καύση καυσίμων υποδεέστερης θερμογόνου δύναμης.

3.2.2 Εναλλακτικά καύσιμα ή απορρίμματα με υψηλή θερμογόνο δύναμη

Τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις των περιστροφικών καμίνων είναι τριών ειδών, αέρια, υγρά, στερεά. Επιπλέον δύναται να αξιοποιούνται εναλλακτικά καύσιμα ή συνδυασμός τουλάχιστον δύο ειδών από τα παραπάνω (Πίνακας 3.2). Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία κατανέμονται ποσοστιαία κατ' είδος, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή ένωση τσιμεντοβιομηχανιών (CEMBUREAU), όπως στον Πίνακα 3.3, ενώ η χρήση τους σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες φαίνεται στην Εικόνα 3.7.

Συμβατικά καύσιμα

Ως **στερεά καύσιμα** θεωρούνται οι παντός είδους ορυκτοί άνθρακες, τα ξύλα κ.α.

Τα **υγρά καύσιμα** που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία είναι, για λόγους χαμηλού κόστους, αποκλειστικά βαρέα κλάσματα της απόσταξης αργού πετρελαίου και παρουσιάζουν σοβαρά περιβαλλοντικά μειονεκτήματα (μη ανανεώσιμα, αέρια ρύπανση κ.λπ.).

Από τα **αέρια καύσιμα**, αξιοποιείται στην τσιμεντοβιομηχανία κυρίως το φυσικό αέριο (περίπου 95% CH₄), επειδή είναι το φθηνότερο από τα υπόλοιπα αέρια καύσιμα και έχει μεγάλη θερμογόνο δύναμη, λόγω και του περιεχόμενου υδρογόνου. Παρουσιάζει ουσιαστικά πλεονεκτήματα (τεχνικά και περιβαλλοντικά) έναντι των άλλων ορυκτών καυσίμων. Αυτά είναι τα εξής:

- Δεν χρειάζεται καμιά προετοιμασία ξήρανση, λειοτρίβηση ή προθέρμανση, όπως τα στερεά ή τα υγρά, αντιστοίχως.
- Η καύση λαμβάνει χώρα μόλις αναμειχθεί με την κατάλληλη ποσότητα αέρα και η θερμοκρασία έναυσης φθάσει στην επιθυμητή τιμή της.
- Η ατμόσφαιρα στη ζώνη καύσης είναι «διαυγής» σε σχέση με αυτή που εμφανίζεται στις περιπτώσεις καύσης πετρελαίου ή άνθρακα.
- Χρησιμοποιούνται απλά συστήματα καύσης χωρίς ουσιαστική ανάγκη συντήρησης.
- Έχει περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, λόγω χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και άλλων εκπομπών αερίων ρύπων.
- Πλεονέκτημα της έναυσης του φυσικού αερίου θεωρείται τέλος, η μη αναγκαιότητα σημαντικής ποσότητας αρχικού αέρα, ώστε η δευτερογενής παροχή θερμού αέρα χρησιμοποιείται αποκλειστικά στην καύση μέσα στην κάμινο.

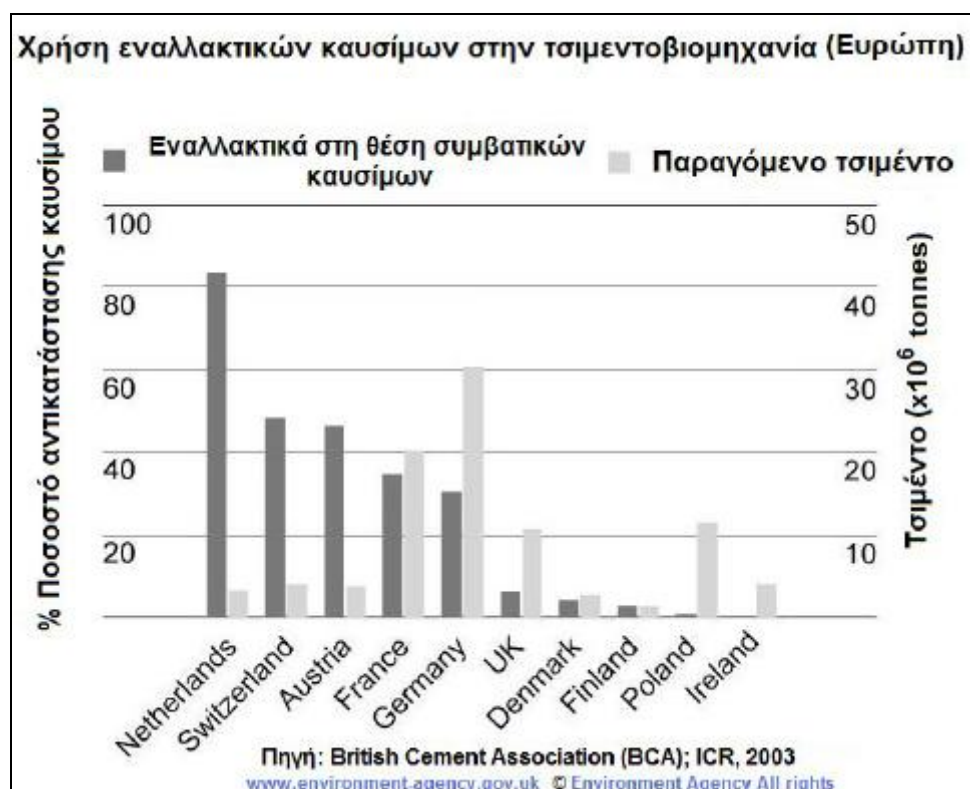
Πίνακας 3.2 Είδος και θερμογόνος δύναμη καυσίμων τσιμεντοβιομηχανίας (Τσακαλάκης, 2010).

Συμβατικά και εναλλακτικά καύσιμα τσιμεντοβιομηχανίας	Θερμογόνος δύναμη, GJ/tonne
<u>A.</u> Συμβατικά καύσιμα τσιμεντοβιομηχανίας	
• Άνθρακας (6000 kcal/kg)	25.3
• Petcoke	33.7
• Μείγμα άνθρακα-Petcoke	29.0
<u>B.</u> Εναλλακτικά καύσιμα (alternative fuels)	
1. Άχρηστα ελαστικά οχημάτων	27-31
2. Άχρηστα 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 ζωϊκά λίπη	19
6. Ρινίσματα βιομηχανίας ξύλου	13
7. Διαλύτες (οργανικοί)	24
8. Άλλα, όπως:	
• Πύς διυλιστηρίων	13
• Οργανικά κατάλοιπα διυλιστηρίων	
• Πύς βιολογικών καθαρισμών (ξηρή)	13-16

Επειδή βέβαια η θερμοκρασία που επικρατεί στη ζώνη έναυσης της καμίνου είναι υψηλότερη στην περίπτωση χρήσης φυσικού αερίου, σε σχέση με τα άλλα καύσιμα, απαιτείται κατάλληλη προσαρμογή του καυστήρα και της θέσης του στην έξοδο της καμίνου σε περίπτωση αλλαγής τύπου καυσίμου.

Πίνακας 3.3 Το είδος των καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία (Τσακαλάκης, 2010).

Είδος καυσίμου	Ποσοστό, %
Petcoke	50.5
Άνθρακες	24
Πετρέλαιο και βαρέα κλάσματα	5
Λιγνίτες και άλλα είδη στερεών καυσίμων	5.5
Φυσικό αέριο	1.0
Εναλλακτικά καύσιμα	14



Εικόνα 3.7 Ποσοστιαία % και απόλυτη κατανάλωση (x10⁶ tonnes) εναλλακτικών καυσίμων στην ευρωπαϊκή τσιμεντοβιομηχανία (Τσακαλάκης, 2010).

Εναλλακτικά καύσιμα

Τα τελευταία χρόνια, για προφανείς περιβαλλοντικούς (ανεξέλεγκτη απόθεση απορριμμάτων, εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων, μείωση εκπομπών CO₂ κ.λπ.) αλλά και για οικονομικούς λόγους, γίνεται ευρεία χρήση εναλλακτικών (μη συμβατικών) καυσίμων (alternative fuels) 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 3.2).

Το 2000 στις ΗΠΑ το 5% περίπου της απαιτούμενης ενέργειας στην παραγωγή τσιμέντου προερχόταν από την καύση απορριμμάτων. Τα χρησιμοποιούμενα ως καύσιμα απορρίμματα είναι υλικά με υψηλή θερμογόνο δύναμη (θερμικό δυναμικό), που είναι συμβατά με τις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου. Τα περισσότερα απορρίμματα που καίγονται στη βιομηχανία τσιμέντου είναι εκείνα που παράγονται από τις βιομηχανίες παραγωγής αγαθών καθημερινής χρήσης και προσφέρονται χωρίς επιβάρυνση. Τα είδη των ανακυκλώσιμων υλικών που αξιοποιούνται ως καύσιμα 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. διαλύτες και μελάνια εκτύπωσης εφημερίδων και περιοδικών,
7. διαλύτες ανακύκλωσης χαρτιού, και
8. απόβλητα γεωργικών βιομηχανιών (τσόφλια ξηρών καρπών, κουκούτσια ροδάκινων κ.λπ.).

Η καύση των άχρηστων απορριμμάτων δεν επηρεάζει ουσιαστικά την ποιότητα του τσιμέντου και ταυτόχρονα απαλλάσσει το περιβάλλον από άχρηστα και βλαβερά, όταν αυτά αποτεθούν, υλικά. Το τελικό προϊόν δεν περιέχει τοξικές οργανικές ενώσεις από την καύση των απορριμμάτων. Οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου 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 τσιμέντου.

Η υψηλή θερμοκρασία της φλόγας μέσα στην περιστροφική κάμινο (> 1870 °C) και η μεγάλη διάρκεια καύσης προκαλεί ολοκληρωτική καταστροφή των άχρηστων υλικών. Η Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (US EPA) 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 ανακυκλωμένα οργανικά απόβλητα καίγονται ως καύσιμα και τα συνοδεύοντα ανόργανα, π.χ. μεταλλική ενίσχυση ελαστικών, είτε δεσμεύονται στο κρυσταλλικό πλέγμα του τσιμέντου, είτε ανευρίσκονται στο τέλος στη σκόνη (παραπροϊόν) της περιστροφικής καμίνου, η οποία τα διαχειρίζεται 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. Αναφέρεται ότι 100 παλαιά λάστιχα αυτοκινήτων έχουν τόσο θερμικό δυναμικό, όσο η θερμογόνο δύναμη (calorific value) 1 t άνθρακα (περίπου 5000 kcal/kg άνθρακα).

Η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου 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.

Παράδειγμα για την ελληνική βιομηχανία τσιμέντου

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι αποτελεί κοινή πρακτική στην τσιμεντοβιομηχανία η χρησιμοποίηση άχρηστων ελαστικών για ανάκτηση ενέργειας, με παράλληλη προστασία του περιβάλλοντος από ενδεχόμενη απόρριψή τους.

Στην Ελλάδα κυκλοφορούν περίπου 2 εκατ. οχήματα. Αν υποθεθεί ότι αλλάζουν ελαστικά κάθε τέσσερα χρόνια σημαίνει ότι προκύπτουν περίπου 2 εκατ. άχρηστα ελαστικά ετησίως. Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η ποσότητα αυτή ελαστικών αντιστοιχεί σε $2 * 10^6 / 1000 = 20.000$ t άνθρακα. Αν επίσης υποθεθεί ότι 1 kg άνθρακα έχει θερμογόνο δύναμη 5000 kcal, τότε οι 20.000 t άνθρακα έχουν θερμογόνο δύναμη $20.000 t * (5 * 10^6 \text{ kcal} / \text{kg} \text{ άνθρακα}) = 10^{11}$ kcal.

Δεδομένου ότι από αυτή την θερμογόνο δύναμη μόνο το 50% περίπου θα μετατραπεί σε ενέργεια, θα παραχθούν $5 * 10^{10}$ kcal. Η ενέργεια αυτή ισοδυναμεί με ηλεκτρική ενέργεια 58.106.000 kWh ή 58.106 MWh. Την ενέργεια αυτή παράγει μια μονάδα ισχύος 7.33 MW ετησίως. Η ίδια ενέργεια αντιστοιχεί σε ετήσια οικιακή κατανάλωση (300 kWh/μήνα) πόλης 65.000 κατοίκων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην Ελλάδα (1997) παράγονταν 14.8 εκατ. t τσιμέντου ετησίως και η μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου 100 kWh/t τσιμέντου. Η απαιτούμενη συνολική ηλεκτρική ενέργεια ανερχόταν σε $14.8 * 10^8$ kWh ετησίως. Η ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί από 2 εκατ. ελαστικά είναι (%): $(58.106 * 10^6 / 14.8 * 10^8) * 100 = 3.93\%$.

Το ενεργειακό (οικονομικό) όφελος είναι λοιπόν σημαντικό. Βεβαίως, στους παραπάνω υπολογισμούς δεν έχει ληφθεί υπόψη το κόστος συλλογής και μεταφοράς των άχρηστων ελαστικών στις μονάδες παραγωγής τσιμέντου, που υπερκαλύπτεται όμως από το τεράστιο περιβαλλοντικό όφελος, τόσο της ανεξέλεγκτης απόρριψης, όσο και της εξοικονόμηση σε πρώτες ύλες καυσίμων (π.χ. άνθρακα).

3.2.3 Βελτιστοποίηση των διεργασιών παραγωγής αδρανών υλικών

Η διαδικασία παραγωγής αδρανών υλικών περιλαμβάνει συνδυασμό μεθόδων ελάττωσης μεγέθους (πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή θραύση) και ταξινόμηση κατά μέγεθος (κοσκίνιση) σε κατάλληλα κοκκομετρικά κλάσματα. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως σχετικώς απλή, εμπεριέχει όμως παραμέτρους, που αξίζει να διερευνώνται κατά περίπτωση ώστε να καθίσταται πλέον αποδοτική και ως εκ τούτου και οικονομική. Σημαντική είναι επίσης η περιβαλλοντική διάσταση των διεργασιών παραγωγής αδρανών υλικών, όσον αφορά στο ποσοστό απόληψης χρήσιμων κλασμάτων υλικού από τη συγκεκριμένη διαδικασία.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής αδρανών υλικών, μαζί με τα εμπορεύσιμα κοκκομετρικά κλάσματα, συμπαράγεται και ένα λεπτόκοκκο κλάσμα (-5 mm), το οποίο δημιουργεί σημαντικά προβλήματα διαχείρισης (εμπορευσιμότητα, απόθεση κλπ.). Το υλικό αυτό επιβαρύνει τη διαδικασία παραγωγής τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική σκοπιά.

Όπως αναφέρει ο Καθηγητής κ. Τσακαλάκης, «επειδή τα μηχανήματα ελάττωσης μεγέθους (θραυστήρες) έχουν την ουσιαστικότερη επίπτωση στις διεργασίες παραγωγής αδρανών υλικών, γίνονται προσπάθειες διερεύνησης της επίδρασης διαφόρων τύπων θραυστήρων στην ποσοστιαία (% κατά βάρος) κατανομή των παραγόμενων προϊόντων με στόχο τη μείωση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού (-5 mm)». Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4, **το ποσοστό του λεπτόκοκκου (-5 mm) υλικού αυξάνει από την πρωτογενή στη δευτερογενή και στα επόμενα στάδια θραύσης και εξαρτάται σημαντικά από το στάδιο θραύσης, τον τύπο μηχανήματος και τον τύπο του πετρώματος**. Επίσης, το ποσοστό του υλικού αυτού στο προϊόν της **πρωτογενούς θραύσης** εξαρτάται σημαντικά από τη διαδικασία ανατίναξης (blasting). Η εξόρυξη ενός πετρώματος χωρίς τη χρήση εκρηκτικών μπορεί να μειώσει σημαντικά (μέχρι 10- 15%) το ποσοστό των λεπτομερών που παράγονται στο στάδιο της πρωτογενούς θραύσης.

Πίνακας 3.4 Ποσοστό λεπτομερούς υλικού (-5 mm) στο προϊόν του θραυστήρα (% κατά βάρος) συναρτήσει του σταδίου θραύσης (τύπος μηχανήματος) και του τύπου του πετρώματος (Πηγή: Τσακαλάκης, 2010, από το www.goodquarry.com, 2007)

ΣΤΑΔΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	Τύπος πετρώματος	Ποσοστό λεπτομερών (-5 mm) στο προϊόν του θραυστήρα (% κατά βάρος)
Πρωτογενής, Primary	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εκρηξιγενή + Μεταμορφωμένα (Igneous + metamorphic) 2. Ασβεστολιθικό (Limestone) 3. Χαλαζιτικό (Sandstone) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 3 - 6% (Σιαγονωτός) έως 10 - 15% (Γυροσκοπικός) 2. 6 - 7% (Σιαγονωτός) έως 20% (Κρουστικός) 3. 1 - 2% (Σιαγονωτός) έως 15 - 20% (Σιαγονωτός & Γυροσκοπικός)
Δευτερογενής, Secondary	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εκρηξιγενή + Μεταμορφωμένα (Igneous + metamorphic) 2. Ασβεστολιθικό (Limestone) 3. Χαλαζιτικό (Sandstone) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 0 - 23% (Κωνικός) 2. 15 - 25% (Κωνικός) έως <30% (Κρουστικός) 3. 10 - 15% (Κωνικός)
Τριτογενής κ.ο.κ., Tertiary	<ol style="list-style-type: none"> 1. Εκρηξιγενή + Μεταμορφωμένα (Igneous + metamorphic) 2. Ασβεστολιθικό (Limestone) 3. Χαλαζιτικό (Sandstone) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 5 - 30% (Κωνικός) έως 40% (Κρουστικός) 2. <20% (Κρουστικός) έως 40% (Σφυρόμυλος) 3. ~15% (Κωνικός) έως 40% (Κρουστικός)

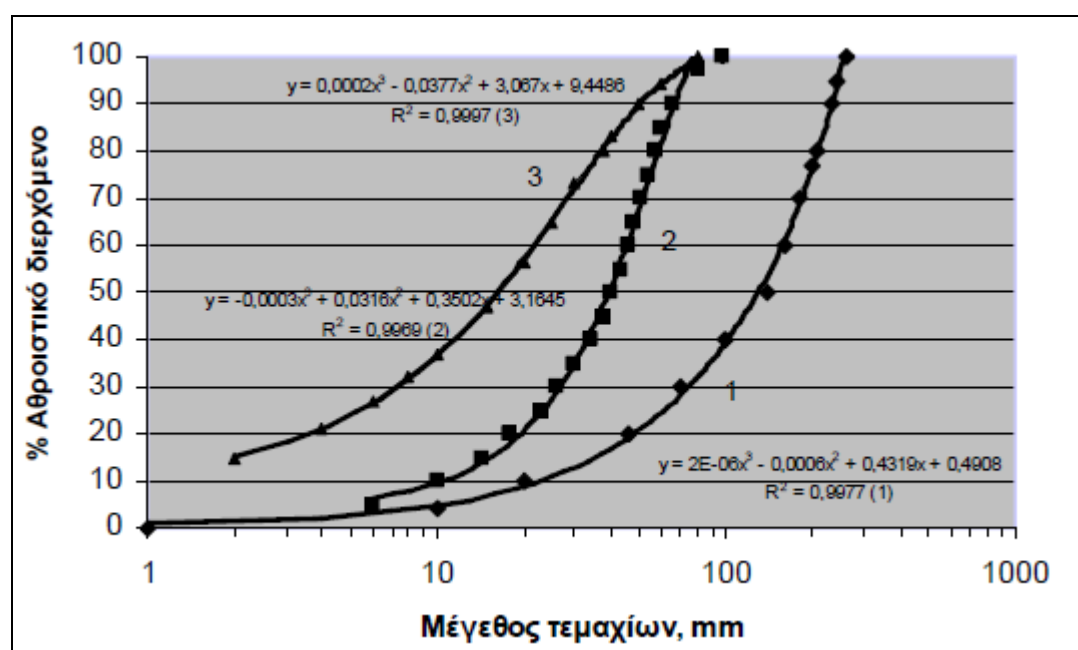
Σύμφωνα με τον κ. Τσακαλάκη, εξετάστηκε η παραγωγή αδρανών υλικών από τη διαδικασία ελάττωσης μεγέθους ασβεστολιθικού υλικού, μέγιστου μεγέθους τεμαχίων

700mm, για την παραγωγή κατάλληλων κοκκομετρικών κλασμάτων αδρανών υλικών σκυροδέματος με εφαρμογή των παρακάτω δύο διαφορετικών μεθοδολογιών:

1. Με συνδυασμό **θραυστήρα σιαγόνων** ως πρωτογενή θραυστήρα και με χρησιμοποίηση **κωνικού θραυστήρα** για τη δευτερογενή θραύση.
2. Με συνδυασμό **θραυστήρα σιαγόνων** ως πρωτογενή θραυστήρα και με χρησιμοποίηση **κρουστικού-περιστροφικού** θραυστήρα για τη δευτερογενή θραύση.

Η δυναμικότητα της εγκατάστασης παραγωγής αδρανών υλικών είναι 440 t/h. Αυτό σημαίνει ότι, για λειτουργία της μονάδας σε δύο βάρδιες το 24ωρο (14 ώρες), η συνολική ετήσια παραγωγή (300 ημέρες λειτουργίας) είναι 1.848.000 t/χρόνο.

Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων θραύσης που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση των ισοζυγίων των διακινούμενων υλικών και το σχεδιασμό των αντίστοιχων διαγραμμάτων ροής δίνονται στην Εικόνα 3.8. Στο ίδιο Σχήμα δίνονται οι πολυωνυμικές εξισώσεις που περιγράφουν τις κοκκομετρικές αναλύσεις. Τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων των προϊόντων, για τους δύο τύπους θραυστήρων (κωνικός, κρουστικός), συναρτήσε των κλειστών ανοιγμάτων αποκένωσής τους (close side setting, c.s.s.), δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.5.



Εικόνα 3.8 Ενδεικτικές κοκκομετρικές αναλύσεις προϊόντων θραύσης (1-Θρ. Σιαγόνων, 2-Θρ. Κωνικός, 3-Θρ. Κρουστικός) (Τσακαλάκης, 2010).

Διαπιστώνεται ότι, με χρήση κωνικών θραυστήρων στη θέση των κρουστικών-περιστροφικών, το ποσοστό του επί τοις % παραγόμενου λεπτόκοκκου υλικού (≤ 5 mm) είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερο κατά τουλάχιστον 8% από αυτό που παράγεται με χρήση κρουστικών θραυστήρων. Αυτό δικαιολογείται από το σημαντικά μικρότερο λόγο κατάτμησης των κωνικών έναντι των κρουστικών θραυστήρων. Το αποτέλεσμα αυτό έχει σημαντική επίπτωση στην οικονομικότητα της διεργασίας παραγωγής, εφόσον η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε αύξηση των χρήσιμων προϊόντων κατά σε περίπου 140.000 t/χρόνο. Το αυξημένο κόστος αγοράς

του κωνικού έναντι του κρουστικού θραυστήρα αναμένεται να αποσβεστεί σε δύο έως τρία χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης θραύσης.

Πίνακας 3.5 Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων προϊόντων κατάτμησης-ταξινόμησης (Τσακαλάκης, 2010).

ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ 440 t/h	ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ ΣΙΑΓΟΝΩΤΟΣ (Άνοιγμα αποκένωσης 175 mm)				
	Α. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ (Κωνικός) c.s.s.: 22, 25 και 38 mm			Β. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΘΡΑΥΣΤΗΡΑΣ (Κρουστικός) c.s.s.: 50 και 60 mm	
Παραγόμενα κοκκομετρικά κλάσματα, Ποσοστό % κατά βάρος	Άνοιγμα 22 mm	Άνοιγμα 25 mm	Άνοιγμα 38 mm	Άνοιγμα 50 mm	Άνοιγμα 60 mm
-38+20 mm	31.5	40.1	56	30.9	35
-20+10 mm	36	30.6	23.5	24.9	25.4
-10+5 mm	15.7	13.6	10.5	16.2	15.6
-5 mm	16.8	15.7	10	28.0	24.0
ΣΥΝΟΛΟ	100	100	100	100	100
c.s.s. (close side setting): κλειστό άνοιγμα αποκένωσης θραυστήρα					

«Αν ληφθεί υπόψη το σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος από την παραγωγή συμπληρωματικού χρήσιμου υλικού, από τη μείωση της εξορυσσόμενης ποσότητας ασβεστολιθικού υλικού και από τη μειωμένη επιφάνεια απόθεσης του λεπτόκοκκου υλικού», όπως καταλήγει ο κ. Τσακαλάκης, «γίνεται ακόμη περισσότερο φανερό το όφελος από τη χρήση κωνικών έναντι των κρουστικών θραυστήρων στη διαδικασία παραγωγής αδρανών υλικών. Αυτό, επιβεβαιώνει τις διαπιστώσεις των Mitchell και Benn (2007), οι οποίοι χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση των κυκλωμάτων παραγωγής αδρανών υλικών».

3.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ – ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.3.1 Γενικά

Η οικολογία και η ανακύκλωση στις μέρες μας προκύπτει όχι σαν μόδα, αλλά σαν πραγματική ανάγκη, καθώς η σχέση μας με το περιβάλλον και η προστασία του, η διατήρηση των ταχύτατα μειούμενων φυσικών πόρων και η ανάγκη να αναγνωρίσουμε τις υποχρεώσεις μας προς τις μελλοντικές γενιές αποτελούν την ουσία μιας πραγματικά αειφόρου ανάπτυξης.

Στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης, μια εναλλακτική λύση τόσο για τους φυσικούς πόρους, όσο και για τους χώρους εναπόθεσης των δομικών απορριμμάτων είναι η χρησιμοποίηση του σκυροδέματος, που προκύπτει από οικοδομικά απορρίμματα και κατεδαφίσεις. Αυτό το «απόβλητο» σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αδρανές και επομένως, το σκυρόδεμα με τέτοια ανακυκλωμένα αδρανή αποτελεί υλικό φιλικό προς το περιβάλλον. Στο εξωτερικό, θραυσμένο σκυρόδεμα από κατεδαφίσεις χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο των φυσικών αδρανών εξοικονομώντας έτσι πρώτες ύλες αλλά και ενέργεια. Στην Ελλάδα η ανακύκλωση

σκυροδέματος είναι σε ερευνητικό στάδιο. Στη συνέχεια αναλύονται και σχετικά ερευνητικά αποτελέσματα από το Α.Π.Θ.

Τα ανακυκλωμένα αδρανή που προέρχονται από κατεδαφίσεις, συνήθως δεν είναι καθαρά, αφού περιέχουν άλατα, κεραμικά, άμμο, σκόνη, ξυλεία, πλαστικά, κλπ. Αν επιπλέον, λαμβάνονται από ένα κέντρο ανακύκλωσης, συλλέγονται από διάφορα κτίρια με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν ανομοιογένεια και ασταθείς και με μεγάλες διαφοροποιήσεις ιδιότητες. Αυτό δυσκολεύει τη χρήση τους στην παραγωγή ενός νέου σκυροδέματος. Αντίθετα, τα ανακυκλωμένα που προέρχονται από βιομηχανίες, είναι σχετικά καθαρά με προσκολλημένα σε αυτά μόνο το παλιό τσιμέντο και αφού προέρχονται από τον ίδιο τύπο σκυροδέματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια, δηλ. λιγότερο διαφοροποιημένες και περισσότερο σταθερές ιδιότητες.

Έχει δε γίνει αρκετή πειραματική έρευνα στο παρελθόν για τον σχεδιασμό των μιγμάτων και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους, αλλά η ανθεκτικότητά τους και, κυρίως, η υδατοπερατότητα, η υδατοαπορροφητικότητα, η ενανθράκωση, η συστολή ξήρανσης, καθώς και η αντοχή σε ψύξη - απόψυξη έχουν μελετηθεί πολύ λίγο. Και όσον αφορά στην αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχουν ελάχιστες εργασίες.

Το τσιμέντο και το σκυρόδεμα δεν ανακυκλώνονται εύκολα, είναι δυνατή όμως η επεξεργασία και η επαναχρησιμοποίησή τους ως ανακυκλωμένα αδρανή υλικά σε έργα υποδομής όπως π.χ. στη διαμόρφωση οριζόντιων επιφανειών και υλικών οδοποιίας και σπανιότερα σε άλλα έργα, όπως σε χώρους στάθμευσης θριμματισμένο τσιμέντο μπορεί να αντικαταστήσει σε ποσοστό 20% το αμμοχάλικο.

Επίσης, για τις προκατασκευασμένες πλάκες σκυροδέματος (Platenbau) προωθείται το σύστημα της ανακύκλωσης στοιχείων (elemental recycling) ως αποτέλεσμα ερευνητικού προγράμματος που χρησιμοποιεί αυτές τις πλάκες σε νέο τύπο κατοικιών. Αξιοποιούνται μόνο εσωτερικά πάνελα καθώς τα εξωτερικά έχουν υποστεί επεξεργασία με ένα ειδικό μονωτικό που σήμερα θεωρείται καρκινογόνο. Οι πλάκες σταθεροποιούνται μεταξύ τους με ασφάλινες λωρίδες και τα κενά σύνδεσης συμπληρώνονται με τσιμέντο. Σύμφωνα με το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα η κατασκευή ενός σπιτιού από επαναχρησιμοποιημένες πλάκες είναι κατά 30 έως 40% φθηνότερη από την κατασκευή με εξολοκλήρου καινούργια υλικά ενώ ταυτόχρονα εξοικονομούνται τα καύσιμα που χρειάζονται για τη θραύση του σκυροδέματος σε χάλικι. Δύο αρνητικά στοιχεία αυτής της επανάχρησης είναι ότι οι τοίχοι από σκυρόδεμα δεν επιτρέπουν επεμβάσεις πάνω τους εύκολα όπως π.χ. τρύπημα με καρφί ενώ το μεγάλο βάρος των πανέλων (5 τόνοι το καθένα) απαιτεί γερανό για την επανατοποθέτησή τους (Ζήρα, 2010).

Τέλος, από το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι δυνατή η εξαγωγή του οπλισμού ο οποίος μπορεί να λιώσει και να αναδιαμορφωθεί για νέες χρήσεις.

3.3.2 Συναφή ερευνητικά αποτελέσματα

Παρουσιάζονται στη συνέχεια, σχετικά ερευνητικά αποτελέσματα μελέτης της Καθηγήτριας κας Σάββα του Α.Π.Θ. (2010), στην οποία **διερευνάται η επίδραση της ομοιογένειας του σκυροδέματος προέλευσης στην εφελκυστική και θλιπτική αντοχή** στους 20°C μέχρι την ηλικία των 6 μηνών και στη θλιπτική αντοχή μετά από θέρμανση για 2h στους 100, 300 και 550°C, **σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή**. Τα ίδια σκυροδέματα ελέγχονται και για την ανθεκτικότητά τους έναντι

χλωριόντων, όταν τα ιόντα διεισδύουν είτε από την κάτω πλευρά τους είτε μετά από κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης 28 ημερών. Τα σκυροδέματα παρασκευάστηκαν αφενός με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα, αφετέρου με ανακυκλωμένα μόνο τα χονδρόκοκκα αδρανή. Τα ανακυκλωμένα αδρανή προήλθαν ή από σκυροδέματα μιας ενιαίας ποιότητας και ηλικίας (ομοιογενή) ή από σκυροδέματα που προήλθαν από τη θραύση συμβατικών δοκιμίων διαφορετικών ηλικιών και αντοχών (ανομοιογενή).

Αναλυτικότερα, εξετάζονται σκυροδέματα παρασκευασμένα με αδρανή ανακυκλωμένα απορρίμματα βιομηχανίας έτοιμου σκυροδέματος και μελετάται η επίδραση της ομοιογένειας και της αντοχής του σκυροδέματος προέλευσης. Εξαιτίας της ευρείας διακύμανσης στις ιδιότητες των διαθέσιμων πόρων ερευνώνται οι ιδιότητες τοπικών υλικών. Η ομοιογένεια του αρχικού σκυροδέματος βρέθηκε ότι επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο τις εξεταζόμενες ιδιότητες.

Στους Πίνακες 3.6 και 3.7 συνοψίζονται οι φυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων αδρανών και οι αναλογίες μίξης σκυροδέματος που εφαρμόστηκαν.

Πίνακας 3.6 Φυσικές ιδιότητες των αδρανών (Σάββα, 2010).

Είδος αδρανών	Ομοιογενής προέλευση						Ανομοιογενής προέλευση					
	Φαινόμενο βάρος (kg/m ³)			Απορροφητικότητα (%)			Φαινόμενο βάρος (kg/m ³)			Υγρασία (%)		
	Άμμος	Γαρυμπίλα	Σκύρα	Άμμος	Γαρυμπίλα	Σκύρα	Άμμος	Γαρυμπίλα	Σκύρα	Άμμος	Γαρυμπίλα	Σκύρα
C12/15	2,03	2,36	2,35	7,40	7,37	6,77	2,2	2,38	2,44	1,060	1,030	1,010
C16/20	2,33	2,35	2,36	4,17	3,08	3,21	2,2	2,44	2,42	1,063	1,024	1,015
C20/25	2,20	2,22	2,23	8,50	7,97	8,31	2,2	2,42	2,47	1,069	1,026	1,020
Συνήθη	2,64	2,65	2,64	2,55	1,90	1,70	2,63	2,6	2,65	1,036	1,01	1,00

Πίνακας 3.7 Αναλογίες μίξης σκυροδεμάτων (Σάββα, 2010).

Μείγματα	Είδος αδρανών	C (kg/m ³)	W	Συνήθη Αδρανή (%)			Ανακυκλωμένα (%)		
				Άμμος	Γαρυμπ	Σκύρα	Άμμος	Γαρυμπ	Σκύρα
Ομοιογενής Προέλευση									
100%	C12/15	330	198				54	8	38
	C16/20						54	8	38
	C20/25						54	8	38
50%	C12/15			54				8	38
	C16/20			54				8	38
	C20/25			54				8	38
0%	Συμβατικά			54	8	38			
Ανομοιογενής προέλευση									
100%	C12/15	330	198				50	9	41
	C16/20						50	9	41
	C20/25						50	9	41
50%	C12/15			50				9	41
	C16/20			50				9	41
	C20/25			50				9	41
0%	Συμβατικά			50	9	41			

Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη

- Τα μίγματα με ανομοιογενή προέλευση έχουν κατά κανόνα μεγαλύτερες εφελκυστικές αντοχές ακόμη και από το συμβατικό σκυρόδεμα (ακόμα και διπλάσιες).
- Όσο μεγαλύτερη είναι η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εφελκυστική αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων, ανεξαρτήτως του ποσοστού αντικατάστασης ή της ομοιογένειας των αδρανών.
- Η αύξηση του ποσοστού ανακυκλωμένων αδρανών αυξάνει την εφελκυστική αντοχή των σκυροδεμάτων με ομοιογενή αδρανή, ενώ τη μειώνει, όταν τα αδρανή είναι ανομοιογενή.

Τα αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή συνοψίζονται στον Πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8 Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη, θλιπτική αντοχή και f_{ck} των μιγμάτων (Σάββα, 2010).

Ηλικία (ημέρες)	Ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών							
	100%			50%			0%	
	f_{ck} σκυροδέματος προέλευσης							
	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25		
Ομοιογενής προέλευση								
f_{ck} μιγμάτων								
28	C20/25	C20/25	C20/25	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30	
Εφελκυστική αντοχή (MPa)								
28	1,8	2,1	2,1	1,4	2,1	2,0	2,8	
180	2,1	2,5	2,7	1,8	3,3	2,6	3,1	
Θλιπτική αντοχή (MPa)								
7	18,7	23,1	19,7	22,0	21,0	25,4	20,4	
28	31,8	29,3	21,8	26,2	26,3	29,6	23,1	
90	34,8	34,0	27,4	38,7	38,8	34,4	34,6	
180	35,9	36,6	30,0	42,1	42,7	37,4	34,8	
Ανομοιογενής προέλευση								
f_{ck} μιγμάτων								
	C25/30	C20/25	C25/30	C16/20	C30/37	C25/30	C25/30	
Εφελκυστική αντοχή (MPa)								
28	2,1	2,3	2,4	2,1	2,6	3,2	1,6	
180	2,4	2,7	2,5	2,5	3,3	3,3	2,4	
Θλιπτική αντοχή (MPa)								
7	25,7	22,4	20,2	26,4	32,8	16,7	22,9	
28	29,1	26,8	24,8	30,6	35,2	20,2	27,2	
90	30,3	34,3	30,4	34,8	37,7	28,6	35,0	
180	30,9	35,2	32,1	34,9	38,9	30,6	38,4	

Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή (f_{ck})

- Η χαρακτηριστική αντοχή όλων των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική αντοχή των σκυροδεμάτων από τα οποία προήλθαν.
- Στα σκυροδέματα με αδρανή ομοιογενούς προέλευσης η χαρακτηριστική αντοχή είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτήν του αντίστοιχου συμβατικού, όταν το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 100% και ίδια με αυτή του συμβατικού, όταν το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 50%.
- Στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα με αδρανή ανομοιογενούς προέλευσης, η χαρακτηριστική αντοχή στα περισσότερα μίγματα είναι ίση ή μεγαλύτερη του συμβατικού.

Τα αποτελέσματα για την θλιπτική αντοχή συνοψίζονται στον Πίνακα 3.8.

Θλιπτική αντοχή f_c

- Τα μίγματα με ομοιογενή προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών μετά τις 28 ημέρες έχουν κατά κανόνα αντοχές μεγαλύτερες από αυτές των μιγμάτων με ανομοιογενή προέλευση.
- Η μείωση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών από 100% σε 50% αυξάνει τις θλιπτικές αντοχές των περισσότερων μιγμάτων.

Τα παραπάνω συμπεράσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3.9.

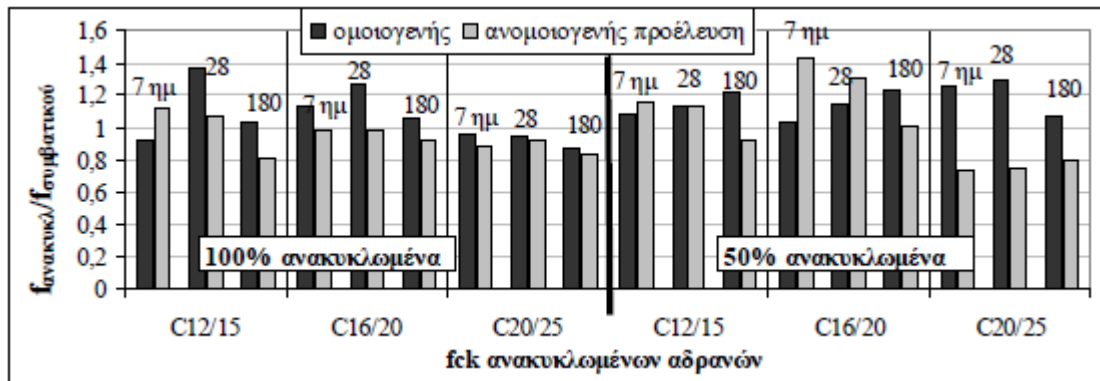
Πίνακας 3.9 Λόγοι θλιπτικών αντοχών των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων προς τις αντοχές των συμβατικών (Σάββα, 2010).

$f_{\text{ανακυκλωμένων}} / f_{\text{συμβατικού}}$												
Ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών												
100%			50%			100%			50%			
f_{ck} σκυροδέματος προέλευσης												
Ηλικία (ημέρες)	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25
	Ομοιογενής προέλευση						Ανομοιογενής προέλευση					
7	0,92	1,13	0,97	1,08	1,03	1,25	1,12	0,98	0,88	1,15	1,43	0,73
28	1,37	1,27	0,94	1,14	1,14	1,28	1,07	0,99	0,91	1,13	1,29	0,74
90	1,01	0,98	0,79	1,12	1,12	0,99	0,87	0,98	0,87	1,00	1,08	0,82
180	1,03	1,05	0,86	1,21	1,23	1,07	0,80	0,92	0,84	0,91	1,01	0,80

Όταν η προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών είναι ομοιογενής, σχεδόν όλα τα μίγματα παρουσιάζουν αντοχές υψηλότερες (από 1 έως 37%) του συμβατικού με εξαίρεση το μίγμα με 100% ανακυκλωμένο C20/25, του οποίου οι αντοχές είναι μικρότερες (από 3 έως 21%) του συμβατικού (Εικόνα 3.9).

Για ανομοιογενή προέλευση των αδρανών και μετά τις 28 ημέρες σχεδόν όλα τα μίγματα παρουσιάζουν αντοχές μικρότερες του συμβατικού (Εικόνα 3.9).

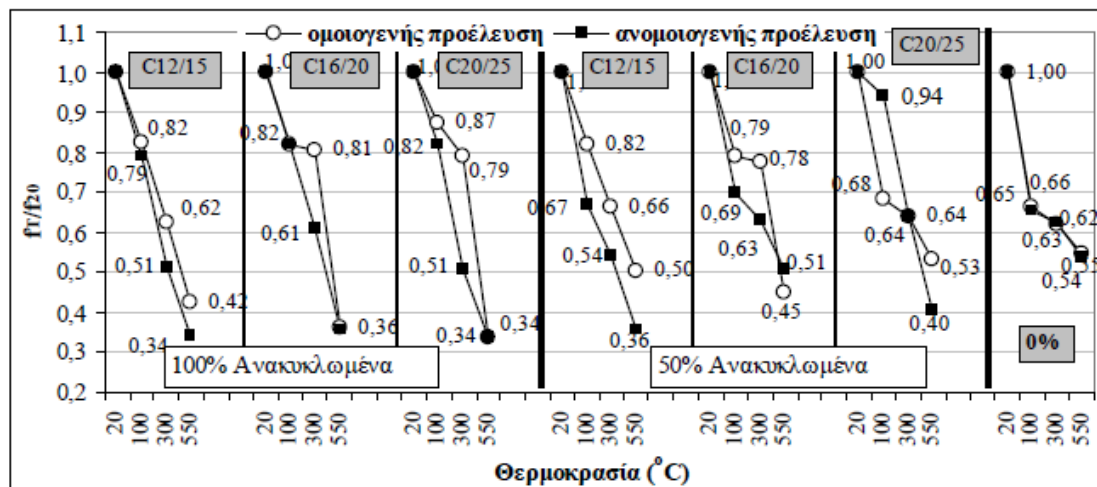
Αναλυτικότερα, όταν η προέλευση των αδρανών είναι ανομοιογενής και το ποσοστό ανακύκλωσης 100%, όλα τα ανακυκλωμένα μίγματα παρουσιάζουν αντοχές μικρότερες του συμβατικού (1-20%). Η μείωση των ομοιογενών ανακυκλωμένων αδρανών σε 50% ευνοεί τα μείγματα C12/15 και C16/20, που παρουσιάζουν αντοχές μεγαλύτερες του συμβατικού, μέχρι τις 90 ημέρες το πρώτο (έως 15%) και σε όλες τις ηλικίες το δεύτερο (έως 43%), αλλά αυξάνει τις διαφορές του μείγματος C20/25 με το συμβατικό σκυρόδεμα (αντοχές κατά 20-27% μικρότερες).



Εικόνα 3.9 Θλιπτική αντοχή σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή προς την αντοχή των συμβατικών σκυροδεμάτων (Σάββα, 2010).

Υψηλές θερμοκρασίες

Τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, ανεξαρτήτως προέλευσης ή ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών τους, στους 100°C παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες από αυτές του συμβατικού, ενώ στους 550°C μεγαλύτερες. Στους 300°C, σκυροδέματα με ομοιογενή προέλευση ανακυκλωμένων αδρανών είναι ανθεκτικότερα του συμβατικού, αντίθετα, όταν τα αδρανή έχουν ανομοιογενή προέλευση παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες από ότι το συμβατικό σκυρόδεμα. Στην Εικόνα 3.10 δίνονται οι εναπομένουσες αντοχές των σκυροδεμάτων (μέσος όρος 3 τιμών), μετά από πύρωση 2 ωρών στους 100, 300 και 550 °C (μέγιστη τιμή).



Εικόνα 3.10 Εναπομένουσα αντοχή των μιγμάτων μετά από πύρωση για 2h στους 100°C, 300°C και 550°C (Σάββα, 2010).

Χλωριόντα και απώλεια βάρους οπλισμού

Οι λόγοι δεσμευμένων χλωριόντων προς ολικά χλωριόντα όλων των ανακυκλωμένων μιγμάτων, ανεξαρτήτως ομοιογένειας ή ποσοστού ανακύκλωσης, είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτούς του συμβατικού στη συντήρηση με κύκλους και σε πολύ υψηλά επίπεδα στην πλευρική είσοδο.

Δυσμενέστερη για τα ολικώς ανακυκλωμένα μίγματα είναι η πλευρική είσοδος των χλωριόντων, ενώ για τα μίγματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή ή για τα συμβατικά σκυροδέματα δυσμενέστερη είναι η συντήρηση με κύκλους διαβροχής (παλίρροιες κλπ).

Αναλυτικότερα, στη συντήρηση με κύκλους τα μίγματα με ανακυκλωμένα αδρανή, ανεξαρτήτως ποσοστού, ομοιογένειας προέλευσης ή βάθους επικάλυψης παρουσιάζουν τις μικρότερες συγκεντρώσεις ολικών και ελεύθερων Cl και τις μικρότερες απώλειες οπλισμού. Στην πλευρική είσοδο των χλωριόντων τα μίγματα με 100% ανακυκλωμένα αδρανή είναι τα δυσμενέστερα. Τα σκυροδέματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή παρουσίασαν τις μικρότερες συγκεντρώσεις σε ολικά χλωριόντα, όταν τα αδρανή είναι ομοιογενή ή τις λιγότερες απώλειες οπλισμού όταν αυτά είναι ανομοιογενή.

Τέλος, η διείδυση Cl, ως απώλεια του οπλισμού, σύμφωνα με τον KTX οπλισμένου σκυροδέματος πρέπει να είναι μικρότερη από 35 mg/cm² και παρατηρείται ότι όλα τα μίγματα είναι κάτω του ορίου ανεξάρτητα συντήρησης ή βάθους. Μάλιστα, το συμβατικό σκυροδέμα είναι δυσμενέστερο των ανακυκλωμένων, ενώ τα μίγματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή είχαν τις μικρότερες απώλειες βάρους οπλισμού σε όλα τα βάθη. Δηλαδή, η μείωση του ποσοστού των ανακυκλωμένων υλικών από 100% σε 50% βελτιώνει την ανθεκτικότητα.

3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ «ΠΡΑΣΙΝΩΝ» ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΜΙΚΤΩΝ

Τα σύνθετα τσιμέντα Portland, που περιέχουν διάφορες συνδετικές ή πληρωτικές ουσίες, είναι ευρέως διαδεδομένα και στις περισσότερες χώρες η παραγωγή τους υπερβαίνει σημαντικά την παραγωγή κοινών τσιμέντων Portland. Επιπλέον, η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου στρέφεται ολοένα και περισσότερο προς υλικά που αποτελούν παραπροϊόντα άλλων βιομηχανιών και τα χρησιμοποιεί υπό το πρίσμα μίας ορθής περιβαλλοντικά διαχείρισης σε συνάρτηση με ένα αξιοποιήσιμο τεχνολογικά αλλά και αναβαθμισμένο ποιοτικά προϊόν. Ταυτόχρονα μειώνεται η χρήση κλίνκερ το οποίο είναι, λόγω του τρόπου παραγωγής του, ένα αναβαθμισμένο ενεργειακά προϊόν και συνεπώς αρκετά ακριβό. Επίσης, η χρήση σύνθετων τσιμέντων είναι μια περιβαλλοντικά ορθή επιλογή γιατί μειώνει τη χρήση του κλίνκερ, του οποίου η παραγωγή έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή CO₂ (επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου). Συνεπώς, το όφελος από τη χρήση σύνθετων τσιμέντων έναντι της χρήσης κοινού τσιμέντου Portland είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Οι υποθαλάσσιες και σε μεγάλο βάθος κατασκευές, τα λιμενικά έργα, οι γέφυρες μεγάλου μήκους και ανοίγματος, οι πίστες αεροδρομίων, οι σήραγγες και πολλές άλλες χρήσεις έχουν ειδικές απαιτήσεις τόσο στις βασικές ιδιότητες (χρόνος πήξης, αντοχές, θερμότητα ενυδάτωσης κλπ) όσο και σε άλλες εξειδικευμένες ιδιότητες, όπως η ανθεκτικότητα στην επίδραση ειδικών συνθηκών του περιβάλλοντος κ.α. Για

όλες τις παραπάνω περιπτώσεις αναπτύχθηκαν τα διμερή μίγματα που αποτελούν τα σύνθετα τσιμέντα, ενώ λόγω των αναγκών της ανάπτυξης ειδικών έργων Πολιτικού Μηχανικού η έρευνα οδηγήθηκε στην εισαγωγή και τρίτου ή περισσότερων συστατικών (Μοροπούλου, 2009).

Στη συνέχεια συνοψίζονται ερευνητικά αποτελέσματα που αφορούν την επίδραση των πληρωτικών και των συνδετικών υλικών στην εργασιμότητα, τις μηχανικές ιδιότητες, τη διάρκεια ζωής και την αντοχή του σκυροδέματος, λόγω των αλλαγών στην εσωτερική δομή του.

3.4.1 Η επίδραση των πληρωτικών υλικών στο σκυρόδεμα

Η επίδραση των πληρωτικών υλικών στην εργασιμότητα

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση διαφόρων ερευνητικών αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι **η χρήση πληρωτικών ή συνδετικών ουσιών γενικά μειώνει τις απαιτήσεις σε νερό και βελτιώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος**. Ειδικά η προσθήκη λεπτόκοκκων σωματιδίων για το γέμισμα των κενών βελτιώνει την πυκνότητα (packing density) και συμβάλλει σημαντικά στην διασωματιδική τριβή (interparticle friction) του μίγματος. Έτσι, το μίγμα αποκτά δύναμη και δυσκαμψία που είναι καλό για τις ιδιότητές του σε σκληρυμένη μορφή, όμως κάποιιοι ερευνητές επισημαίνουν ότι σε κάποιες περιπτώσεις ίσως παρουσιαστεί πρόβλημα στο εργάσιμο. Δηλαδή, εάν δεν υπάρχει επαρκής τσιμεντόπαστα, τα πληρωτικά υλικά γεμίζουν μόνο τα κενά μεταξύ μεγάλων σωματιδίων και αυξάνεται η διασωματιδική τριβή, μειώνοντας την εργασιμότητα. Η έρευνα συνεχίζεται και οι μηχανικοί – ερευνητές προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν την πυκνότητα πακεταρίσματος και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του σκυροδέματος.

Η εργασιμότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται από την ύπαρξη λεπτών σωματιδίων στο μίγμα και μπορεί να προσδιοριστεί με πολλές διαφορετικές μεθόδους. Ανάλογα με τη μέθοδο δύνανται να χρησιμοποιηθούν διάφορες ιδιότητες για την περιγραφή της εργασιμότητας, όπως η απόδοση stress, το πλαστικό ιξώδες, κ.λπ. Εδώ επιχειρείται η περιληπτική αναφορά των γενικότερων επιδράσεων και θεωριών στην εργασιμότητα του σκυροδέματος σε σχέση με τη χρήση των fillers.

Κυρίως δύο θεωρίες υιοθετούνται για την πρόβλεψη της εργασιμότητας του μίγματος του σκυροδέματος, η θεωρία της ζώνης του νερού (water layer theory) και η θεωρία πακεταρίσματος των σωματιδίων (particle packing theory).

1. Η πρώτη θεωρία υποθέτει ότι οι απαιτήσεις του μίγματος σε νερό εξαρτώνται από την έκταση της επιφάνειας των σωματιδίων στο μίγμα. Αυξάνοντας την επιφάνεια με την προσθήκη λεπτών σωματιδίων, αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε νερό (Εικόνα 3.11).
2. Όμως από αρκετούς ερευνητές έχει αποδειχτεί ότι οι απαιτήσεις σε νερό δεν είναι συνάρτηση μόνο της επιφάνειας των σωματιδίων, όπως υποστηρίζει η θεωρία της ζώνης του νερού και ότι η πυκνότητα μιας πούδρας ή ενός μίγματος είναι βασική σχεδιαστική παράμετρος για το σχεδιασμό οικολογικού σκυροδέματος. Έτσι, η δεύτερη θεωρία υποθέτει ότι η προσθήκη λεπτών σωματιδίων σε μια υπάρχουσα δομή αδρανών συμβάλλει στη συμπλήρωση των κενών αφήνοντας μόνο ένα ελάχιστο χώρο για το νερό (Εικόνα 3.11) και έτσι ελαττώνεται η απαίτηση σε νερό. Παράλληλα, διατηρούνται ή

βελτιώνονται οι ιδιότητες του σκυροδέματος με την προσθήκη νέων υλικών πλήρωσης.

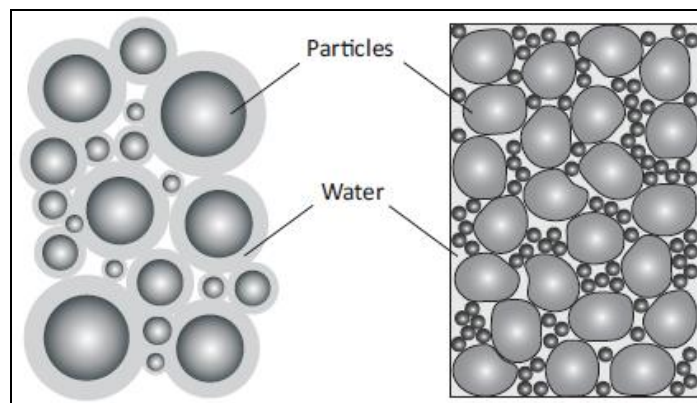
Η θεωρία πακεταρίσματος αφορά γενικότερα την τοποθέτηση αντικειμένων με κάποιο τρόπο μέσα σε ένα σχήμα ή στερεό (ανάλογα εάν αφορά το επίπεδο ή το χώρο) και απαντάει στο ερώτημα ποιος είναι ο μέγιστος αριθμός αντικείμενων με τα οποία μπορεί να γεμίσει ένα δεδομένο στερεό (Εικόνα 3.12). Αναλυτικότερα, στην περίπτωση της σωματιδιακής δομής, ο όρος **particle packing** περιγράφει σε ποιο βαθμό πληρώνεται μια μονάδα όγκου από σωματίδια και συνήθως μετράται ως **πυκνότητα πακεταρίσματος (packing density) α** , η οποία είναι ο λόγος του συμπαγούς όγκου σωματιδίων V_p προς τον όγκο που καταλαμβάνουν τα σωματίδια V_b (Εξ. 1).

$$\alpha = \frac{V_p}{V_b} = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_p} \quad (\text{Εξ. 1})$$

Το **particle packing** αφορά δηλαδή την επιλογή σωματιδίων κατάλληλου μεγέθους και ποσότητας, τα οποία θα πρέπει να επιλεγούν για να γεμίσουν τα κενά μεταξύ μεγάλων σωματιδίων. Ο **όγκος των κενών ή πορώδες** των αδρανών είναι ο όγκος των κενών μεταξύ των σωματιδίων προς τον όγκο που καταλαμβάνουν τα σωματίδια αυτά. Ο όγκος των κενών ανάμεσα στα αδρανή πληρώνεται με τσιμέντο και νερό. Το πορώδες προκύπτει από την packing density σύμφωνα με την Εξ. 2:

$$\varepsilon = 1 - \alpha \quad (\text{Εξ. 2})$$

Επομένως, η **packing density** του σκυροδέματος είναι **σημαντική από οικολογικής πλευράς** διότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μικρότερο είναι το πορώδες και τόσο μικρότερες είναι οι ποσότητες απαιτούμενης τσιμεντόπαστας και οι απαιτήσεις σε νερό (διατηρείται σταθερός ο λόγος νερού/τσιμέντου). Στο σκυρόδεμα η packing density κυμαίνεται από 0.55 έως 0.80.



Εικόνα 3.11 Η θεωρία της ζώνης του νερού (αριστερά) με ζώνη νερού να περιβάλλει κάθε σωματίδιο και η θεωρία πακεταρίσματος (δεξιά) σύμφωνα με την οποία το νερό γεμίζει τα κενά ανάμεσα στα σωματίδια (Fennis, 2011).

Υπάρχουν μοντέλα που υποστηρίζουν και τις δύο αυτές θεωρίες, αν και φαίνονται αντικρουόμενες. Το γεγονός ότι και οι δύο θεωρίες υποστηρίζονται ακόμη, ενδεχομένως εξηγείται από τις διαφορές ανάμεσα στα διάφορα είδη πληρωτικών υλικών, τα διαφορετικά μεγέθη των υλικών ή/και τη χρήση υπερρυστοποιητικών σε ερευνητικά projects σε όλον τον κόσμο. Η ιδιότητα π.χ. των λεπτομερών στρογγυλεμένων σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας να βελτιώνει την εργασιμότητα, δεν τίθεται υπό αμφισβήτηση από κανέναν ερευνητή και αυτό το φαινόμενο υποστηρίζεται τόσο από την θεωρία πακεταρίσματος σωματιδίων για την αυξημένη πυκνότητα πακεταρίσματος, όσο και από τη θεωρία της στρώσης νερού για την ειδική επιφάνεια των σφαιρών. Τα μοντέλα αυτά συνήθως στηρίζονται σε ένα σύστημα στο οποίο το νερό γεμίζει τα κενά μεταξύ των σωματιδίων και πλεόνασμα νερού περιβάλλει τα σωματίδια σαν ένα στρώμα. Τα μοντέλα που υποστηρίζουν τη θεωρία πακεταρίσματος σωματιδίων προαναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 1.1.



Εικόνα 3.12 Τρισδιάστατη προσομοίωση πλήρωσης όγκου με 30% [m^3/m^3] σφαίρες διαμέτρου 4 mm και 70% [m^3/m^3] σφαίρες των 10 mm (Fennis, 2011).

Στη συνέχεια, αναφέρονται μερικά ερευνητικά αποτελέσματα σε σχέση με την επίδραση πληρωτικών ουσιών στην εργασιμότητα:

Όπως αναφέρει η Fennis (2011), σε βιβλιογραφική ανασκόπηση της σχετικής έρευνας στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής, ο Kronlöf (1997) υποστήριξε ότι η εργασιμότητα του σκυροδέματος που περιέχει λεπτά πληρωτικά υλικά ποικίλει σημαντικά εξαιτίας της συσσωμάτωσης - κροκκίδωσης (flocculation) των μικρών σωματιδίων. **Σε μίγματα χωρίς υπερρυστοποιητικό, τα λεπτά σωματίδια υφίστανται κροκκίδωση και δεν μπορούν να γεμίσουν κενά της ίδιας τάξης μεγέθους, το οποίο δύναται να εξηγήσει γιατί συχνά απαιτείται περισσότερο νερό (πρώτη θεωρία). Η πρώτη συνθήκη που θα πρέπει να τηρείται για την εφαρμογή της δεύτερης θεωρίας είναι η χρήση ενός υπερρυστοποιητικού για να διακόπτει την κροκκίδωση.** Ο Kronlöf επίσης θεωρεί ότι τα particle packing μοντέλα μπορούν να εκτιμήσουν τις απαιτήσεις ενός συμπαγούς μίγματος σε νερό αλλά δεν μπορούν να υπολογίσουν τον όγκο νερού που απαιτείται για τη μετατροπή ενός μίγματος από συμπαγές σε εργάσιμο. Αυτός ο επιπλέον όγκος νερού βρέθηκε ότι ποικίλλει ανάλογα με την σύνθεση του μίγματος και τις απαιτήσεις σε συνοχή και μάλιστα όσο πλησιάζει η σύνθεση του μίγματος στην υψηλότερη πυκνότητα πακεταρίσματος (particle packing density), τόσο μεγαλύτερος είναι και ο όγκος του νερού.

Επίσης, η Fennis αναφέρει ότι ο Nehdi (2000) υποστήριξε ότι **το υπερρυστοποιητικό σε συνδυασμό με την λεπτομέρεια του πληρωτικού υλικού μειώνει την απαίτηση σε νερό σύμφωνα με την θεωρία πακεταρίσματος των σωματιδίων**. Θεωρεί ότι τα πληρωτικά υλικά συμπληρώνουν την έλλειψη των λεπτών σωματιδίων στην κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του τσιμέντου, βελτιώνοντας την ρευστότητα και την σταθερότητα του φρέσκου σκυροδέματος και σε μεταγενέστερο στάδιο επιδρούν στους τριχοειδείς πόρους. Με την αύξηση της λεπτότητας του πληρωτικού υλικού, ανέφερε μια ταχεία μείωση της εργασιμότητας με την πάροδο του χρόνου για μερικούς τύπους ανθρακικού πληρωτικού υλικού. Σύμφωνα με τον ίδιο ερευνητή, αυτή η ελάττωση της εργασιμότητας πιθανόν εξαρτάται από την απόδοση του υπερρυστοποιητικού, η οποία επηρεάζεται από την μεταλλική σύνθεση του πληρωτικού υλικού. Οι Bigas και Gallias (2002) απέδειξαν **ότι εκτός της λεπτότητας των σωματιδίων, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά, το σχήμα και ιδίως η υφή επηρεάζουν τις απαιτήσεις σε νερό και κατά συνέπεια την πυκνότητα πακεταρίσματος**.

Επιπρόσθετα, **οι περισσότεροι ερευνητές που υποστηρίζουν την θεωρία πακεταρίσματος σωματιδίων, αναφέρουν την ανάγκη περίσσειας νερού ή πάστας τσιμέντου ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη εργασιμότητα**. Ο Reschke (2000) υποστήριξε ότι η πάστα τσιμέντου δεν θα πρέπει απλά να γεμίζει τα κενά μεταξύ των συσσωματωμάτων αδρανών αλλά θα πρέπει να περιβάλλει όλα τα σωματίδια με μια λεπτή στρώση πάστας ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις εργασιμότητας. Η απαιτούμενη ποσότητα πάστας για αυτή τη στρώση εξαρτάται από την ειδική επιφάνεια των σωματιδίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια των σωματιδίων, τόσο μικρότερο είναι το πάχος της περιβάλλουσας στρώσης πάστας και επίσης τόσο μεγαλύτερη είναι η διαθέσιμη επιφάνεια για δεσμό μεταξύ της δομής του τσιμέντου και συσσωματωμάτων αδρανών, σύμφωνα με τον Reschke. Επίσης, οι Kwan και Mora (2001) αναφέρουν ότι η μέγιστη δυνατή πυκνότητα πακεταρίσματος δεν εγγυάται απαραίτητα ένα εργάσιμο μίγμα σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, απέδειξαν ότι μια ιδιαίτερα πυκνή σωματιδιακή δομή που αποτελείται από πολλά λεπτομερή σωματίδια παράγει ένα σκληρό μίγμα σκυροδέματος. Σε αντίστοιχα συμπεράσματα για τη χρήση λεπτών σωματιδίων στο ασβεστοκονιάμα, κατέληξαν το 2008 οι ερευνητές Westerholm, et al. Οι ερευνητές αυτοί συμπεράναν ότι οι ρεολογικές ιδιότητες και οι απαιτήσεις σε νερό του ασβεστοκονιάματος εξαρτώνται σημαντικά από τις ιδιότητες του λεπτού αδρανούς. Η απόδοση stress και το πλαστικό ιξώδες αυξάνεται λόγω των μεγάλων ποσοτήτων λεπτόκοκκων σωματιδίων. Η επίδραση αυτή δύναται να εξαλειφθεί ή να ελαττωθεί, αυξάνοντας τον όγκο της πάστας ή του ασβεστοκονιάματος ή του σκυροδέματος ή με τη χρήση ενός αποτελεσματικού superplasticizer.

Η επίδραση των πληρωτικών υλικών στην αντοχή

Παρ'όλες τις διαφωνίες σχετικά με την επίδραση των πληρωτικών ουσιών στις απαιτήσεις σε νερό στο σκυρόδεμα, **οι περισσότεροι ερευνητές συμφωνούν ότι η προσθήκη πληρωτικών ουσιών στο τσιμέντο βελτιώνει την αντοχή**.

Οι **λόγοι αύξησης της αντοχής** του σκυροδέματος με την προσθήκη λεπτόκοκκων σωματιδίων έχουν εξεταστεί από πολλούς ερευνητές σύμφωνα με την Fennis (2011):

Οι Bornemann (2005), οι Kaufmann και Winnefeld (2002) και οι Lagerblad και Vogt (2004) υποστήριξαν ότι η προσθήκη σωματιδίων μικρότερων από τα σωματίδια του

τσιμέντου, βελτιώνουν την πρόωρη απόκτηση αντοχής. Αυτό συμβαδίζει με τη θεωρία ότι **η πρόωμη αντοχή με την προσθήκη λεπτομερών σωματιδίων αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των πόλων πυρηνοποίησης (πυρήνων) που υπάρχουν για την κατακρήμνιση των ένυδρων προϊόντων**. Επίσης, ο Reschke (2000) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της επιφάνειας του συσσωματώματος εξαιτίας της ύπαρξης αυξημένης επιφάνειας για το δεσμό δομής τσιμέντου - αδρανούς και του μειωμένου πάχους της πάστας τσιμέντου που περιβάλλει τα σωματίδια των αδρανών.

Άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι **η αύξηση της αντοχής οφείλεται στις μειωμένες απαιτήσεις σε νερό**. Όπως υποστηρίζουν οι Kaufmann και Winnefeld (2000), υψηλές αντοχές επιτεύχθηκαν λόγω μειωμένης αναλογίας νερού/τσιμέντου κατά την αξιοποίηση λεπτών σωματιδίων.

Άλλες επιδράσεις στην ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος που περιέχει λεπτά πληρωτικά υλικά, οι οποίες υπάρχουν στη βιβλιογραφία, **προέρχονται από τη δομή του συσσωματώματος και από τη χρήση υπερρυστοποιητικών**. Ο Kronlöf (1997), βασιζόμενος σε πειράματα με πολύ πλαστικά μίγματα, απέδειξε ότι η χρήση πληρωτικών ουσιών μειώνει τις απαιτήσεις σε νερό και αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος, ιδίως σε μίγματα με θραυσμένα συσσωματώματα αδρανών. Επιπλέον, ο Reschke (2002) λαμβάνει υπόψη την ποσότητα και το είδος του αδρανούς. Δηλώνει ότι η αντοχή του σκυροδέματος καθορίζεται από το περιεχόμενο σε αδρανή, τις ιδιότητες της δομής του τσιμέντου, τις ιδιότητες των αδρανών και το δεσμό μεταξύ δομής τσιμέντου και αδρανών. Γενικά, τα αδρανή έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τη δομή του τσιμέντου. Αυτό σημαίνει σύμφωνα με τον Reschke ότι όταν ελαττώνεται το περιεχόμενο τσιμέντο, αναμένεται σκυρόδεμα μεγαλύτερης αντοχής με την προϋπόθεση ότι γεμίζουν όλα τα κενά μεταξύ των αδρανών. Σε ό,τι αφορά τη χρήση υπερρυστοποιητικού, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι μόνες βιβλιογραφικές αναφορές που υπάρχουν, αφορούν την επίδραση των λεπτών σωματιδίων στην αντοχή του σκυροδέματος με χρήση υπερρυστοποιητικού, χωρίς να εξετάζονται όμως διαφορετικές ποσότητες ή τύποι υπερρυστοποιητικών. Είναι προφανές ότι μειωμένες απαιτήσεις σε νερό και αυξημένη αντοχή επιτυγχάνονται μόνο σε μίγματα με κατάλληλη διασπορά. Αντιστρόφως, ο Reschke (2000) υποστηρίζει ότι χωρίς υπερρυστοποιητικό η λεπτομέρεια του πληρωτικού υλικού δεν έχει καμία επίδραση στην αντοχή του σκυροδέματος.

Η επίδραση των πληρωτικών υλικών στις μηχανικές ιδιότητες και τη διάρκεια ζωής

Σε τσιμέντο που περιέχει πληρωτικές ή συνδετικές ουσίες, όταν μειώνεται η αναλογία νερού/τσιμέντου, αρκετοί ερευνητές έχουν αναφέρει γρήγορη ενυδάτωση, πυκνή μικροδομή και καλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα. **Δύσκολα βέβαια μπορούν να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για την επίδραση των fillers σε μηχανικές ιδιότητες**, όπως είναι η συρρίκνωση (shrinkage) ή ο ερπυσμός (creep) **και στη διάρκεια ζωής, εξαιτίας της επίδρασης της χημικής σύστασης των πληρωτικών υλικών**. Έτσι, τα ερευνητικά συμπεράσματα που παρουσιάζονται παρακάτω (Fennis, 2011) βασίζονται μόνο στο περιεχόμενο σε τσιμέντο και στην πυκνότητα πακεταρίσματος της σωματιδιακής δομής των αδρανών.

Μια δομή με ισχυρούς δεσμούς αδρανών και υψηλή packing πυκνότητα έχει βρεθεί ότι περιορίζει τα φαινόμενα συρρίκνωσης ή ερπυσμού. Επιπροσθέτως, μια

μικρότερη αναλογία νερού/τσιμέντου ελαττώνει τη συρρίκνωση εξαιτίας της μειωμένης ποσότητας εξατμιζόμενου νερού στην πάστα του τσιμέντου (Neville, 1005). Παρομοίως, οι Kwan και Mora (2001) ισχυρίζονται ότι μεγαλύτερη packing πυκνότητα οδηγεί σε μικρότερο πορώδες και έτσι απαιτείται μικρότερη ποσότητα πάστας τσιμέντου. Η θερμότητα της ενυδάτωσης και η συρρίκνωση λόγω ξήρανσης (drying shrinkage) μειώνονται, καθώς και οι δύο ποσότητες είναι περίπου ανάλογες προς τον όγκο της πάστας του τσιμέντου στο σκυρόδεμα (Kwan και Mora, 2001).

Η διάρκεια ζωής των μιγμάτων με πληρωτικές ουσίες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα και την πορώδη δομή του τσιμέντου. Καθώς αυτές οι ιδιότητες εξαρτώνται από τον τύπο των λεπτών σωματιδίων που χρησιμοποιούνται και την κατανομή μεγέθους τους, η διάρκεια ζωής του σκυροδέματος δεν είναι σαφώς καθορισμένη και έτσι θα πρέπει να εξετάζεται για κάθε μίγμα σκυροδέματος χωριστά. Η αναλογία νερού / τσιμέντου ή νερού / συνδετικής ουσίας είναι σε αυτή την περίπτωση παράμετρος κλειδί. Ο Kronlöf (1997) έδειξε ότι όταν βελτιστοποιείται η packing density με την προσθήκη εσωτερικής πληρωτικής ουσίας, ο βαθμός ενανθράκωσης (carbonation rate) είναι χαμηλότερος και η ανθεκτικότητα σε ψύξη-απόψυξη είναι υψηλότερη εξαιτίας της ελάττωσης του νερού.

3.4.2 Η επίδραση των συνδετικών ουσιών στο σκυρόδεμα

Καθώς οι συνδετικές ουσίες μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος ανάλογα με τις χημικές, ορυκτολογικές, μορφολογικές και φυσικές τους ιδιότητες, είναι δύσκολο να γίνουν γενικά σχόλια σχετικά με την επίδρασή τους αυτή. Τα binders μπορούν να θεωρηθούν ως μια ειδική κατηγορία πληρωτικού υλικού, επιδεικνύοντας φαινόμενα **filling** όπως περιγράφηκε παραπάνω, και συμπληρωματικά χημικά φαινόμενα **binding**.

Ωστόσο, στην έρευνα των συνδετικών υλικών είναι ακόμα δυσκολότερο να διαχωρίσει κανείς αυτά τα δύο φαινόμενα. Για παράδειγμα, οι Erdoğan and Türker (1998) καθώς και οι Liu και Xie (2005) διερεύνησαν τις επιδράσεις της λεπτομέρειας της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα (ως πληρωτικό υλικό), όμως ανακάλυψαν ότι η ιπτάμενη τέφρα δεν έχει τις ίδιες ιδιότητες για κάθε κλάσμα μεγέθους της (ως συνδετικό υλικό). Έτσι, τα παρακάτω αναφερόμενα συμπεράσματα ερευνών για την ιπτάμενη τέφρα θα πρέπει να ερμηνευτούν με προσοχή.

Η Fennis (2011) αναφέρει ότι η επίδραση στην εργασιμότητα - ρευστότητα (flowability), τον χρόνο ωρίμανσης, το περιεχόμενο σε μη εξατμιζόμενο νερό και την αντοχή κανονικά διαβαθμισμένης ιπτάμενης τέφρας και πολύ λεπτόκοκκης ιπτάμενης τέφρας σε πάστα και κονιάματα, έχει εξεταστεί από τους Liu και Xie (2005), οι οποίοι κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- Πολύ λεπτόκοκκη ιπτάμενη τέφρα αυξάνει ακόμα περισσότερο την εργασιμότητα, σε πάστες με χαμηλή αναλογία νερού/συνδετικής ουσίας, ακόμη και με μικρό περιεχόμενο σε ιπτάμενη τέφρα (όπως από 10%) σε σύγκριση με την κανονική ιπτάμενη τέφρα. Η τελευταία βελτιώνει την εργασιμότητα περισσότερο όταν αντικαθιστά το τσιμέντο σε ποσοστό 30%. Σε κονιάματα με 20% ή ακόμα μικρότερο ποσοστό πολύ λεπτής ή κανονικής ιπτάμενης τέφρας, το αποτέλεσμα της ιπτάμενης τέφρας στην εργασιμότητα είναι το ίδιο.

- Ο χρόνος ωρίμανσης αυξάνεται όσο μεγαλώνουν τα ποσοστά του τσιμέντου που αντικαθίστανται από ιπτάμενη τέφρα, και για τους δύο τύπους ιπτάμενης τέφρας.
- Από μετρήσεις του μη εξατμίσιμου περιεχομένου σε νερό, συμπεραίνεται ότι η λεπτομέρεια των σωματιδίων έχει ελάχιστη επίδραση στην ενυδάτωση της ιπτάμενης τέφρας. Οι υψηλότεροι ρυθμοί ενυδάτωσης την 28^η ημέρα, προκύπτουν με 20% περιεχόμενη ιπτάμενη τέφρα και για τους δύο τύπους ιπτάμενης τέφρας.
- Η αύξηση της ποσότητας της ιπτάμενης τέφρας είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή σε χαμηλή αναλογία νερού/συνδετικής ουσίας.

Επίσης η Fennis αναφέρει ότι οι Erdoğan and Türker (1998) μελέτησαν την επίδραση του μεγέθους των κόκκων στην αντοχή σε θλίψη κονιαμάτων και μάλιστα ανέφερε ότι τα κλάσματα διαφορετικού μεγέθους κόκκων πυριτικής ιπτάμενης τέφρας που χρησιμοποίησαν δεν επέδειξαν ιδιαίτερη διαφοροποίηση στη χημική και ορυκτολογική σύστασή τους. Σε μίγματα που περιέχουν 25% ιπτάμενη τέφρα και 75% τσιμέντο Portland, η αντοχή αυξήθηκε κατά 48% μετά από 2 ημέρες και έως και 91% μετά από 90 ημέρες, με χρήση λεπτομερών σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας $\leq 45\mu\text{m}$ σε σύγκριση με σωματίδια $\geq 125\mu\text{m}$. Παρόμοια αποτελέσματα για τη λεπτομέρεια της ιπτάμενης τέφρας συνάχθηκαν και από τον Slanička (1991).

3.4.3 Παραδείγματα – Εφαρμογές οικολογικού σχεδιασμού σκυροδέματος

Αυτή η ενότητα συνοψίζει έρευνες και εφαρμογές που έχουν συνεισφέρει σημαντικά στο πεδίο του σχεδιασμού οικολογικού μίγματος σκυροδέματος. Πέραν των αναφερόμενων εφαρμογών, στο εξωτερικό χρησιμοποιούνται και άλλα άχρηστα υλικά ως υποκατάστατα των φυσικών αδρανών εξοικονομώντας έτσι πρώτες ύλες αλλά και ενέργεια. Γίνονται προσπάθειες να απορροφηθούν και άλλα υλικά στις κατασκευές έτσι ώστε να αποτελέσει επί της ουσίας μία αποθήκη «άχρηστων» υλικών και να μην απαιτείται εξόρυξη ή παραγωγή νέων υλικών. Στις ΗΠΑ εφαρμόζονται ήδη δομικά στοιχεία από άχυρα για την κατασκευή ακόμα και φερόντων στοιχείων. Έχουν αξιοποιηθεί και άλλα περισσότερο ευφάνταστα υλικά όπως τα πτίλα (πούπουλα) που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή αερικού σκυροδέματος. Τέλος, έχουν χρησιμοποιηθεί ελαστικά αυτοκινήτων και άλλα απορρίμματα στην κατασκευή έργων οδοποιίας.

A) Οικολογικό σκυρόδεμα με χρήση μοντέλου πακεταρίσματος σωματιδίων

Η Fennis (2011) διερεύνησε το σχεδιασμό οικολογικού σκυροδέματος σε εργαστηριακή κλίμακα αλλά και στην πράξη, αξιοποιώντας μοντέλο πακεταρίσματος σωματιδίων. Βασική επιδίωξη της έρευνας ήταν η μείωση των εκπομπών CO₂ και η αξιοποίηση παραπροϊόντων της βιομηχανίας σκυροδέματος ή άλλων βιομηχανικών διεργασιών στην Ολλανδία, διατηρώντας ή βελτιώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Η κυκλική σχεδιαστική μέθοδος οικολογικού σκυροδέματος (Εικόνα 3.13) με τη χρήση του προαναφερθέντος μοντέλου CPM που εφάρμοσε η Fennis αποτελείται από τα εξής βήματα:

1^ο βήμα: Στο βήμα αυτό **ορίζεται η σύνθεση του μίγματος και υπολογίζεται η packing πυκνότητά του.** Ο προσδιορισμός της packing πυκνότητας γίνεται είτε σε ένα μίγμα αναφοράς είτε σε ένα μίγμα που επιλέγει ο χρήστης από μια βάση δεδομένων με διαθέσιμα υλικά. Ο χρήστης δύναται να επιλέξει ένα filler, να αντικαταστήσει τσιμέντο με filler κ.λπ.

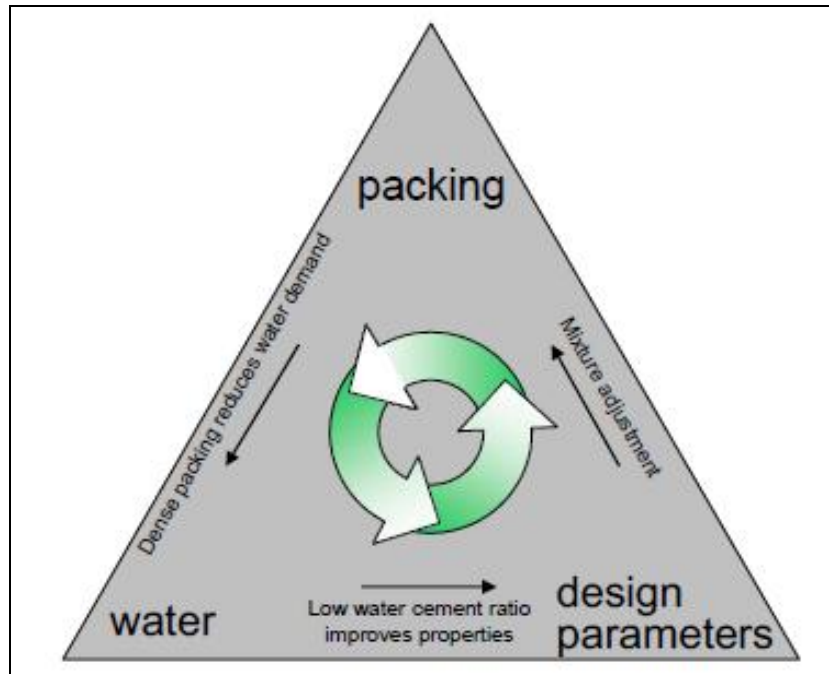
2^ο βήμα: Μετά τον υπολογισμό της packing πυκνότητας του μίγματος, σε αυτό το βήμα **προσδιορίζονται οι απαιτήσεις σε νερό και η προβλεπόμενη αντοχή του μίγματος.** Όσο μεγαλύτερη η packing πυκνότητα, τόσο μικρότερες οι απαιτήσεις σε νερό, καθώς μειώνεται το πορώδες. Βελτιώνοντας την packing πυκνότητα με σταθερό περιεχόμενο σε τσιμέντο, όχι μόνο μειώνονται οι απαιτήσεις σε νερό αλλά και έμμεσα αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος.

Η βασική αρχή για τον υπολογισμό της αντοχής είναι ότι η ποσότητα περίσσειας νερού ωθεί τα σωματίδια του τσιμέντου να απομακρυνθούν μεταξύ τους. Έτσι, όσο μεγαλύτερη η αναλογία νερού / τσιμέντου και όσο μικρότερη η packing πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων τσιμέντου, με συνέπεια μικρότερες αντοχές. Αυτό συμβαίνει επειδή τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου χρειάζεται να γεφυρώσουν μεγαλύτερη απόσταση. Η απόσταση αυτή ανάμεσα στα σωματίδια του τσιμέντου ορίζεται από την Fennis ως cement spacing factor και εξαρτάται από τη μέγιστη packing πυκνότητα, την ποσότητα νερού και τον όγκο που καταλαμβάνουν τα σωματίδια του τσιμέντου. Από αυτή την απόσταση υπολογίζει το μοντέλο την τιμή της αντοχής σε θλίψη του μίγματος.

3^ο βήμα: Σε αυτό το βήμα λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις του χρήστη για τη σύνθεση του μίγματος. Η καθοριστική σχεδιαστική παράμετρος είναι η επιθυμητή τιμή αντοχής του σκυροδέματος. **Εάν η υπολογιζόμενη από το 2^ο βήμα τιμή της αντοχής είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή, ο χρήστης μπορεί να την ελαττώσει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με διαφορετική σύνθεση του μίγματος.** Επιπλέον απαιτήσεις του χρήστη που αφορούν μέγιστη αναλογία νερού / τσιμέντου, αναλογία τσιμέντου / binder, ποσότητα λεπτής σκόνης (powder) κ.λπ. και οι οποίες ενδέχεται να διαφέρουν από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τα διάφορα πρότυπα, μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτό το βήμα. Έτσι αλλάζει η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και η packing πυκνότητα και η κυκλική σχεδιαστική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για το οικολογικό σκυρόδεμα, οι **επιπλέον απαιτήσεις του 3^{ου} βήματος μπορεί να είναι η μέγιστη ποσότητα συμβατικού τσιμέντου, η ελάχιστη ποσότητα οικολογικότερου τσιμέντου, η ελάχιστη ποσότητα ανακυκλωμένων αδρανών ή ακόμα και οι ελάχιστες εκπομπές CO₂** (με ενσωμάτωση και άλλων μοντέλων).

Με την προαναφερθείσα κυκλική σχεδιαστική μέθοδο σχεδίασε μια σειρά από διαφορετικά μίγματα δεδομένης αντοχής (C20/25) και μικρού περιεχομένου σε τσιμέντο με τη χρήση διαφορετικών συνδυασμών fillers και binders, όμως τελικά επιλέχθηκαν μόνο όσα από αυτά ήταν καταλληλότερα, δηλαδή είχαν αυξημένη packing πυκνότητα και συνεπώς χαμηλές απαιτήσεις σε νερό. Πληρωτικά υλικά όπως π.χ. fjordstone filler ή limestone filler δεν κρίθηκαν κατάλληλα. Τρία μίγματα που περιείχαν ιπτάμενη τέφρα, σκόνη χαλαζία (quartz) – ορυκτό πυριτίου και στάχτη που απομένει σε εδαφικό κλίβανο (ground incinerator bottom ash) αντικαθιστώντας έως και το 57% του τσιμέντου κρίθηκαν ως τα καταλληλότερα. Στον Πίνακα 3.10 συνοψίζεται η σύνθεση των τριών επικρατέστερων μιγμάτων. Το J1 είναι το μίγμα αναφοράς με τσιμέντο Portland, το J2 είναι μίγμα με ιπτάμενη τέφρα, σκόνη χαλαζία και τσιμέντο Portland, το J3 είναι μίγμα με σκυροτσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, σκόνη

χαλαζία και τσιμέντο Portland και το J4 μίγμα περιέχει ιπτάμενη τέφρα, στάχτη από κλίβανο (εδαφικό αποτεφρωτήρα) και τσιμέντο Portland. Στα J2 και J3 μίγματα η συνολική ποσότητα λεπτομερούς υλικού είναι 260 kg/m^3 και η συνολική ποσότητα τσιμέντου είναι 110 kg/m^3 για λόγους σύγκρισης. Επίσης χρησιμοποιήθηκε υπερευστοποιητικό Glenium 51.



Εικόνα 3.13 Κυκλική μέθοδος σχεδιασμού οικολογικού σκυροδέματος (Fennis, 2011).

Πίνακας 3.10 Σύνθεση (kg/m^3) των οικολογικών μιγμάτων σκυροδέματος (Fennis, 2011).

Composition		Mixtures			
		J1	J2	J3	J4
CEM I 42.5 N	$[\text{kg/m}^3]$	260	110	44	125
CEM III/B 42.5 N	$[\text{kg/m}^3]$	-	-	66	-
Fly ash SMZ Maasvlakte	$[\text{kg/m}^3]$	-	88	65	75
Quartz powder M600	$[\text{kg/m}^3]$	-	62	85	-
Ground IBA	$[\text{kg/m}^3]$	-	-	-	50
Aggregates 4-16	$[\text{kg/m}^3]$	1193	1162	1160	1157
Sand 0-4	$[\text{kg/m}^3]$	718	867	866	864
Glenium 51 [% kg/kg of powders]	[%]	0.8	0.8	1.2	1.2
Effective amount of water	$[\text{kg/m}^3]$	162	103	103	112
Water/cement ratio	[-]	0.62	0.94	0.94	0.90
Water/powder ratio	[-]	0.62	0.40	0.40	0.45
Estimated density (incl. 1% air)	$[\text{kg/m}^3]$	2351	2409	2408	2402
Packing density CIPM	[-]	0.886	0.897	0.898	0.890

Η Fennis τονίζει ότι ο έλεγχος της ποσότητας νερού στα οικολογικά μίγματα σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Λόγω του χαμηλού περιεχομένου σε τσιμέντο, μια μικρή αύξηση στο περιεχόμενο νερό μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλή αναλογία νερού/τσιμέντου. Επομένως είναι απαραίτητο να επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος και η κατάλληλη ποσότητα filler ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου. Το μέγεθος, το σχήμα και η υφή είναι σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν τις απαιτήσεις σε νερό, την εργασιμότητα και την αντοχή. Για το λόγο αυτό στο μοντέλο πακεταρίσματος σωματιδίων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι διασωματιδιακές δυνάμεις μεταξύ των λεπτομερών σωματιδίων. Καθώς αυτές οι δυνάμεις εξαρτώνται από τις συνθήκες (dry, wet) της σωματιδιακής δομής, η packing πυκνότητα θα πρέπει να υπολογίζεται στις συνθήκες αυτές (μέσα σε νερό, με χρήση επαρκούς ποσότητας υπερρευστοποιητικού).

Το περιεχόμενο τσιμέντο Portland μειώνεται από 260 kg/m³ σε 110 kg/m³, δηλαδή επιτυγχάνεται μια μείωση της τάξης του 57%, διατηρώντας όμως τις ιδιότητες του σκυροδέματος σε ικανοποιητικό επίπεδο. Χάρη στην σχεδιαστική μέθοδο δεν απαιτήθηκαν δοκιμαστικά τεστ και **όλα τα μίγματα οικολογικού σκυροδέματος έφτασαν τουλάχιστον την προβλεπόμενη σχεδιαστική τους αντοχή (33 N/mm²)**. Αυτές οι υψηλές αντοχές επιτεύχθηκαν παρόλο το χαμηλό περιεχόμενο σε τσιμέντο και την υψηλή αναλογία νερού / τσιμέντου και νερού / συνδετικής ουσίας. Πιθανόν τα υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου συνέβαλαν στην πρόσδοση αντοχής μέσω της ποζολανικής αντίδρασης ή επειδή έδρασαν ως πόλοι έλξης (πυρήνες) ανάμεσα στα σωματίδια του τσιμέντου ή λόγω των χημικών ιδιοτήτων τους. Η ορυκτολογική σύνθεση των προσμίκτων αποτελεί βασική παράμετρο που επηρεάζει τις ιδιότητες και την απόδοση του σκυροδέματος. **Η συρρίκνωση (shrinkage) και ο ερπυσμός (creep) φαίνεται ότι διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τον τύπο filler που χρησιμοποιείται. Όμως από την άλλη πλευρά, οι υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες του οικολογικού σκυροδέματος δεν διέφεραν από τις ιδιότητες του συμβατικού σκυροδέματος.**

Πίνακας 3.11 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μιγμάτων αναφοράς και των οικολογικών μιγμάτων σκυροδέματος (Fennis, 2011).

CO ₂ -emissions / kg concrete [kg]	Mixtures				
	J1	J2	J3	J4	J1a
CEM I 42.5 N	0.092	0.038	0.015	0.043	-
CEM III/B 42.5	-	-	0.009	-	0.035
Fly ash SMZ Maasvlakte	-	0.004	0.003	0.003	-
Quartz powder M600	-	0.003	0.004	-	-
Ground IBA	-	-	-	0.002	-
Aggregates and sand	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Steel	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Formwork	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Transport	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Total	0.17	0.12	0.11	0.13	0.12



Εικόνα 3.14 Εφαρμογή οικολογικού μίγματος σκυροδέματος σε βιομηχανικό πεζοδρόμιο (Industrial pavement) Werf Heijmans Rosmalen (Fennis, 2011).



Εικόνα 3.15 Διαβροχή του οικολογικού μίγματος (Self-compacting concrete) Heembeton (Fennis, 2011).

Η κατά 50% αντικατάσταση του τσιμέντου Portland στο σκυρόδεμα συνέβαλε στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά περίπου 25%. Τονίζεται όμως ότι ως βασική σχεδιαστική παράμετρος ορίστηκε η αντοχή σε θλίψη και όχι η ελάττωση των εκπομπών CO₂, που όμως επήλθε έμμεσα, από την ελάττωση του περιεχόμενου τσιμέντου. Αν ληφθούν υπόψη οι μεγάλες ποσότητες παραγόμενου σκυροδέματος παγκοσμίως, το ποσοστό μείωσης των εκπομπών CO₂ κατά 25% είναι ένα σημαντικό ποσοστό. Μόνο στην Ολλανδία παράγονται περίπου 40 εκατ. τόνοι σκυροδέματος ετησίως. Με την αξιοποίηση οικολογικού σκυροδέματος δύνανται άρα να περιοριστούν οι εκπομπές CO₂ κατά 2 εκατ. τόνους. Στον Πίνακα 3.11 παρουσιάζονται συγκριτικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συμβατικού σκυροδέματος αναφοράς και το αντίστοιχο αποτύπωμα των τριών μιγμάτων οικολογικού σκυροδέματος.

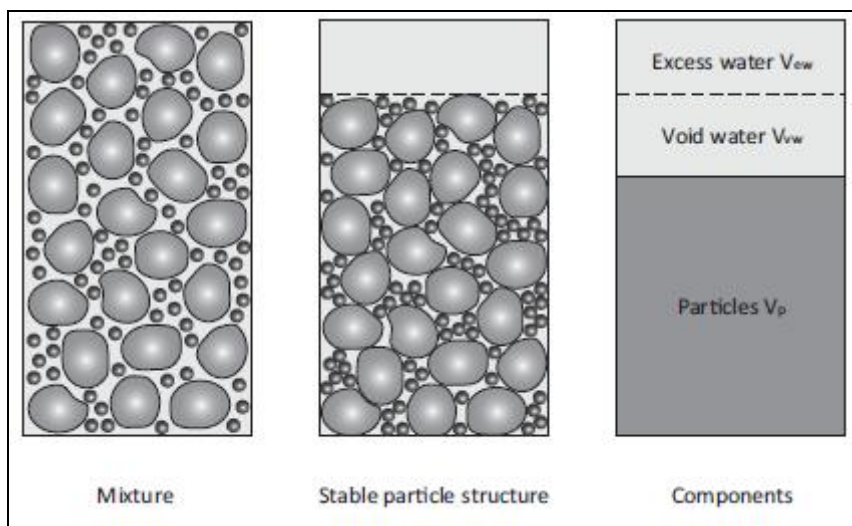
Τέλος, τα project επίδειξης και τα τεστ ανθεκτικότητας με μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης έδειξαν ότι η ανθεκτικότητα δεν εξαρτάται από την αναλογία νερού/τσιμέντου ή την αναλογία νερού/συνδετικής ουσίας. Έδειξαν επίσης ότι πρέπει να δοθεί προσοχή στην πιο αργή ανάπτυξη αντοχής στην αρχή της διαδικασίας σκλήρυνσης, καθώς αυτή σημαίνει και μια πιο αργή ανάπτυξη της πυκνότητας της μικροδομής του σκυροδέματος. **Προκειμένου για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας η Fennis προτείνει μελλοντική λεπτομερέστερη έρευνα η οποία θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη η συνολική σύνθεση του μίγματος όπως αυτή προκύπτει βάσει της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων, του περιεχόμενου νερού και τσιμέντου και της αναλογίας νερού / λεπτομερούς υλικού.** Επιπλέον, τονίζει ότι η ανάλυση της μικροδομής του σκυροδέματος έχει δείξει ότι η ελλιπής ανάμιξη και συμπίεση των οικολογικών μιγμάτων μπορεί να οδηγήσει σε μικρή ανθεκτικότητα ιδίως σε μίγματα με μικρό ποσοστό λεπτομερούς υλικού. Σε βελτίωση της ανθεκτικότητας μπορεί να οδηγήσει και η βελτίωση της εργασιμότητας, επομένως απαιτείται επαρκής ποσότητα λεπτομερούς υλικού.

Βασικά ερευνητικά συμπεράσματα της Fennis σε σχέση με την packing πυκνότητα ήταν τα ακόλουθα:

- 3. Η packing πυκνότητα μιας πούδρας ή ενός μίγματος είναι βασική σχεδιαστική παράμετρος για το σχεδιασμό οικολογικού σκυροδέματος,** καθώς βοηθάει στον καθορισμό της καταλληλότητας ενός πληρωτικού υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου και σχετίζεται με την εργασιμότητα και την αντοχή του μίγματος. Ιδιαίτερα λεπτομερή υλικά με μεγάλη επιφάνεια που αντικαθιστούν το τσιμέντο, έχουν την ικανότητα να αυξάνουν την packing πυκνότητα σε τέτοιο βαθμό ώστε η αναλογία νερού/τσιμέντου να ελαττώνεται. Αυτό αποδεικνύει ότι **οι απαιτήσεις σε νερό δεν είναι συνάρτηση μόνο της επιφάνειας των σωματιδίων, όπως υποστηρίζει η θεωρία της ζώνης του νερού.**
- 4. Η αντίληψη ότι τα μίγματα διαθέτουν την απαραίτητη ρευστότητα λόγω της περίσσειας τσιμεντόπαστας που περιβάλλει τα σωματίδια των αδρανών δεν αποδεικνύεται από τα ερευνητικά αποτελέσματα,** καθώς η packing πυκνότητα των αδρανών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τσιμέντου και fillers. Οι διασωματιδιακές δυνάμεις (Van den Waals και ηλεκτροστατικές δυνάμεις) μεταξύ αδρανών και τσιμέντου είναι σημαντικά μεγαλύτερες στην περίπτωση λεπτομερών αδρανών. Αυτές επηρεάζονται από την κατάσταση της σωματιδιακής δομής

(υγρή, ξηρή), επομένως το μίγμα του σκυροδέματος θα πρέπει να ειδοθεί ως μια σωματιδιακή δομή σε νερό και όχι μέσα σε τσιμεντόπαστα.

5. Ο έλεγχος της ποσότητας του νερού είναι όπως προαναφέρθηκε ιδιαίτερα σημαντική σχεδιαστική παράμετρος. Η μέγιστη packing πυκνότητα των μιγμάτων δεν συνδέεται άμεσα με το ιζώδες, τη ρευστότητα ή την αντοχή σε θλίψη. Η ποσότητα του νερού χρησιμοποιείται για να γεμίσει τα κενά (πορώδες) και η επιπλέον ποσότητα είναι αυτή που προσδίδει τη ρευστότητα (εργάσιμο) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.16.

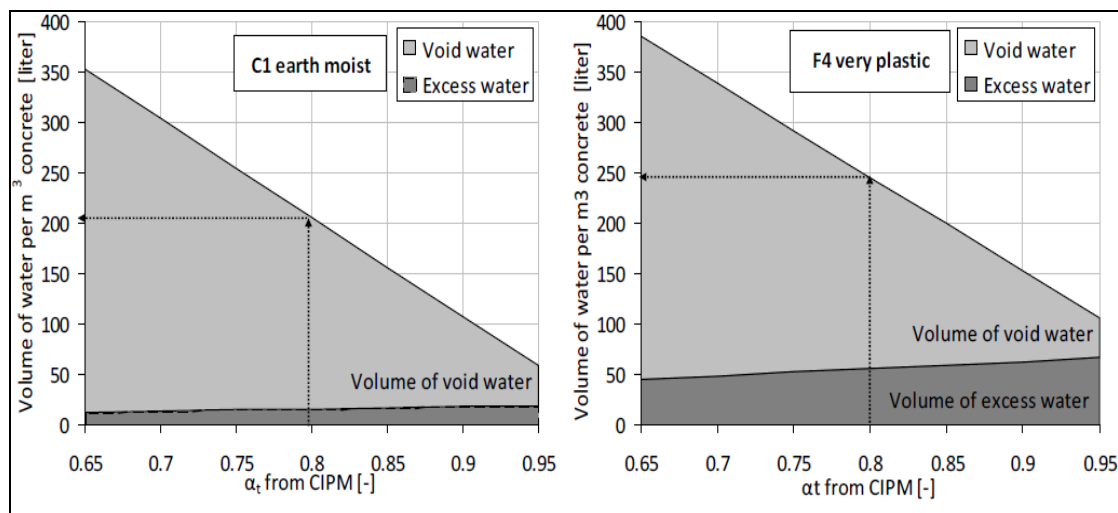


Εικόνα 3.16 Ο όγκος του νερού διαιρούμενος σε όγκο νερού που γεμίζει τους πόρους και σε όγκο περίσσειας νερού μέσα σε μια δομή σωματιδίων (Fennis, 2011).

Επομένως η μέγιστη packing πυκνότητα συνδέεται άμεσα με τις απαιτήσεις του μίγματος σε νερό. Η σχέση μεταξύ packing πυκνότητας και απαιτήσεων σε νερό που προέκυψε από την εφαρμογή της προαναφερθείσας κυκλικής σχεδιαστικής μεθόδου της Fennis παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.17.

Αναλυτικότερα, στην Εικόνα 3.17 φαίνονται οι υπολογιζόμενες από το μοντέλο απαιτήσεις σε νερό ως συνάρτηση της packing πυκνότητας α , για δύο μίγματα διαφορετικής πλαστικότητας. Από το διάγραμμα που προκύπτει φαίνεται ότι η ποσότητα νερού που απαιτείται για την πλήρωση των κενών είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα που απαιτείται για την επίτευξη ικανοποιητικής ρευστότητας του μίγματος και επιπλέον η αύξηση της packing πυκνότητας είναι σημαντική προκειμένου να μειωθούν οι συνολικά απαιτούμενες ποσότητες νερού. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η packing πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό νερού που απαιτείται για να είναι το μίγμα εργάσιμο, επειδή αύξηση της πυκνότητας σημαίνει μεγαλύτερη διασωματιδιακή τριβή που πρέπει να υπερνικηθεί. Από το διάγραμμα της Εικόνας 1 φαίνεται π.χ. ότι για ένα πολύ πλαστικό μίγμα (F4) με packing πυκνότητα ίση προς 0.8, η περίσσεια νερού (excess water) που απαιτείται ώστε να είναι το μίγμα εργάσιμο, φτάνει στο 23% των συνολικών απαιτήσεων σε νερό, ενώ με packing πυκνότητα ίση προς 0.9, η περίσσεια νερού είναι το 41% της συνολικής ποσότητας απαιτούμενου νερού. Η παραπάνω αποτελεί σημαντική σχεδιαστική παράμετρο στον σχεδιασμό οικολογικού

σκυροδέματος καθώς μίγματα με πολύ υψηλή packing πυκνότητα αναμένεται να είναι σκληρότερα λόγω της εσωτερικής τριβής (διασωματιδιακών δυνάμεων) και θα παρουσιαστεί απόμειξη των αδρανών του σκυροδέματος και απορροή της τσιμεντόπαστας από τα διάκενα του ξυλότυπου ή εξίδρωση, εάν η αναλογία νερού δεν είναι η κατάλληλη.



Εικόνα 3.17 Διαγράμματα των απαιτήσεων σε νερό (για την πλήρωση των κενών και για την πρόσδοση ρευστότητας) σε συνάρτηση με την packing πυκνότητα του μίγματος, για 2 τύπους μιγμάτων (ημι-πλαστικό αριστερά και ρευστό δεξιά) (Fennis, 2011).

Από όλα τα παραπάνω ενισχύεται τελικά η άποψη ότι είναι δυνατή η εισαγωγή τέτοιων μιγμάτων οικολογικού σκυροδέματος στην αγορά, μια που αυτά τα μίγματα είναι οικολογικότερα και παράλληλα διατηρούν τις μηχανικές και άλλες ιδιότητες του συμβατικού σκυροδέματος.

B) Οικολογικό σκυρόδεμα με αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας

Όπως προαναφέρθηκε, έχει μελετηθεί ο σχεδιασμός σύνθετων τσιμέντων με πρόσμικτα που παρουσιάζουν **έμμεσες υδραυλικές ιδιότητες**, όπως η βασική (ασβεστόχυα) ιπτάμενη τέφρα ή οι σκωρίες υψικαμίνων αλλά και **ποζολανικές ιδιότητες**, όπως π.χ. η όξινη (πυριτική) ιπτάμενη τέφρα. Τα υλικά αυτά είναι τεχνητά και προκύπτουν ως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών. Στην Ελλάδα αξιοποιείται κυρίως η ιπτάμενη τέφρα, για το λόγο αυτό ακολουθεί μια ανάλυση των αποτελεσμάτων αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα.

- **Γενικά**

Ιπτάμενη τέφρα ονομάζεται το σε λεπτότατο καταμερισμό στερεό και κονιώδες υλικό που προκύπτει από την καύση γαιανθράκων ή λιγνιτών και που συλλέγεται κατά την έξοδο των αερίων καύσεως από τις καπνοδόχους των θερμοηλεκτρικών σταθμών με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Η δραστηριότητα των τεφρών οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητά τους σε SiO_2 , Al_2O_3 και CaO . Οι δύο πρώτες ενώσεις προσδίδουν στην τέφρα ποζολανικές ιδιότητες ενώ το οξείδιο του πυριτίου και

κυρίως του ασβεστίου προσδίδουν στην τέφρα υδραυλικές ιδιότητες, όπως προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1. Η βασική διάκριση των ιπτάμενων τεφρών αφορά την χημική σύστασή τους η οποία εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και από την ορυκτολογική σύσταση των γαιωδών προσμίξεων που συνοδεύουν το καύσιμο στην εξόρυξη. Η κατάταξη των ιπτάμενων τεφρών βάσει της χημικής σύστασης είναι αυτή που προκύπτει από την τιμή του λόγου CaO/SiO_2 που κατατάσσει τις τέφρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

α) Τέφρες βασικές ή υψηλής ασβέστου (HA) ή Calcareous fly ashes

β) Τέφρες όξινης ή χαμηλής ασβέστου (LA) ή Siliceous fly ash

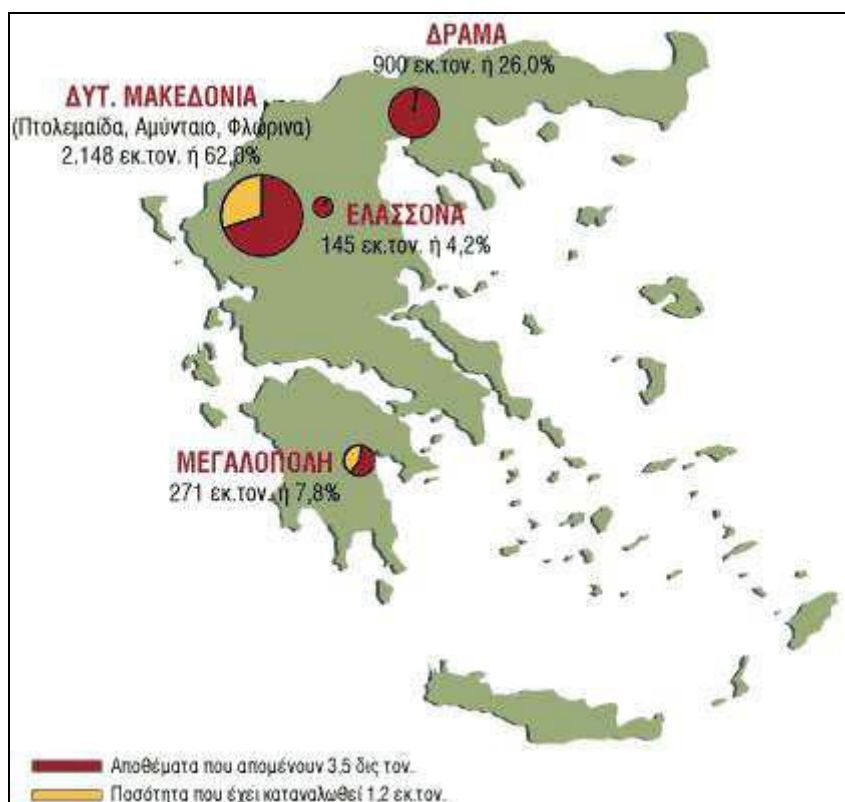
Τέφρες που χαρακτηρίζονται ως βασικές, έχουν συντελεστή $CaO/SiO_2 \geq 1$ ενώ τέφρες με $CaO/SiO_2 < 0.3$ χαρακτηρίζονται ως όξινης.

Μια εικόνα των διακυμάνσεων στη σύσταση των κύριων συστατικών των ιπτάμενων τεφρών διεθνώς, δείχνει ο Πίνακας 3.12.

Πίνακας 3.12 Διακυμάνσεις της χημικής σύστασης (% κ.β.) ιπτάμενων τεφρών από διάφορες χώρες (Στιβανάκης, 2003).

Χώρα	Απώλειες Πύρωσης	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
Αυστραλία	0,1 - 1,2	53 - 63	25 - 28	2-6	1 - 7	1 - 2	0,1 - 0,8	1,8 - 3,2	0,8 - 2,4
Βουλγαρία	0,5 - 19,7	40 - 60	12 - 32	5-18	4 -12	1 - 5	0,9 - 9,6		
Γερμανία	1,5 - 20,1	34 - 50	21 - 29	8 - 21	2 -12	1 - 5	0,1 - 2,1		
Ελλάς	2,0 - 5,0	25 - 50	15 - 20	5 - 8	10-35	2 - 3	1,5 - 8	1,0-2,0	0,5 - 0,8
Γαλλία	0,3 - 15,2	29 - 54	10 - 33	5 - 15	1 -39	1 - 5	0,1 - 7,0	0,7 - 6,0	0,1 - 0,9
Μεγ. Βρετανία	0,6 - 11,7	41 - 51	23 - 24	6 - 14	1 - 8	1,4 - 3	0,6 - 6,8	1,8 - 4,2	0,2 - 1,9
Ινδία	2,2 - 6,5	51 - 60	19 - 29	2 - 19	2 - 4	0 - 2	0,0 - 0,5		
Ιαπωνία	0,1 - 1,2	53 - 63	25 - 28	2 - 6	1 - 7	1 - 2	0,1 - 0,8	1,8 - 3,2	0,8 - 2,4
Πολωνία	1 - 10	35 - 60	6 - 36	5 - 12	2 - 35	1 - 4	0,1 - 8,0	0,1 - 2,7	0,1 - 2,0
Ρουμανία	0,2 - 4,5	39 - 53	18 - 29	7 - 16	3 - 13	1 - 4	0,5 - 5,9	0,3 - 2,2	0,1 - 1,8
Κ.Α.Κ.	0,5 - 22,5	36 - 63	11 - 40	4 - 17	1 - 32	0 - 5	0,1 - 2,5	1,1 - 3,6	0,5 - 1,2
Ουγγαρία	1 - 5,0	41 - 60	16 - 34	5 - 17	1 - 11	1 - 7	0,5 - 7,0	0, - 2,2	0,2 - 2,5
Η.Π.Α.	1 - 18,0	32 - 52	14 - 28	8 - 31	11-12	0 - 2	0,0 - 3,0		

Ο προσανατολισμός της ενεργειακής πολιτικής στην Ελλάδα προς την κατεύθυνση της κάλυψης των αναγκών με την καύση στερεών καυσίμων (λιγνίτης) έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων παραπροϊόντων αυτής της καύσης. Το σημαντικότερο παραπροϊόν από την άποψη παραγωγής (13×10^6 τόνοι ετησίως) της θερμικής διάσπασης των λιγνιτών, είναι η ιπτάμενη τέφρα, ένα κονιώδες υλικό που συλλέγεται στα ηλεκτρόφιλτρα των ενεργειακών σταθμών της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη και την Δυτική Μακεδονία. Ο χάρτης των λιγνιτικών αποθεμάτων (Εικόνα 3.18) δείχνει ότι το πρόβλημα της συσσώρευσης ιπτάμενης τέφρας θα εντείνεται συνεχώς στο μέλλον και επομένως η αξιοποίησή της αποτελεί ζήτημα υψηλής προτεραιότητας (Στιβανάκης, 2003).



Εικόνα 3.18 Λιγνιτικά αποθέματα στην Ελλάδα (Στιβανάκης, 2003).

Στους ενεργειακούς σταθμούς της Δυτικής Μακεδονίας παράγονται κατά κανόνα βασικές τέφρες ($\text{CaO/SiO}_2 = 0.86-1.40$), ενώ στους σταθμούς της Μεγαλόπολης όξιμες ($\text{CaO/SiO}_2 = 0.25-0.38$). (Πίνακας 3.13) Η ετήσια παραγωγή ιπτάμενης τέφρας υπολογίστηκε για το 2001 σε 13 εκατ. τόνους και σε σύγκριση με την μέση παραγωγή της δεκαετίας του '80 (περίπου 5-6 εκατ. τόνους) και του '90 (περίπου 7-10 εκατ. τόνους), παρουσίασε μεγάλη αύξηση.

Η περιοχή στην οποία εμφανίζονται οι όξιμες τέφρες στο τριαδικό σύστημα $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ (Εικόνα 3.19) βρίσκεται πολύ κοντά και επικαλύπτεται εν μέρει με την περιοχή εμφάνισης των φυσικών ποζολανών (θηραϊκή γη, ηφαιστειακοί τόφφοι). Αντιθέτως η περιοχή των βασικών τεφρών πλησιάζει την περιοχή υδραυλικών κονιών (τσιμέντων).

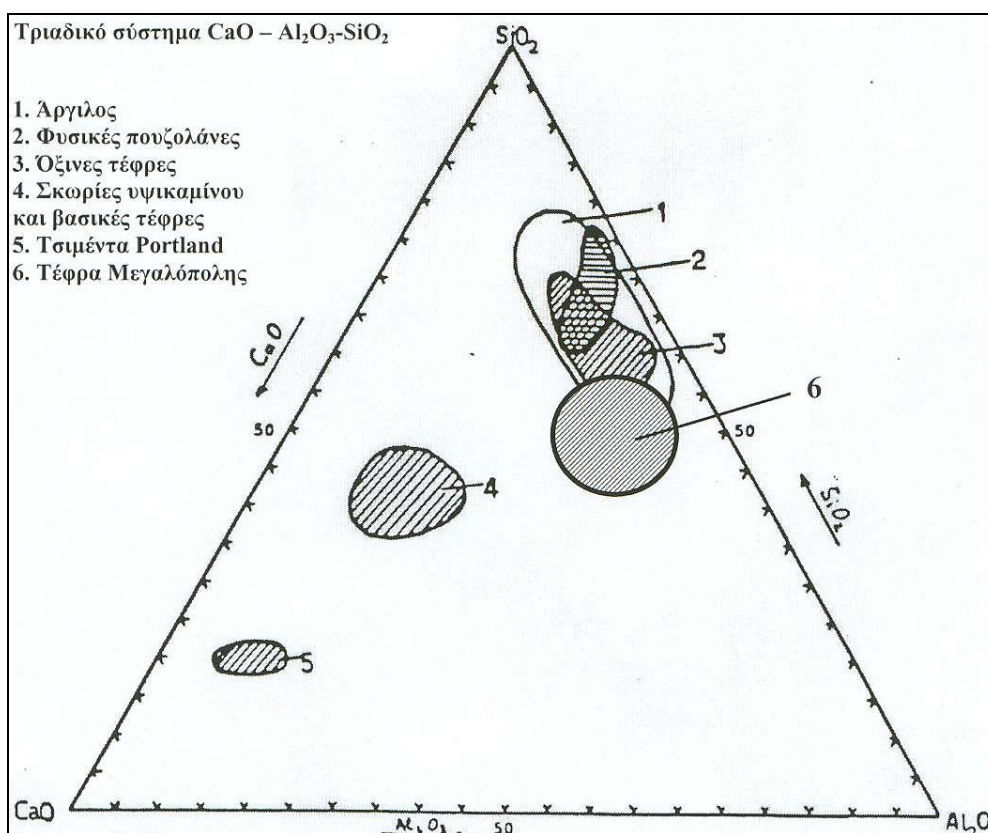
Για τα παραπροϊόντα θερμικών διεργασιών που παράγονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως π.χ. **σκωρίες υψικαμίνων**, το πρόβλημα θεωρείται λυμένο και αυτό οφείλεται στον υψηλό δείκτη ομοιομορφίας αυτών των υλικών (πλήρης τήξη του υλικού, σταθερή χημική σύνθεση, υαλώδης υφή), σε αντίθεση με την ιπτάμενη τέφρα.

Εκτιμάται ότι σε παγκόσμια κλίμακα αξιοποιείται μόνο το 20% περίπου της παραγόμενης τέφρας. Ο προσανατολισμός που δίνεται στην τεχνική της ξηρής καύσης έναντι της καύσης τηκόμενης τέφρας έχει σαν αποτέλεσμα εκτός από την ποσοτική αύξηση της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας και την ποιοτική της μεταβολή. Λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν στον φλογοθάλαμο αυξάνεται ο αριθμός των χονδρόκοκκων και ακανόνιστου σχήματος σωματιδίων έναντι των λεπτόκοκκων και σφαιρικών. Επίσης αυξάνεται (συνήθως) και το ποσοστό της κρυσταλλικής φάσης (χαλαζίας (SiO_2) και μουλίτης ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)) που

περιέχεται στα σωματίδια. Ακόμα λόγω της ατελέστερης διάσπασης στην τεχνολογία της ξηρής καύσης μπορεί να αυξηθεί το ποσοστό του άκαυστου υπολείμματος και το πορώδες των κόκκων της ιπτάμενης τέφρας.

Πίνακας 3.13 Χημική σύσταση του τσιμέντου Portland και των Ιπτάμενων Τεφρών της Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας (Στιβανάκης, 2003).

Οξείδια	Κλίνκερ Τσιμέντου Portland (%)	Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης (%)	Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας (%)
SiO_2	22,5	40 – 45	25 – 35
Al_2O_3	5,5	15 – 20	15 – 20
Fe_2O_3	2,5	7 – 8	5 – 7
CaO	66	12 – 15 (ελευθ. 0)	30 – 35 (ελ.10 – 15)
MgO	1,35	≅ 2	≅ 3
SO_3	0,6	1,5 – 2,5	4 – 8
K_2O	0,75	1,5 – 2,0	1,0
Na_2O	0,40	≅ 0,5	0,6 – 0,8
TiO_2	≅ 0,25	≅ 0,8	≅ 0,5
Απώλεια πύρωσης	0,15	2	5
Αδιαλ. υπόλειμμα	0,10	45	20



Εικόνα 3.19 Τριμερές διάγραμμα $Al_2O_3 - CaO - SiO_2$ με τις χαρακτηριστικές περιοχές υδραυλικών κονιών και ποζολανών (Στιβανάκης, 2003).

- **Βελτιωμένες ιδιότητες τεφροσκυροδέματος και οφέλη**

Οι παραπάνω μεταβολές επιδρούν τόσο στις χημικές ιδιότητες (ποζολανικότητα) όσο και στις φυσικές ιδιότητες (λεπτότητα, δομή) των ιπτάμενων τεφρών. Οι ιδιότητες αυτές χαρακτηρίζουν την ποιότητα των ιπτάμενων τεφρών. Αυτές οι επιδράσεις στην ποιότητα γίνονται σημαντικές όταν αυτές οι τέφρες εξετάζονται στα πλαίσια της αξιοποίησής τους στα δομικά υλικά, γιατί επιδρούν στις αποκτώμενες τεχνολογικές ιδιότητες των παραγόμενων υλικών.

Η ιπτάμενη τέφρα αντιδρά με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που προκύπτει από την ενυδάτωση του τσιμέντου και σχηματίζει ένυδρο πυριτικό ασβέστιο, που έχει παρεμφερείς ιδιότητες με το πυριτικό τριασβέστιο και διασβέστιο. Μέσω αυτής της διεργασίας, **η ιπτάμενη τέφρα συμβάλλει θετικά στην αντίσταση του σκυροδέματος σε θεικές ενώσεις, μειώνει την διαπερατότητα του, συνεισφέρει στη μείωση του λόγου νερό/τσιμέντο και βελτιώνει τη ρευστότητα (ιξώδες) και το εργάσιμο του σκυροδέματος.** Ο ρυθμός όμως απόκτησης της πρώιμης αντοχής του σκυροδέματος εξαρτάται από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης τέφρας. Περισσότερο ευνοϊκή συμπεριφορά παρουσιάζει η τέφρα τύπου C (ασβεστούχα) έναντι της F (πυριτικής), ενώ **μακροπρόθεσμα η αντοχή που προσδίδει η ιπτάμενη τέφρα είναι μεγαλύτερη από του κοινού σκυροδέματος.**

Σχετικά με τις τεχνολογικές εφαρμογές της αξιοποιούμενης σήμερα ιπτάμενης τέφρας το μεγαλύτερο ποσοστό της απορροφάται στον κατασκευαστικό τομέα και ιδιαίτερα όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 3.14 στις εξής εφαρμογές:

- 1) Σαν προσθήκη στο σκυρόδεμα ως αδρανές
- 2) Στις τσιμεντοβιομηχανίες, σαν πρόσθετο υλικό του τσιμέντου (ως πηγή SiO_2)
- 3) Στην οδοποιία σαν υλικό επίστρωσης.

Πίνακας 3.14 Ποσά παραγόμενης τέφρας και περιοχές αξιοποίησής της σε διάφορες χώρες (ποσότητες σε 10^6 t) (Στιβανάκης, 2003).

Χώρα	Ποσότητα τέφρας	Ποσότητα Ιπτ. τέφρας	Αξιοποιούμενη Ιπταμ. τέφρα	Στά προϊόντα μπετόν	Στην τσιμεντοβιομηχανία	Στην οδοποιία
Η.Π.Α.	65,2	50	10	3,9	0,8	2,8
Μεγ. Βρετανία	11	10	2,5	1,0	<< 0,1	0,7
Γαλλία	6,2	4,2	2,0	<< 0,1	1,2	0,4
Καναδάς	3,2	1,1	0,3	0,2	-	-
Γερμανία	34	16,6	5,8	2,8	0,8	0,5

Στην Ελλάδα γίνεται χρήση της ιπτάμενης τέφρας η οποία προκύπτει ως απόβλητο από εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύσιμο λιγνίτη. Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται ως αδρανές για το σκυρόδεμα και έχει αρχίσει να έχει ευρεία εφαρμογή. Η ενδεχόμενη τοξικότητά της περιορίζει τη χρήση της σε κατασκευές που δεν είναι σε άμεση επαφή με τον άνθρωπο (δεν χρησιμοποιείται σαν αδρανές σκυροδέματος στην κατασκευή κτιρίων). Το 1998 κατασκευάστηκε το μεγαλύτερο φράγμα στον κόσμο από σκυρόδεμα με αδρανές ιπτάμενη τέφρα, στη θέση Πλατανόβρυση στο Νέστο. Παράλληλα, υπάρχουν προτάσεις για την εφαρμογή του υλικού αυτού ως αδρανές στην οδοποιία.

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη στερεά καύσιμα (λιθάνθρακας, λιγνίτης, κ.λπ.),

συμβάλλει θετικά στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων (πρόβλημα απόθεσης τέφρας) και μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας (15% προσθήκη ιπτάμενης τέφρας αντί τσιμέντου στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση κατά περίπου 12.5% της απαιτούμενης ενέργειας ανά m^3 σκυροδέματος, δηλ. από 589.13 kWh/ m^3 σε 515.49 kWh/ m^3 περίπου).

- **Εφαρμογές**

- 1. Κατασκευή φράγματος από τεφροσκυρόδεμα, Ελλάδα**

Το φράγμα της Πλατανόβρυσης (Εικόνα 3.20) στο Νομό Δράμας βρίσκεται σε απόσταση 400 km περίπου από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Αποτελεί το ενδιάμεσο από τα τρία τμήματα του συστήματος των έργων της ΔΕΗ στον ποταμό Νέστο (ΥΗΕ Θησαυρού - Πλατανόβρυσης - Τεμένους). Η κατασκευή του διήρκεσε δηλαδή 18 μήνες, χρονικό διάστημα που θεωρείται εξαιρετικά σύντομο για την κατασκευή έργων τέτοιας φύσης και τάξης μεγέθους. Είναι από τα υψηλότερα φράγματα της Ευρώπης (95 m), που είναι κατασκευασμένα με κυλινδρούμενο τεφροσκυρόδεμα και με τόσο υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας στο μίγμα (500 kg τσιμέντο και 225 kg ιπτάμενη τέφρα για κάθε m^3). Ο συνολικός κύριος όγκος του, μαζί με τον τοίχο αντιστήριξης, είναι 450.000 m^3 , ο δε όγκος των στοιχείων όψεως - στην κατασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν 175 kg/ m^3 ιπτάμενης τέφρας - είναι 11.330 m^3 . Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν περίπου 110.000 τόνοι κατεργασμένης ιπτάμενης τέφρας, η οποία μεταφέρθηκε από τη μονάδα επεξεργασίας της τέφρας στην Πτολεμαΐδα με ειδικά σιλοφόρα αυτοκίνητα.



Εικόνα 3.20 Το οικολογικό φράγμα της Πλατανόβρυσης στο Νέστο (<http://flyash.com/>)

- 2. Η αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας στη βιομηχανία TITAN, Ελλάδα**

Έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στα δομικά υλικά όχι μόνο σαν ποζολανικό πρόσθετο (μέχρι 10%) αλλά σαν συστατική α' ύλη σε μεγαλύτερα ποσοστά καθώς αυτή η προοπτική παρουσιάζει και εξαιρετικά οικονομικά πλεονεκτήματα λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής αυτών των δομικών υλικών, αφενός μεν λόγω της φθηνότερης α' ύλης, αφετέρου δε λόγω εξοικονόμησης ενέργειας (άλωση, έψηση) από την προσθήκη αυτής της α' ύλης στο

τελευταίο στάδιο της παραγωγής. Από τον ερευνητή κ. Β. Ε. Στιβανάκη (2003) π.χ., στα πλαίσια εκπόνησης διδακτορικής διατριβής, διερευνήθηκαν οι τεχνολογικές ιδιότητες των μιγμάτων τσιμέντου - ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης (ι.τ.Μ.), σε σειρές δοκιμών και δοκιμών.

Αναλυτικότερα, σύμφωνα με τον κ. Στιβανάκη, η υποκατάσταση των προστιθέμενων ποζολανών και στη συνέχεια η υποκατάσταση μέρους του του κλίνκερ από την ι.τ.Μ. (συνολικά έως και 30%) για την παραγωγή νέου τύπου τσιμεντοκονίας, αποτελεί πρόκληση για τους παρακάτω λόγους:

- Οι παραγόμενες ποσότητες ιπτάμενης τέφρας αυξάνονται με γοργό ρυθμό και προκαλούν μεγάλα προβλήματα εναπόθεσης.
- Η ιπτάμενη τέφρα έχει ήδη υποστεί διεργασίες έψησης στις θερμοκρασίες καύσης του λιγνίτη και για αυτό το λόγο αποτελεί α' ύλη που αναμιγνύεται στο τέλος της παραγωγικής διαδικασίας της τσιμεντοπαραγωγής και δεν επιβαρύνει την παραγωγή στα στάδια ανάμιξης, άλεσης και έψησης εξοικονομώντας μεγάλα ποσά ενέργειας καθιστώντας το τελικό προϊόν ανταγωνιστικό.
- Η προβλεπόμενη είσοδος της ι.τ.Μ. σαν α' ύλη στο τελευταίο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας του δεν απαιτεί καμία αλλαγή από αυτές που είναι απαραίτητες όταν ένα νέο υλικό υποκαθιστά μία δεδομένη α' ύλη στην αρχή της παραγωγής. Για παράδειγμα η εξ' αρχής προσθήκη νέας α' ύλης απαιτεί ρύθμιση της συνολικής σύστασης α' υλών ώστε οι δείκτες εψησιμότητας, ο υδραυλικός και ο σιδηραργλικός δείκτης να ικανοποιούν μια περιοχή τιμών, πράγμα που περιορίζει σε πολύ στενά πλαίσια την ποσότητα της προσθήκης. Επιπλέον, η πιθανή παρουσία φάσεων που επηρεάζουν τις ρεολογικές ιδιότητες των προς έψηση υλικών, δημιουργεί περισσότερους περιορισμούς στην χρήση των υλικών. Αποφεύγονται επίσης (με την προσθήκη στο τελευταίο στάδιο) οι αυστηροί περιορισμοί που έχουν επιβληθεί στην παρουσία στοιχείων όπως (αλκάλια, χρώμιο) λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζουν στην έψηση.
- Λόγω της μικρότερης σκληρότητας της ι.τ.Μ. η προσθήκη της στο τελικό στάδιο της άλεσης του κλίνκερ μειώνει και την απαιτούμενη ενέργεια άλεσης επειδή οι κόκκοι του κλίνκερ λειτουργούν ως αλεστικά σχετικά με τους κόκκους της ιπτάμενης τέφρας. Πράγματι από τις βιομηχανικές δοκιμές στην βιομηχανία ΤΙΤΑΝ αποδείχθηκε ότι με 13% προσθήκη ιπτάμενης τέφρας δεν παρατηρείται καμία ενεργειακή επιβάρυνση στην τελική άλεση του κλίνκερ.

Ο ερευνητής καταλήγει στο συμπέρασμα ότι «η ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης αποδεικνύεται ότι έχει όλα τα χαρακτηριστικά ώστε να θεωρηθεί κατεργασμένη α' ύλη, η οποία μπορεί να συνεργαστεί τουλάχιστον μέχρι 30% με προϊόντα της τσιμεντοβιομηχανίας για την παραγωγή νέων προϊόντων, τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες τεχνολογικές ιδιότητες» - πλεονεκτήματα, όπως:

(α) Διατήρηση υψηλών αντοχών και βελτίωση των τεχνολογικών ιδιοτήτων μέχρι προσθήκης έως 30% ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης.

Αναλυτικότερα, επιβεβαιώθηκε ότι η ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης κατατάσσεται στα ποζολανικά υλικά και δεν αναμένεται να αναπτύξει αυτόνομα αντοχές σε αντίθεση με την ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας η οποία παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες. Η μελέτη των μηχανισμών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης, ενώ δεν είναι υδραυλικό υλικό, παρουσία Ca^{+2} αναπτύσσει την

ιδιότητα της σκλήρυνσης και συμβάλλει στην πολύ ισχυρή ανάπτυξη αντοχών σε δεύτερο στάδιο (ύστερη ενυδάτωση). Επιπλέον συμμετέχει και στο πρώτο στάδιο, αυξάνοντας την ποσότητα των ενυδατωμένων Ca^{+2} , που τελικά συμβάλλουν στην δημιουργία κρυστάλλων C-S-H, που είναι οι φορείς αντοχών.

Ταυτόχρονα, εμφανίστηκε ένας επικίνδυνος ανταγωνισμός μεταξύ των σημαντικότερων τεχνολογικών ιδιοτήτων των νέων υλικών, της εργασιμότητας και των τελικών αντοχών. Ο ανταγωνισμός αυτός συνίσταται στο ότι η βελτίωση της εργασιμότητας (αύξηση λόγου w/c), μειώνει τις τελικές αντοχές. Η προώθηση της άλεσης της ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης και η παράλληλα μικρή προώθηση της άλεσης του τσιμέντου των μιγμάτων αντιμετωπίζει αυτόν τον ανταγωνισμό. Η έρευνα έδειξε επομένως ότι με άλεση, η ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης, ικανοποιεί τα κριτήρια καταλληλότητας για να χρησιμοποιηθεί σαν συστατικό υδραυλικών κονιών.

(β) Παραπλήσια ρεολογική συμπεριφορά με τα τσιμέντα, με το πλεονέκτημα ότι προσφέρει δυνατότητα παρέμβασης στο ιξώδες χωρίς επιπτώσεις στις αντοχές.

(γ) Αυξημένη μακροχρόνια αντίσταση στην προσβολή του σκυροδέματος από διαβρωτικά ιόντα Mg^{+2} , SO_4^{-2} , γεγονός που συνηγορεί στην χρήση των υλικών αυτών σαν τσιμέντα ειδικού τύπου για κατασκευές οι οποίες έρχονται σε επαφή με υδατικό περιβάλλον που περιέχει τέτοια ιόντα (γέφυρες, λιμάνια, σήραγγες, φράγματα). Τα νέα υλικά (τσιμέντο με τέφρα 20-30%) δεν φαίνεται να προκαλούν επιβάρυνση στην οξείδωση των σιδηροπλισμών, όπως πειραματικά ερευνήθηκε μετά από 8 χρόνια και παράλληλα εμφανίζουν υψηλές αντοχές στην αποσάθρωση του σκυροδέματος παρουσία διαλυμάτων διαβρωτικών ιόντων. Πιθανότερη εξήγηση αυτής της συμπεριφοράς των μιγμάτων είναι ότι η μείωση της αλκαλικής προστασίας του σιδηροπλισμού από την προσθήκη της όξινης ιπτάμενης τέφρας, αντισταθμίζεται από την αύξηση της στεγανοποίησης του σκυροδέματος που περιέχει ιπτάμενη τέφρα.

(δ) Μεγάλο οικονομικό όφελος από την υποκατάσταση μέρους των α' υλών και την εξοικονόμηση ενέργειας και παράλληλα περιβαλλοντικά οφέλη. Η αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας, θα αυξήσει σημαντικά τα ήδη υπάρχοντα οικονομικά οφέλη για την τσιμεντοβιομηχανία και για τη Δ.Ε.Η., ενώ η απορρόφηση της ιπτάμενης τέφρας, θα συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος και θα εξοικονομήσει πόρους από την μείωση της εξόρυξης α' υλών για την τσιμεντοβιομηχανία.

Αναλυτικότερα, μέχρι σήμερα η έρευνα έχει οδηγήσει στην αξιοποίηση του 10-15% της παραγομένης ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης, για την παραγωγή δομικών υλικών με προσθήκη ποσοστού της, κατά 10-20% σε τσιμέντα Π II/35 (Portland Ελληνικού τύπου). Η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης έχει επιφέρει μείωση του κόστους παραγωγής περίπου κατά 3% για τα τσιμέντα Π II/35, ενώ η παραγωγή των προτεινομένων νέων υλικών μπορεί να επιφέρει μείωση κόστους παραγωγής 4-6% για τα τσιμέντα τύπου Portland και 10-12% για τσιμέντα τύπου Υ.Α. (υψηλής αντοχής). Από την άλλη πλευρά, η πώληση του 10-15% της παραγομένης ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης εξασφαλίζει στην Δ.Ε.Η. το 50% των συνολικών εξόδων απόρριψής της.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε και συνεχίζεται, εκτός από το επιστημονικό ενδιαφέρον και τους δρόμους που άνοιξε στην μελέτη των δομικών υλικών είχε άμεση εφαρμογή στις βιομηχανίες τσιμέντου, και οδήγησε στην παραγωγή νέων τύπων υλικών. Τα νέα προϊόντα μπορούν να εφαρμοσθούν και σε ευρύτερους τομείς

των κατασκευών όπως κατασκευή μεγάλων έργων, όπου η ανάδευση δεν είναι δυνατή και η συμπύκνωση του υλικού είναι τυχαία, χρήση σαν υλικό οδόστρωσης σε πολύ υψηλά ποσοστά προσθήκης κ.ά.

Είχε επίσης θετικές επιπτώσεις στην μείωση των εξόδων λειτουργίας του ενεργειακού σταθμού Μεγαλόπολης, καθώς και στη μείωση του κόστους παραγωγής του τσιμέντου και συνέβαλε στην εύρυθμη και απρόσκοπτη λειτουργία βιομηχανιών όπως ο TITAN, σε μια περιοχή με τους υψηλότερους ρυθμούς αποβιομηχάνισης.

Όμως το σημαντικότερο επίτευγμα της έρευνας ήταν η επιτυχής αξιοποίηση ενός παραπροϊόντος, το οποίο παραγόμενο σε μεγάλες ποσότητες προκαλεί σοβαρή περιβαλλοντική επιβάρυνση στην περιοχή λειτουργίας του ενεργειακού σταθμού Μεγαλόπολης. Αξιοποιώντας την ιπτάμενη τέφρα άλλαξε σταδιακά και ο τρόπος που αντιμετώπιζαν αυτές οι μεγάλες βιομηχανίες τα «απόβλητα». Από τον αρχικό όρο «απόβλητα» προχώρησαν στον όρο «παραπροϊόντα» και τέλος είμαστε σε θέση σήμερα να θεωρούμε δόκιμο τον όρο «ημικατεργασμένη ή προκατεργασμένη» πρώτη ύλη.

Ο ερευνητής κ. Στιβανάκης (2003) καταλήγει ότι «τελικά έχουμε την αίσθηση ότι συμβάλλουμε με αυτό τον τρόπο στην δημιουργία ενός τεχνολογικού κύκλου όπου κάθε παραπροϊόν θα είναι πρώτη ύλη μιας επόμενης διεργασίας» και «ουσιαστικά επιτυγχάνεται η «μίμηση» της φύσης και των λειτουργιών της, από τη βιομηχανική παραγωγική διαδικασία, η οποία αποτελεί την ανθρώπινη παρέμβαση με το υψηλότερο κόστος για το περιβάλλον και την ποιότητα ζωής στον πλανήτη, και με αυτή την έννοια, η μακροχρόνια σχετική έρευνα αποτελεί και μια μικρή συμβολή στον πολιτισμό».

Γ) Σκυρόδεμα με μεγάλο όγκο ιπτάμενης τέφρας, σκυρόδεμα Ecosmart, Καναδάς

Η οργανωτική επιτροπή της Ecosmart υποστηρίζει την έρευνα με τη χρήση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών και υλικών αντικατάστασης του τσιμέντου. Στη βάση projects επίδειξης, με τη χρήση μεγάλων όγκων υλικών αντικατάστασης του τσιμέντου, οι εκπομπές CO₂ ελαττώθηκαν. Παρόλο που το project στοχεύει στην αξιοποίηση διαφορετικών τύπων υλικών αντικατάστασης, όπως τέφρα ως παραπροϊόν καύσης, φυσικές ποζολάνες, τέφρα φλοιού ρυζιού, σιδηροπυρίτιο ή σκωρία υψικαμίνου, κυρίως εστιάζει στην ιπτάμενη τέφρα. Αυτή είναι το πιο συνηθισμένο και το πιο εύκολα διαθέσιμο υλικό πλήρωσης στον Καναδά. Με σκυρόδεμα που περιέχει μεγάλο όγκο σε ιπτάμενη τέφρα (45%) είναι δυνατόν να παραχθεί σκυρόδεμα αντοχής τάξης C20/25 με ένα περιεχόμενο σε τσιμέντο Portland μόνο 165 Kg/m³.

Το project συνεισέφερε σε αύξηση στο μέσο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα στον Καναδά από 15% το 1999, σε 25% το 2002 και τα κύρια συμπεράσματά του συνοψίζονται στα εξής:

- Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα γενικά μειώνει την διαπερατότητα και έτσι η διείσδυση ιόντων χλωρίου και η επιφανειακή αντίσταση μειώνονται.
- Επιπροσθέτως, οι απαιτήσεις σε νερό μειώνονται εξαιτίας της βελτίωσης στην πλαστικότητα και τη εργασιμότητα του φρέσκου σκυροδέματος.

- Απαιτείται μικρή αναλογία νερού / συνδετικής ουσίας για να εγγυηθεί την ανθεκτικότητα - διάρκεια ζωής και επιπλέον απαιτούνται ενδεχομένως μεγαλύτερες περίοδοι ωρίμανσης.
- Η κατά 50% αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα είναι κερδοφόρα, σε ό,τι αφορά το κόστος, την εκτέλεση και την απόδοση. Ωστόσο, εξήχθη και το συμπέρασμα ότι ακόμα υπάρχουν πολιτικά, τεχνολογικά και οικονομικά εμπόδια.
- Για το σκυρόδεμα τα κύρια εμπόδια είναι ο μεγάλος χρόνος πήξης, η πιο αργή ανάπτυξη αντοχής, ο χρόνος ωρίμανσης και οι αβεβαιότητες της ενανθράκωσης και της αντοχής σε ψύξη – απόψυξη.
- Τέλος, οι διαφοροποιήσεις στην ποιότητα της ιπτάμενης τέφρας, το επιπλέον κόστος για τη μεταφορά και την αποθήκευσή της, το χρώμα των επιφανειών του σκυροδέματος και η έλλειψη οδηγιών και προτύπων ενδεχομένως να εμποδίσει την εμπορική αξιοποίηση σκυροδέματος με υψηλό περιεχόμενο σε ιπτάμενη τέφρα.

Δ) Το παράδειγμα της Δανίας - Δανέζικο Κέντρο για το Πράσινο Σκυρόδεμα

Οι λόγοι δημιουργίας του Κέντρου για το Πράσινο Σκυρόδεμα σύμφωνα με τους Damtoft, Glavind και Munch-Petersen (2001), τους C. V. Nielsen και M. Glavind (2007) και την ιστοσελίδα <http://www.gronbeton.dk/> ήταν οι εξής:

1. Το σκυρόδεμα είναι εν γένει ένα περιβαλλοντικά φιλικό υλικό και η συνολική του επίπτωση στο περιβάλλον ανά τόνο σκυροδέματος είναι περιορισμένη. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την παραγωγή του τσιμέντου κυμαίνονται μεταξύ **0.1 και 0.2 τόνους CO₂ ανά τόνο παραγόμενου σκυροδέματος**. Όμως επειδή η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος είναι σημαντική, οι συνολικές εκπομπές CO₂ είναι μεγάλες και έστω και μια μικρή αλλαγή στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του σκυροδέματος, θα αποτελούσε σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος. Στη Δανία π.χ. οι εκπομπές CO₂ από αυτές τις βιομηχανίες υπολογίζονται 800.000 με 1.600.000 τόνους το χρόνο που αντιστοιχούν στο 2% των συνολικών εκπομπών CO₂. Τα περιβαλλοντικά οφέλη για την κοινωνία από το πράσινο σκυρόδεμα θα είναι τεράστια. Ερευνήθηκε κατά πόσον ήταν ρεαλιστική η θεώρηση ότι η τεχνολογία που θα αναπτυσσόταν μπορούσε να υποδιπλασιάσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που συνδέονται με την παραγωγική διαδικασία του σκυροδέματος.
2. **Το σκυρόδεμα θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει λύση για κάποια περιβαλλοντικά προβλήματα**, π.χ. διατηρώντας παράλληλα την υψηλή ποιότητά του, να αξιοποιήσει με επαναχρησιμοποίηση βιομηχανικά παραπροϊόντα άλλων βιομηχανιών, των οποίων η διάθεση παραμένει ένα πρόβλημα ως τις μέρες μας.
3. Επιπλέον, **οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σκυροδέματος είναι σημαντικό να προσδιορίζονται για όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του και όχι μόνο κατά τη φάση παραγωγής του**. Βέβαια, έχει βρεθεί ότι η περιβαλλοντική επίπτωση που σχετίζεται με το σκυρόδεμα στις κατασκευές και τα κτίρια, οφείλεται περισσότερο στην παραγωγή των πρώτων υλών και λιγότερο στην χρήση των κατασκευών αυτών. Υπολογίζεται για παράδειγμα, ότι η ενεργειακή κατανάλωση για την παραγωγή ενός γραφείου ή μιας κατοικίας από οπλισμένο

σκυρόδεμα απαιτεί 500 MJ/m³. Αν υποθέσουμε 50ετή διάρκεια ζωής του κτιρίου, απαιτούνται 15.000 MJ/m³ για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης/ψύξης και ηλεκτρισμού. Δηλαδή **μόνο το 3% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στη διάρκεια του κύκλου ζωής του κτιρίου οφείλεται στο σκυρόδεμα και τα άλλα δομικά υλικά**. Επομένως τονίζεται ότι πρέπει επιπλέον, να δίνεται βάση σε **θέματα αντοχής και μόνωσης** ώστε οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κατασκευών να ειδικωθούν υπό ένα πρίσμα αειφορίας. Παρόλ' αυτά βέβαια, είναι απαραίτητη η έρευνα για δομικά υλικά με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς αυτά παρουσιάζουν συχνά και οικονομικά οφέλη και επιπλέον, δίνεται πλέον ολοένα και περισσότερη σημασία στο περιβαλλοντικό προφίλ ενός προϊόντος.

Κατάλογοι που συνοψίζουν τους κύκλους ζωής των προϊόντων από σκυρόδεμα δείχνουν ότι οι αναλογίες του μίγματος των συστατικών του παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συνολική του περιβαλλοντική επίπτωση. **Αν ληφθεί υπόψη πέρα από τον βελτιωμένο σχεδιασμό του μίγματος, η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πρώτων υλών του καθαυτών, τότε το τελικό προϊόν – σκυρόδεμα, θα έχει σημαντικά βελτιωμένη περιβαλλοντική επίδοση.**

- **Περιβαλλοντικοί και τεχνικοί στόχοι του Κέντρου**

Το Δανέζικο Κέντρο για το Πράσινο Σκυρόδεμα (Danish Centre for Green Concrete) δημιουργήθηκε το 1998 με σκοπό μια οργανωμένη προσπάθεια για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του σκυροδέματος με παράλληλη δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης. Κατά την περίοδο 1998-2002, το Κέντρο ασχολήθηκε με την ανάπτυξη νέων, περιβαλλοντικά φιλικών τύπων σκυροδέματος, καθώς και με την πρόταση τεχνολογικών λύσεων για την αξιοποίηση των πράσινων αυτών τύπων σκυροδέματος σε σύγχρονα κατασκευαστικά έργα. **Στόχος του ερευνητικού project ήταν η ανάπτυξη συνδετικών υλικών με μειωμένη περιβαλλοντική επίπτωση, δηλαδή με εξοικονόμηση ενέργειας και με αξιοποίηση υλικών (επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση) και ταυτόχρονα η μελέτη ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων από όλες τις φάσεις (σχεδιασμός, παραγωγή, χρήση, συντήρηση κ.λπ.) της κατασκευής από σκυρόδεμα**. Αναλυτικότερα, η τεχνολογία παραγωγής σκυροδέματος έπρεπε να λαμβάνει υπόψη όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής του και να περιλαμβάνει όλους τους τομείς απόδοσης, όπως:

- Μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, συρρίκνωση, ερπυσμός, κ.ά.)
- Εργασιμότητα
- Αντίσταση σε φωτιά (εκρηκτική απόσχιση, μετάδοση θερμότητας κ.ά.)
- Ανθεκτικότητα - Διάρκεια ζωής (ανθεκτικότητα σε διάβρωση, παγετό, κ.ά.)
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις (εκπομπές CO₂, ενεργειακές απαιτήσεις, δυνατότητα ανακύκλωσης κ.ά.)

Το Κέντρο έθεσε τους εξής **περιβαλλοντικούς στόχους** για το πράσινο σκυρόδεμα:

- **Τη μείωση των εκπομπών CO₂ από την βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος κατά τουλάχιστον 30%** (το οποίο θα έπρεπε ούτως ή άλλως να ελαττωθεί κατά ένα μικρότερο ποσοστό, βάσει των δεσμεύσεων της χώρας από το Πρωτόκολλο του Κυότο).
- **Την αξιοποίηση αδρανών που είναι παραπροϊόντα άλλων βιομηχανικών διεργασιών και έως τώρα κατέληγαν σε ΧΥΤΑ.**

- Την αξιοποίηση των παραπροϊόντων της ίδιας της βιομηχανίας παραγωγής σκυροδέματος.
- Τη χρήση ουδέτερων ως προς το CO₂ καυσίμων για την εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων τουλάχιστον κατά 10% στην τσιμεντοβιομηχανία.

Πέρα από τους παραπάνω στόχους, επιδίωξη ήταν να μη μειωθεί η δυνατότητα ανακύκλωσης του πράσινου σκυροδέματος και να μην αυξηθεί το περιεχόμενο σε επικίνδυνα συστατικά στα απόβρα της παραγωγικής του διαδικασίας, σε σύγκριση με τη βιομηχανία παραγωγής συμβατικού σκυροδέματος.

Επιπρόσθετα, το Κέντρο έθεσε τους εξής **τεχνικούς στόχους** που αφορούσαν την επίτευξη των ίδιων ιδιοτήτων μεταξύ πράσινου και συμβατικού σκυροδέματος ή τον προσδιορισμό τυχόν διαφοροποιήσεων μεταξύ τους:

- **Επιθετική περιβαλλοντική έκθεση - κλάση** (σε εξωτερικό περιβάλλον, οριζόντια διάταξη): **αντοχή 28 ημερών τουλάχιστον 35 MPa και αντοχή 56 ημερών τουλάχιστον στο 85% της αντοχής του σκυροδέματος αναφοράς.**
- **Παθητική περιβαλλοντική έκθεση - κλάση** (σε εσωτερικό περιβάλλον): **αντοχή 28 ημερών τουλάχιστον 12 MPa και αντοχή 56 ημερών τουλάχιστον στο 85% της αντοχής του σκυροδέματος αναφοράς.**
- **Η αντοχή σε θλίψη κατά την 28^η ημέρα θα έπρεπε να συμβαδίζει με τις ελάχιστες απαιτήσεις των Δανέζικων προτύπων για υλικά σκυροδέματος DS 481.**

Ο στόχος του Δανέζικου Κέντρου για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του σκυροδέματος μέσω της ανάπτυξης νέων συνδετικών υλικών, με ταυτόχρονη εξοικονόμηση φυσικών πόρων και με ανακύκλωση και ενεργειακή ανάκτηση άχρηστων υλικών – απορριμμάτων, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω, **επιτεύχθηκε και το Κέντρο ασχολήθηκε και με τη διάχυση των ερευνητικών αποτελεσμάτων** και συγκεκριμένα:

- Εξέδωσε ένα Παράρτημα στο Danish Road Directorate's SAB-P (paradigm for Special Working Procedures) που αφορά το πράσινο σκυρόδεμα.
- Εξέδωσε ένα Παράρτημα στο European Standard, EN 206-1 που αφορά το πράσινο σκυρόδεμα.
- Έδωσε στη δημοσιότητα διάφορα σχετικά άρθρα και αναφορές.

- **Η έρευνα για την παραγωγή πράσινου σκυροδέματος**

Το Κέντρο διερεύνησε **τέσσερις καινοτόμους τρόπους - αρχές παραγωγής πράσινου σκυροδέματος**:

1. **Τη χρήση συμβατικού τσιμέντου αλλά με παράλληλη αξιοποίηση σε μεγαλύτερο ποσοστό από ό,τι χρησιμοποιούνταν έως τότε στο σκυρόδεμα, παραπροϊόντων άλλων βιομηχανικών διεργασιών που δρουν ως συνδετικές ουσίες π.χ. υδραυλικής κονίας όπως ιπτάμενη τέφρα (fly ash) ή ποζολανικής κονίας, π.χ. πυριτική παιπάλη (silica fume).**
2. **Την αξιοποίηση παραπροϊόντων της ίδιας της βιομηχανίας παραγωγής σκυροδέματος, π.χ. της σκόνης από την θραύση των αδρανών (stone dust) και των υπολειμμάτων μίγματος σκυροδέματος (concrete slurry) από πλύση των μηχανημάτων.**
3. **Τη διερεύνηση της χρήσης παραπροϊόντων άλλων βιομηχανικών διεργασιών που δεν αξιοποιούνται προς το παρόν στο σκυρόδεμα π.χ.**

ιπτάμενη τέφρα από καύση βιοκαυσίμων (fly ash from biofuels) ή στάχτη από καύση της λάσπης που παράγεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (sewage sludge incineration ash).

4. **Τη χρήση άλλων νέων περιβαλλοντικά φιλικότερων τύπων τσιμέντου (Cement with reduced environmental impact, CREP), όπως είναι το «mineralized» τσιμέντο με ορυκτά πρόσμικτα (mineral admixtures) ως πληρωτικές ουσίες, όπως ασβεστόλιθο (limestone) ή / και τσιμέντου που παράγεται με χρήση καυσίμων που προέρχονται από κάποιο απόβλητο (waste-derived fuels).**

Οι παραπάνω νέοι τύποι τσιμέντου και συνδετικών ουσιών αξιοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τα αναφερόμενα βιομηχανικά παραπροϊόντα και συνολικά ερευνήθηκαν 14 διαφορετικοί τύποι σκυροδέματος. Η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη (σιδηροπυρίτιο) αποτελούν παραπροϊόντα άλλων βιομηχανικών διεργασιών, της παραγωγής ηλεκτρισμού και της παραγωγής πυριτίου ή σιδηροπυριτίου αντίστοιχα. Σε γενικές γραμμές, το τσιμέντο Portland δίνει πρώιμη αντοχή, η πυριτική παιπάλη δίνει την αντοχή της 28^{ης} ημέρας και η ιπτάμενη τέφρα προσδίδει στο σκυρόδεμα ρευστότητα.

Τα δείγματα με τα πιο ελπιδοφόρα αποτελέσματα μετά από έναν αρχικό έλεγχο, επιλέχθηκαν για περαιτέρω έλεγχο των μηχανικών και θερμοδυναμικών ιδιοτήτων τους, της αντίστασής τους σε φωτιά, της εργασιμότητας και της διάρκειας ζωής τους. Οι τύποι αυτοί συνοψίζονται στους Πίνακες 3.15 και 3.16 για το σκυρόδεμα σε παθητική και επιθετική περιβαλλοντική κλάση - έκθεση αντίστοιχα, όπου φαίνεται ότι συνδυάστηκαν οι τέσσερις αρχές περιβαλλοντικά φιλικής παραγωγής σκυροδέματος για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων.

Στους Πίνακες 3.17 και 3.18 γίνεται μια εκτίμηση των περιβαλλοντικών και τεχνικών στόχων για τους τύπους σκυροδέματος που παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 3.15 και 3.16, από την οποία φαίνεται ότι **όλοι οι τύποι ανταποκρίνονται σε έναν ή περισσότερους στόχους.**

Επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων

Όπως φαίνεται και από τους σχετικούς πίνακες, **επιτυγχάνονται οι περιβαλλοντικοί στόχοι για το πράσινο δανέζικο σκυρόδεμα τόσο σε παθητική όσο και σε επιθετική περιβαλλοντική έκθεση.** Μάλιστα, για τους τύπους πράσινου σκυροδέματος που εκπληρώνουν το στόχο που αφορά τη **μείωση των εκπομπών CO₂** σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα, αυτή η μείωση είναι **υψηλότερη από το στόχο του 30%** π.χ. για τον τύπο σκυροδέματος με 50% και 40% ιπτάμενη τέφρα σε παθητική και επιθετική περιβαλλοντική κλάση αντίστοιχα.

Τονίζεται ότι **για τους τύπους σκυροδέματος που δεν εκπληρώνουν το στόχο που αφορά τη μείωση των εκπομπών CO₂ ή που ακριβώς εκπληρώνουν το στόχο αυτό, ο στόχος θα πρέπει να επιτυγχάνεται από επεμβάσεις σε άλλα σημεία του κύκλου ζωής του σκυροδέματος.** Αυτό συμβαίνει π.χ. για το σκυρόδεμα που περιέχει 30% ιπτάμενη τέφρα από βιοκαύσιμα ή τσιμέντο με μειωμένη περιβαλλοντική επίπτωση.

Πίνακας 3.15 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά μιγμάτων σκυροδέματος σε παθητική περιβαλλοντική κλάση (SSIA: Sewage sludge incineration ash, FA: Fly ash, SM: Silica fume, SPT: Superplasticizer, KD: Kiln dust) (Damtoft, Glavind και Munch-Petersen, 2001).

	PR Reference	P2 50 % FA + 10 % KD	P3 17 % SSIA	P5 Concrete slurry	P6 100 % stone dust	P7 30 % FA from biofuels
Cement, kg/m ³	143	90	137	141	267	191
FA, kg/ m ³	51	128	15	52	-	-
SF, kg/m ³	10	14	10	10	-	-
SPT, kg/m ³	-	1.1	3.2	-	1.8	1.9
Equiv. w/c	0.73	0.66	0.78	0.77	0.72	0.69

Πίνακας 3.16 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά μιγμάτων σκυροδέματος σε επιθετική περιβαλλοντική κλάση (SSIA: Sewage sludge incineration ash, FA: Fly ash, SM: Silica fume, SPT: Superplasticizer, CREP: Cement with reduced environmental impact) (Damtoft, Glavind και Munch-Petersen, 2001).

	AR Reference	A0 CREP	A1 40 % FA + CREP	A3 10 % SSIA + CREP	A5 Concrete slurry	A6 50 % stone dust
Cement, kg/m ³	288	287	189	277	398	397
FA, kg/ m ³	34	32	137	-	-	-
SF, kg/m ³	17	17	18	17	-	-
SPT, kg/m ³	-	-	3.4	3.2	4.0	6.8
Equiv. w/c	0.45	0.47	0.46	0.45	0.38	0.37

Πίνακας 3.17 Εκτίμηση περιβαλλοντικών στόχων, συμπληρωματικών περιβαλλοντικών θεμάτων και αντοχής σε θλίψη για τύπους σκυροδέματος σε παθητική περιβαλλοντική κλάση (SSIA: Sewage sludge incineration ash, FA: Fly ash, KD: Kiln dust) (Damtoft, Glavind και Munch-Petersen, 2001).

Passive environmental class					
Name	P2 50 % FA + 10 % KD	P3 17 % SSIC	P5 Concrete slurry	P6 100 % stone dust	P7 30 % FA from biofuels
Environmental goal					
• CO ₂	37% ✓	-	-	-	30% ✓
• Residual product as aggregate	-	-	-	42% ✓	-
• Own residual product	-	-	✓	✓	-
• New type of residual product	-	✓	-	-	✓
• Waste-derived fuels	✓	✓	✓	✓	✓
Environmental intentions	✓	Wastewater quality? (Zn, V)	Wastewater quality? (Zn, Pb, Cu, P ₂ O ₅)	✓	Wastewater quality? Recycling? (chloride)
Compressive strength					
28-day, Mpa	26 ✓	21 ✓	23 ✓	29 ✓	28 ✓
56-day, MPa (% of reference concrete)	34 (100) ✓	31 (93) ✓	27 (80) ✓	33 (97) ✓	32 (94) ✓

Πίνακας 3.18 Εκτίμηση περιβαλλοντικών στόχων, συμπληρωματικών περιβαλλοντικών θεμάτων και αντοχής σε θλίψη για τύπους σκυροδέματος σε επιθετική περιβαλλοντική κλάση (SSIA: Sewage sludge incineration ash, FA: Fly ash, CREP: Cement with reduced environmental impact) (Damtoft, Glavind και Munch-Petersen, 2001).

Aggressive environmental class					
Name	A0 CREP	A1 40 % FA + CREP	A3 10 % SSIA + CREP	A5 Concrete slurry	A6 50 % stone dust
Environmental goal					
• CO ₂	27% (✓)	52 % ✓	29 % (✓)	-	-
• Residual product as aggregate	-	-	-	-	20 % ✓
• Own residual product	-	-	-	✓	✓
• New type of residual product	-	-	✓	-	✓
• Waste-derived fuels	✓	✓	✓	✓	✓
Environmental intentions	✓	✓	Wastewater quality? (Zn, Pb, Cu, P ₂ O ₅)	✓	✓
Compressive strength					
28-day, Mpa	51 ✓	58 ✓	58 ✓	64 ✓	62 ✓
56-day MPa, (% of reference concrete)	58 ✓ (112)	61 ✓ (117)	68 ✓ (130)	68 ✓ (130)	63 ✓ (121)

Επιπλέον, για τα μίγματα που περιέχουν ειδικά πληρωτικά υλικά και στάχτη από καύση της λάσπης εγκατάστασης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, τα οποία περιέχουν υψηλές ποσότητες βαρέων μετάλλων κ.ά., όπως Zn, V, Pb, Cu and P₂O₅, σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland ή την ιπτάμενη τέφρα από την καύση του άνθρακα, **θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω τα προβλήματα** που προκύπτουν από τα απόνερα της βιομηχανίας παραγωγής σκυροδέματος. Ωστόσο, **αν το νερό αυτό ανακυκλώνεται μέσα στη βιομηχανία, το πρόβλημα λύνεται.**

Για το σκυρόδεμα που περιέχει ιπτάμενη τέφρα από βιοκαύσιμα θα πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω οι επιπτώσεις του αυξημένου περιεχομένου σε χλώριο στα απόνερα αλλά και στις δυνατότητες ανακύκλωσής του.

Τέλος, σε ό,τι αφορά συμπληρωματικά περιβαλλοντικά θέματα, δίνεται βαρύτητα στις οδηγίες του δανέζικου οργανισμού προστασίας του περιβάλλοντος που καθορίζουν ορισμένες ουσίες που πρέπει να αποφεύγεται η χρήση τους όπως είναι π.χ. το υπερρευστοποιητικό που χρησιμοποιείται σε συμβατικές βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος, το οποίο εδώ αντικαθίσταται από **υπερρευστοποιητικό που δεν περιέχει φορμαλδεΐδη.**

Επίτευξη τεχνικών στόχων

Επιπλέον των περιβαλλοντικών στόχων, παράλληλα φαίνεται ότι επιτυγχάνονται και οι τεχνικοί στόχοι για τις μηχανικές ιδιότητες και μάλιστα αυτές δεν διαφέρουν ιδιαίτερα από τις αντίστοιχες του σκυροδέματος αναφοράς.

Σε ό,τι αφορά την αντοχή σε θλίψη, για τύπους σκυροδέματος σε επιθετική περιβαλλοντική κλάση, οι αντοχές της 56^{ης} ημέρας σε θλίψη είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αντοχές αναφοράς που σημαίνει ότι η

περιβαλλοντική επίπτωση μπορεί να ελαττωθεί περαιτέρω, διατηρώντας την ίδια αντοχή όπως και στο σκυρόδεμα αναφοράς. Η μόνη εξαίρεση είναι το σκυρόδεμα που περιέχει υπολείμματα μίγματος σκυροδέματος (concrete slurry) σε παθητική περιβαλλοντική κλάση, όπου η αντοχή την 56^η ημέρα είναι μόνο το 80% της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος αναφοράς. Ωστόσο, είναι γνωστό από τον αρχικό έλεγχο των δειγμάτων ότι ο στόχος της επίτευξης συγκεκριμένης αντοχής της 56^{ης} ημέρας είναι δυνατόν να επιτευχθεί.

Όσο για τον έλεγχο του εργάσιμου, τα πρώτα αποτελέσματα έδειξαν ότι μερικοί τύποι πράσινου τσιμέντου ίσως χάσουν εργασιμότητα πιο σύντομα από το σκυρόδεμα αναφοράς, ίσως είναι πιο κολλώδη ή ίσως απαιτούν περισσότερο χρόνο ωρίμανσης (π.χ. σκυρόδεμα με στάχτη από καύση λάσπης από εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που περιέχει και χημικά πρόσμικτα). Πιστεύεται ότι μερικά από αυτά τα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με τη βελτιστοποίηση του τύπου και της ποσότητας των χημικών προσμίκτων.

Σχετικά με τη διάρκεια ζωής, από τα πρώτα αποτελέσματα φάνηκε ότι το πράσινο σκυρόδεμα A1, το οποίο περιείχε αρκετά υψηλή ποσότητα ιπτάμενης τέφρας, αντιμετώπιζε πρόβλημα ανάπτυξης ικανοποιητικής αντίστασης σε παγετό. Επιπρόσθετα, σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα, παρατηρήθηκε αυξημένη ενανθράκωση, ενώ η αντίσταση σε χλωριόντα ήταν καλή. Ακόμα, το πράσινο σκυρόδεμα A3 με στάχτη από καύση της λάσπης εγκατάστασης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων έχει περιορισμένη αντίσταση στον παγετό αλλά επιπλέον παρουσιάζει καλή αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων. Τέλος, τα αποτελέσματα από τα πράσινα σκυροδέματα A5 με concrete slurry και A6 με σκόνη από θραύση αδρανών δείχνουν ότι έχουν ελαφρώς μειωμένη αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων. Αυτό ενδεχομένως δεν οφείλεται στην προσθήκη του concrete slurry και της σκόνης αδρανών, αλλά οφείλεται στον τύπο σκυροδέματος (σουηδικό), που έχει υψηλό περιεχόμενο σε τσιμέντο και καθόλου ιπτάμενη τέφρα ή σιδηροπυρίτιο και σε γενικές γραμμές έχει χαμηλότερη αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων από ένα σκυρόδεμα με ποζολανικά συστατικά όπως είναι το δανέζικο σκυρόδεμα αναφοράς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι έρευνες που σχετίστηκαν α) με την ανάπτυξη τσιμέντου με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (χρήση ορυκτών προσμίκτων ή / και αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων) και β) με την αξιοποίηση στάχτης από καύση της λάσπης εγκατάστασης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

- **Χρήση άλλων νέων περιβαλλοντικά φιλικότερων τύπων τσιμέντου**

- 1. Τσιμέντο με πληρωτικό υλικό ασβεστόλιθο**

Το λεγόμενο «mineralized» τσιμέντο ή τσιμέντο που περιέχει ορυκτά πρόσμικτα είναι ένα από τα κεντρικά projects. Το τσιμέντο αυτό βασίζεται σε κλίνκερ το οποίο στην περίπτωση αυτή παράγεται με μικρές προσθήκες πληρωτικής ουσίας CaSO₄ και CaF₂ με αποτέλεσμα μια μείωση της τάξης του 5% στην ενεργειακή κατανάλωση και μια αύξηση της τάξης του 5-10% στην αντοχή του τσιμέντου την 28^η ημέρα. Η μεγαλύτερη αντοχή δίνει τη δυνατότητα να ελαττωθεί ακόμα περισσότερο το περιεχόμενο σε τσιμέντο, με αποτέλεσμα περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανά m³ σκυροδέματος χωρίς να γίνεται οποιοσδήποτε συμβιβασμός στην αντοχή και τη διάρκεια ζωής του.

Η επιτυχής εισαγωγή ενός υψηλής αντοχής ασβεστολιθικής σύνθεσης τσιμέντου που βασίζεται σε «mineralized» κλίνκερ, έχει οδηγήσει σε περαιτέρω μειώσεις στο

απαιτούμενο περιεχόμενο κλίνκερ στο σκυρόδεμα. Το πληρωτικό υλικό σε αυτό το τσιμέντο είναι το 14% και το νέο ασβεστολιθικό τσιμέντο Portland έχει σημαντικά μεγαλύτερη πρώιμη και όψιμη αντοχή (EN 196 κονίαμα 1 και αντοχή 28^{ης} ημέρας 27 και 66 MPa αντίστοιχα). Αυτό κατέστη δυνατό λόγω του συνεργατικού αποτελέσματος που επέφερε το «mineralized» κλίνκερ και το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές όπως σε προκατασκευασμένες κατασκευές, όπου απαιτούνται υψηλές πρώιμες αντοχές χωρίς να απαιτείται η αύξηση του περιεχόμενου τσιμέντου.

2. Τσιμέντο που παράγεται από εναλλακτικά καύσιμα

Επιπλέον, στόχο του Aalborg Portland Group, μίας από τις εταιρίες που συμμετείχαν στην έρευνα, αποτέλεσε η αντικατάσταση τουλάχιστον του 1/3 των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα στον μεγαλύτερο από τους κλιβάνους μιας μεγάλης βιομηχανίας παραγωγής της. Αυτό θα επιτυγχάνονταν με την μετατροπή κάποιας καύσιμης ύλης αποβλήτων σε εναλλακτικό καύσιμο, το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στην παραγωγή τσιμέντου. Όταν ολοκληρωθούν οι αλλαγές που προωθούνται, η εκπομπή CO₂ από την καύση καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία αναμένεται να μειωθεί τουλάχιστον στα 2/3 των αρχικών της επιπέδων.

3. Αξιοποίηση στάχτης από καύση λάσπης από εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Η παραγωγή ιπτάμενης τέφρας έχει μειωθεί σημαντικά στη Δανία. Ο λόγος είναι ότι η δανέζικη κυβέρνηση έχει υιοθετήσει πολιτικές μείωσης των εκπομπών CO₂ με αποτέλεσμα τη σταδιακή ελάττωση της παραγωγής ηλεκτρισμού με καύση συμβατικών καυσίμων (άνθρακα). Έτσι, **ένας από τους στόχους του Δανέζικου Κέντρου για το Πράσινο Σκυρόδεμα είναι η έρευνα για υποκατάστατα της ιπτάμενης τέφρας που να είναι υλικά εύκολα διαθέσιμα στη Δανία**, όπως π.χ. η διερεύνηση αξιοποίησης της στάχτης από την καύση της λάσπης εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (sewage sludge incineration ash, SSIA). Η έρευνα αυτή έχει δώσει ιδιαίτερα ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Στη Δανία η ετήσια παραγωγή τέτοιας στάχτης είναι 10.000 – 15.000 τόνοι και απορρίπτεται στους ΧΥΤΑ. Η ποιότητά της ποικίλει και εξαρτάται από τη χωρική κατανομή της. Αν προέρχεται από βιομηχανοποιημένες περιοχές ίσως να περιέχει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων ή βλαβερών οργανικών ουσιών. Γενικότερα, ως προς τη χημική της σύνθεση, η στάχτη αυτή διαφέρει σημαντικά από την κανονική ιπτάμενη τέφρα καθώς έχει μεγαλύτερο περιεχόμενο σε CaO και χαμηλότερο περιεχόμενο σε SiO₂ και Al₂O₃ (Πίνακας 3.19).

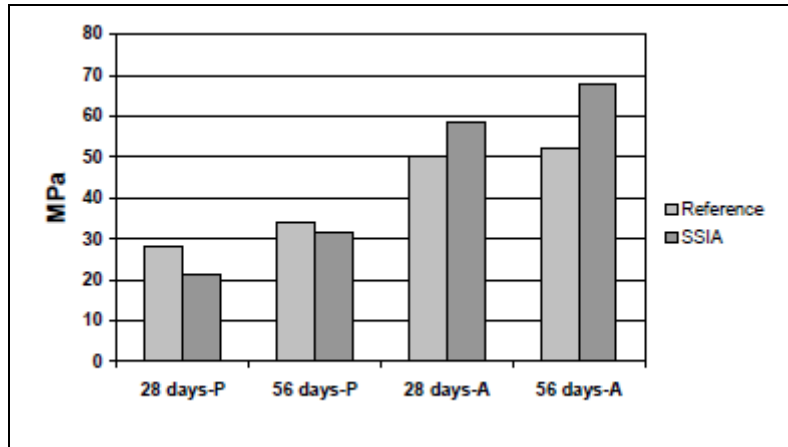
Για την παραγωγή σκυροδέματος για παθητικές αλλά και επιθετικές περιβαλλοντικές κλάσεις, διερευνήθηκε η προσθήκη διαφορετικών ποσοτήτων SSIA ως υποκατάστατο της κανονικής ιπτάμενης τέφρας από την καύση του άνθρακα. Η διαφορά μεταξύ των τύπων σκυροδέματος με SSIA ήταν απλώς ότι για παθητική και επιθετική περιβαλλοντική κλάση, η περιεχόμενη ιπτάμενη τέφρα κατά 17 και 10% αντίστοιχα, αντικαθίστανται από SSIA (Πίνακες 3.17 και 3.18). Τα βασικά αποτελέσματα ήταν:

- **Τα σκυροδέματα που προέκυψαν βρέθηκε ότι πληρούν τα περιβαλλοντικά κριτήρια που θέτει το Δανέζικο Κέντρο για το Πράσινο Σκυρόδεμα, εισάγοντας νέους τύπους υλικών – συστατικών του σκυροδέματος που έως τώρα κατέληγαν σε ΧΥΤΑ ή αλλού.**

- Για το σκυρόδεμα σε επιθετική περιβαλλοντική κλάση, επίσης επιτυγχάνονται τα περιβαλλοντικά κριτήρια αξιοποίησης καυσίμων που είναι παραπροϊόντα – απόβλητα βιομηχανικών διεργασιών στην τσιμεντοβιομηχανία (Πίνακας 3.18).
- Η αντοχή του σκυροδέματος που περιέχει SSIA είναι στα ίδια επίπεδα με αυτήν του σκυροδέματος αναφοράς. Επιτυγχάνονται δηλαδή οι στόχοι αντοχής 28 ημερών τουλάχιστον 12 MPa και αντοχής 56 ημερών τουλάχιστον στο 85% της αντοχής του σκυροδέματος αναφοράς. Σε επιθετική περιβαλλοντική κλάση μάλιστα, οι αντοχές της 28^{ης} και 56^{ης} ημέρας είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές του συμβατικού σκυροδέματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.21.
- Η αντίσταση στον παγετό του σκυροδέματος που περιέχει SSIA δεν ήταν ικανοποιητική. Τα τεστ έγιναν βάσει του σουηδικού προτύπου SS 13 72 44.
- Ο έλεγχος διεύθυνσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα διεξήχθη σύμφωνα με την CTH μέθοδο που έχει αναπτυχθεί από τον Tang Luiping. Σύμφωνα με αυτήν, το σκυρόδεμα που περιέχει SSIA επέδειξε καλή αντίσταση στη διεύθυνση χλωριόντων (συντελεστής διάχυσης χλωριόντων $\leq 8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

Πίνακας 3.19 Χημική σύνθεση της στάχτης από λάσπη εγκατάστασης επεξεργασίας αποβλήτων και της ιπτάμενης τέφρας από την καύση άνθρακα (DM: Dry-matter) (Damtoft, Glavind και Munch-Petersen, 2001).

Chemical analysis	Unit	Sewage sludge incineration ash	Fly ash from coal combustion
CaO	% DM	16,85	2,78
SiO ₂	% DM	28,44	59,74
Fe ₂ O ₃	% DM	13,89	7,57
Al ₂ O ₃	% DM	7,90	21,31
TiO ₂	% DM	1,61	0,98
P ₂ O ₅	% DM	19,62	0,34
MgO	% DM	3,07	1,35
Chloride	% DM	0,098	0,004
SO ₃	% DM	1,85	0,65
K ₂ O-total	% DM	2,54	0,65
Na ₂ O total	% DM	1,36	0,52
Na ₂ O-equiv. Total	% DM	3,03	1,84
Cr	mg/kg	136	137
Zn	mg/kg	2810	181
Pb	mg/kg	534	34
Cu	mg/kg	971	77
Ni	mg/kg	109	100
V	mg/kg	61	268
Co	mg/kg	49	32
Mn	mg/kg	566	313
Tl	mg/kg	<20	<20
Cd	mg/kg	<10	<10
As	mg/kg	<30	<30
Hg	mg/kg	0,4	0,2
Loss on ignition	% DM	3,04	3,37
Water content	%	9,2	0,3



Εικόνα 3.21 Αντοχή για σκυρόδεμα αναφοράς και σκυρόδεμα με στάχτη από λάσπη εγκατάστασης επεξεργασίας αποβλήτων για παθητική και επιθετική περιβαλλοντική κλάση (P: Παθητική περιβαλλοντική κλάση, A: Επιθετική περιβαλλοντική κλάση, SSIA: στάχτη από λάσπη εγκατάστασης επεξεργασίας αποβλήτων) (Damtoft, Glavind και Munch-Petersen, 2001).

Τέλος, για το σκυρόδεμα που περιέχει SSIA σε παθητική περιβαλλοντική κλάση παρατηρήθηκε μόνο ένα μικρό πρόβλημα εργασιμότητας, δηλαδή απαιτήθηκε μεγάλος χρόνος ωρίμανσης. Ωστόσο, αυτό όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να επιλυθεί με τη βελτιστοποίηση του τύπου και της ποσότητας των χημικών προσμίκτων.

Βάσει των πρώτων αποτελεσμάτων, **το σκυρόδεμα που περιέχει SSIA αξιολογείται ως ένας τύπος σκυροδέματος με ποζολανική σύνθεση που μπορεί να αξιοποιηθεί στο μέλλον στην βιομηχανία.**

- **Ανάλυση κύκλου ζωής: Δομικές λύσεις για θέματα λειτουργίας και συντήρησης**

Κάποια άλλα υπό εξέλιξη projects αφορούν την λειτουργία και τη συντήρηση των κατασκευών που αποτελούνται από πράσινο σκυρόδεμα και δομικές λύσεις για το πράσινο σκυρόδεμα για όλη τη διάρκεια ζωής του.

Έγινε μάλιστα μια μελέτη περίπτωσης για να συγκριθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής μια τυπικής δανέζικης γέφυρας από συμβατικά υλικά με εκείνες της κατασκευής μιας πράσινης γέφυρας τα υλικά της οποίας φαίνονται στον Πίνακα 3.20. Βέβαια, παράγοντες όπως η επιπρόσθετη προστασία (οπλισμός) της κατασκευής επηρεάζουν τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την ανάλυση κύκλου ζωής. Για τα υποστηλώματα της γέφυρας, θεωρήθηκε ότι ενδεχομένως να είναι πιο «πράσινα» εάν χρησιμοποιηθεί συμπαγές ενισχυμένο σκυρόδεμα (Compact Reinforced Concrete, CRC), ένα ινώδες ενισχυμένο σκυρόδεμα εξαιρετικής αντοχής, παρά ένα σκυρόδεμα χωρίς οπλισμό επειδή η διάρκεια ζωής του αναμένεται μεγαλύτερη, παρόλο που οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή του CRC είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες του πράσινου σκυροδέματος.

Επιπρόσθετα, η συντήρηση και οι σχετικές εργασίες στη γέφυρα αναμενόταν να έχουν μια περιβαλλοντική επίπτωση.

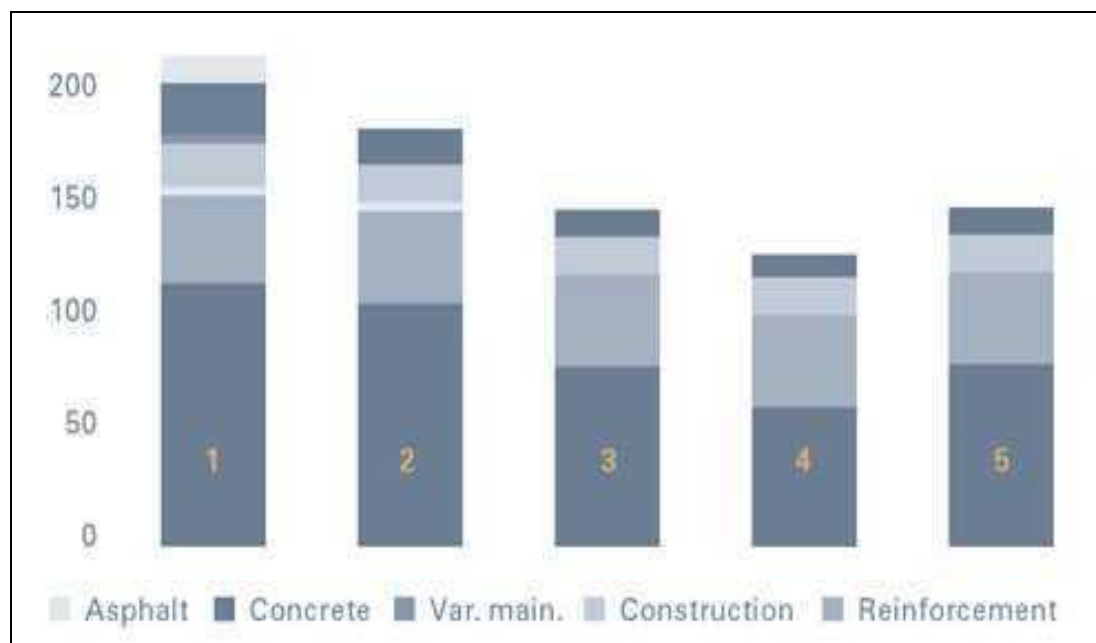
Το project επίδειξης, δηλαδή η γέφυρα, ολοκληρώθηκε το 2002 και αποτελεί μια απτή απόδειξη ότι οι πράσινοι τύποι σκυροδέματος μπορούν να αξιοποιηθούν στην πράξη σε έργα μεγάλης κλίμακας. Συμβάλλει επίσης σε παρατηρήσεις της διάρκειας

ζωής των νέων τύπων σκυροδέματος αφού εκτεθούν στις πραγματικές συνθήκες του καιρού της Δανίας.

Πίνακας 3.20 Δομικά συστατικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από γέφυρες από πράσινο σκυρόδεμα (Damtoft, Glavind και Munch-Petersen, 2001).

Structural component	Concrete type	Supplementary protection	Expected service life
Bridge deck	Green concrete	Waterproofing membrane	Short
		Top layer of high-strength mortar ¹⁾	Medium to long
		Top layer (35 mm) of fibre reinforced concrete ¹⁾	Medium
Column	CRC ²⁾	None	Long
	Green concrete	None	Medium
		Covering of stainless steel	Long
Edge beam	Green concrete	None	Short to medium

1) Without waterproofing membrane 2) CRC-Compact Reinforced Concrete.



Εικόνα 3.22 Οι συνολικές εκπομπές CO₂ για γέφυρες που κατασκευάστηκαν από διαφορετικούς τύπους πράσινου σκυροδέματος (σε τόνους CO₂) για τις εξής κατηγορίες (Damtoft, Glavind και Munch-Petersen, 2001):

1. Συμβατική κατασκευή με συμβατικό οπλισμό και άσφαλτο.
2. Κατασκευή με οπλισμό από ανοξείδωτο χάλυβα χωρίς τη χρήση ασφάλτου στο κατάστρωμα της γέφυρας.
3. Κατασκευή με οπλισμό από ανοξείδωτο χάλυβα χωρίς τη χρήση ασφάλτου και με χρήση πράσινου σκυροδέματος με περιβαλλοντικά φιλικό τσιμέντο (χρήση πληρωτικού υλικού και εναλλακτικών καυσίμων).
4. Κατασκευή με οπλισμό από ανοξείδωτο χάλυβα χωρίς τη χρήση ασφάλτου και με χρήση πράσινου σκυροδέματος με υψηλό περιεχόμενο σε ιπτάμενη τέφρα.
5. Κατασκευή με οπλισμό από ανοξείδωτο χάλυβα χωρίς τη χρήση ασφάλτου και με πράσινο σκυρόδεμα με στάχτη από λάσπη εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

Εκτός από την ανάπτυξη πράσινων τύπων σκυροδέματος, το Κέντρο ανέλυσε επίσης διάφορες στρατηγικές για να καταστήσει τις κατασκευές από σκυρόδεμα περιβαλλοντικά φιλικότερες και πρότεινε ορισμένες δομικές λύσεις όπως:

- Αλλαγές στον δομικό σχεδιασμό (όπως π.χ. στο κατάστρωμα γεφυρών να μη χρησιμοποιείται άσφαλτος ή φράγμα υγρασίας).
- Τη χρήση διαφόρων στρατηγικών συντήρησης και λειτουργίας (ανοξείδωτος χάλυβας ή συμβατικός οπλισμός).

Οι λύσεις αυτές έχουν σκοπό τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής μιας κατασκευής από σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα των της έρευνας για τις εκτιμώμενες εκπομπές CO₂ από το στάδιο της κατασκευής των διαφόρων τύπων γέφυρας που διεξήγαγε το Κέντρο, συνοψίζονται στην Εικόνα 3.22. Χαμηλότερες εκπομπές CO₂ έχει όπως φαίνεται, η κατασκευή με οπλισμό από ανοξείδωτο χάλυβα χωρίς τη χρήση ασφάλτου και με χρήση πράσινου σκυροδέματος με υψηλό περιεχόμενο σε ιπτάμενη τέφρα και ακολουθεί η κατασκευή γέφυρας με οπλισμό από ανοξείδωτο χάλυβα χωρίς τη χρήση ασφάλτου και με χρήση πράσινου σκυροδέματος με περιβαλλοντικά φιλικό τσιμέντο (χρήση πληρωτικού υλικού και εναλλακτικών καυσίμων).

• Σύνοψη Ερευνητικών Αποτελεσμάτων

Το Κέντρο έχει αναπτύξει διάφορες λύσεις όσον αφορά τη σύνθεση των πράσινων τύπων σκυροδέματος που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν άμεσα σε βιομηχανική κλίμακα. Η έρευνα έδειξε ότι οι τύποι αυτοί σκυροδέματος πληρούν τις απαιτήσεις που ισχύουν για το συμβατικό σκυρόδεμα και έτσι είναι κατάλληλοι τόσο για έργα μεγάλης κλίμακας όσο και για κατοικίες. Αναλυτικότερα:

- Αποδείχτηκε ότι κάποιοι τύποι σκυροδέματος μπορούν να παραχθούν με 30% ή και μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών CO₂. Αυτή η μείωση επιτεύχθηκε με την αντικατάσταση μεγάλων ποσοτήτων τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα ή / και με τη χρήση τύπων τσιμέντου που απαιτούν λιγότερη ενέργεια κατά την παραγωγή τους.
- Αναπτύχθηκαν νέοι τύποι σκυροδέματος που αξιοποιούν ως αδρανή παραπροϊόντα άλλων βιομηχανικών διεργασιών, όπως π.χ. τη στάχτη από την καύση της λάσπης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ή ιπτάμενη τέφρα από την καύση βιοκαυσίμων.
- Αναπτύχθηκαν νέοι τύποι σκυροδέματος που επαναχρησιμοποιούν ορισμένα από τα παραπροϊόντα της ίδιας της βιομηχανίας παραγωγής σκυροδέματος, όπως την σκόνη (stone dust) από την παραγωγή αδρανών με θραύση και τα υπολείμματα του μίγματος του σκυροδέματος (concrete slurry) από την πλύση των μονάδων ανάμιξης και τα φορτηγά μεταφοράς του σκυροδέματος.
- Αποδείχτηκε ότι είναι εφικτή η χρήση νέων περιβαλλοντικά φιλικότερων τύπων τσιμέντου, όπως τσιμέντο με πληρωτικό υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου Portland ή τσιμέντο που παράγεται από εναλλακτικά καύσιμα. Στην τελευταία περίπτωση, μάλιστα, η αντικατάσταση του 33.3% των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία εκτιμάται ότι μπορεί να ελαττώσει κατά τουλάχιστον στα 66.6% τις εκπομπές CO₂.

Συνολικά, τα ερευνητικά αποτελέσματα από το Δανέζικο Κέντρο για το Πράσινο Σκυρόδεμα αποδεικνύουν ότι υπάρχει τρόπος να ελαττωθούν οι περιβαλλοντικές

επιπτώσεις από την παραγωγική βιομηχανία σκυροδέματος με τη χρήση πιο πράσινου τσιμέντου και με τη βέλτιστη αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, είτε της ίδιας της βιομηχανίας παραγωγής σκυροδέματος είτε άλλων βιομηχανικών διεργασιών, ως συστατικών του σκυροδέματος και με τη βελτιστοποίηση των μεθόδων λειτουργίας και συντήρησης των αντίστοιχων κατασκευών. Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν για την ακρίβεια, ότι όλοι οι περιβαλλοντικοί στόχοι μπορούν να επιτευχθούν, γεγονός που σημαίνει ότι τα προσδοκώμενα οφέλη για την κοινωνία είναι άκρως σημαντικά. Είναι ρεαλιστική η εκτίμηση ότι εάν αξιοποιηθούν στις νέες κατασκευές οι προτεινόμενες καινοτομίες, αναμένεται να ελαττωθούν σημαντικά και οι εκπομπές CO₂, που σε επίπεδο χώρας θα σήμαινε για τη Δανία ελάττωση των συνολικών εκπομπών κατά 1%.

Ε) Πράσινο σκυρόδεμα με χρήση οξειδίου του μαγνησίου

«Έλληνας έκανε το τσιμέντο... πράσινο» και «Σκυρόδεμα που δεν ρυπαίνει και ανακυκλώνεται, ανακάλυψε ο ερευνητής κ. Νικόλας Βλασόπουλος», ήταν ο τίτλος άρθρου της εφημερίδας Καθημερινή στις 8/5/2010. Ο κ. Νικόλαος Βλασόπουλος, διδάκτορας και συνεργάτης του Imperial College του Λονδίνου, έχει ανακαλύψει ένα νέο είδος σκυροδέματος, το οποίο μπορεί να παραχθεί με πολύ μικρότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Υπολογίζεται πως, **στο χειρότερο σενάριο, το οικολογικό τσιμέντο προκαλεί κατά 85% τουλάχιστον λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου.** Υπό προϋποθέσεις, μάλιστα, **το υλικό αυτό δύναται να έχει μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ως προς το διοξείδιο του άνθρακα, δηλαδή να μην απελευθερώνει CO₂ κατά την παραγωγή του.**

Μάλιστα, το περιοδικό Technology Review του MIT συμπεριέλαβε το τσιμέντο της Novacem στις δέκα αναδύμενες τεχνολογίες για το 2010, ενώ επίσης ανακηρύχθηκε καλύτερη καινοτομία στο συνέδριο ενεργειακών τεχνολογιών που διοργάνωσε το πρακτορείο Bloomberg. **Το περιβαλλοντικό όφελος μεταφράζεται και σε οικονομικό, καθώς τα επόμενα χρόνια η τσιμεντοβιομηχανία θα ενταχθεί στο εμπόριο ρύπων, πληρώνοντας για τους τόνους διοξειδίου του άνθρακα που εκλύει στην ατμόσφαιρα.** Η εταιρεία Novacem, που έχει εδώ και λίγα χρόνια ιδρύσει ο κ. Βλασόπουλος μαζί με άλλους ερευνητές, υπόσχεται πως το συγκεκριμένο προϊόν θα κυκλοφορήσει στην αγορά σε λιγότερο από μία πενταετία. Η εταιρεία ήδη σχεδιάζει το πρώτο πιλοτικό εργοστάσιο, το οποίο θα μπορεί να παράγει ετησίως 25.000 τόνους οικοδομικού υλικού.

Σύμφωνα με το δημοσίευμα της Καθημερινής, οι παράγοντες που κάνουν το νέο τσιμέντο «σύμμαχο» της προστασίας του περιβάλλοντος, είναι οι εξής:

- **Το τσιμέντο της Novacem παρασκευάζεται κυρίως από οξείδιο του μαγνησίου, χωρίς να χρησιμοποιείται δηλαδή καθόλου ασβεστόλιθος, κάτι που σημαίνει πως εξαρχής έχει κατά 50% μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα.**
- Εξίσου σημαντικό όμως είναι πως **το μίγμα που αναπτύχθηκε χρειάζεται να θερμανθεί σε θερμοκρασίες που δεν ξεπερνούν τους 700 βαθμούς Κελσίου, με συνέπεια να μπορούν να χρησιμοποιηθούν καύσιμα πολύ πιο φιλικά στο περιβάλλον.** Όπως για παράδειγμα βιοκαύσιμα, καύσιμες ύλες δηλαδή φυτικής προέλευσης, οι οποίες όταν καταναλωθούν, απελευθερώνουν τόσο διοξείδιο του άνθρακα όσο δέσμευσαν και τα φυτά από τα οποία αυτές προήλθαν. Σε μία τέτοια περίπτωση μηδενίζονται οι ρύποι που οφείλονται στη

θέρμανση του μίγματος, με συνέπεια η παραγωγή του τσιμέντου με μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ως προς τις εκπομπές CO₂.

- Στην πορεία των ερευνών, φάνηκε πως το προϊόν της Novacem έχει και άλλα σημαντικά οικολογικά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα ότι είναι δυνατόν να ανακυκλωθεί πλήρως μετά την κατεδάφιση ενός κτιρίου, ενώ αντίθετα το συμβατικό τσιμέντο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί μόνο σαν χαμηλής ποιότητας δομικό υλικό.
- Τέλος, οι πρώτες μελέτες για τα κοιτάσματα πυριτικού μαγνησίου, από το οποίο προέρχεται το οξείδιο του μαγνησίου, δηλαδή η πρώτη ύλη, μιλούν για 10.000 δισ. τόνους, αρκετούς δηλαδή για να καλύψουν τη ζήτηση για μερικούς αιώνες. Το «πράσινο» σκυρόδεμα αναμένεται να είναι επίσης εφάμιλλο με το τσιμέντο Πόρτλαντ σε μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

ΣΤ) Παραγωγή σκυροδέματος με ελληνική φλοιού ρυζιού (ΤΦΡ)

Πέρα από τα ευρέως γνωστά υλικά (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία κ.ά.) που η έρευνα έχει καταδείξει ως αποτελεσματικούς μερικούς υποκαταστάτες του τσιμέντου, στα πλαίσια του προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα» της Γενικής Γραμματείας Έρευνας Τεχνολογίας, αξιολογήθηκε η τέφρα φλοιού ρυζιού (ΤΦΡ) που παράγεται στις εγκαταστάσεις της ελληνικής βιομηχανίας Agrino. Ο ερευνητής Σ. Κ. Αντίοχος και οι συνεργάτες του χρησιμοποιώντας δοκιμές που σχετίζονται με την επίδραση του παραπροϊόντος στη μηχανική συμπεριφορά, την ανθεκτικότητα στη διείσδυση χλωριόντων κ.λπ., κατέληξαν σε πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Μετά από μια ελεγχόμενη συμπληρωματική άλεση, η οποία δεν είναι ενεργοβόρος (δεδομένου ότι η ΤΦΡ αλέθεται πολύ εύκολα), η προσθήκη της ελληνικής τέφρας ρυζιού στο σκυρόδεμα, έδωσε τιμές των παραπάνω ιδιοτήτων τέτοιες που δικαιολογούν την πολύ καλή ποζολανική συμπεριφορά της που εκτιμάται καλύτερη από αυτήν των ιπτάμενων τεφρών. Οι ερευνητές Givi *et. al* (2010) σε Review άρθρο τους, συνοψίζουν συναφή ερευνητικά συμπεράσματα και από την ανασκόπισή τους ουσιαστικά επαληθεύουν τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε και η προαναφερθείσα ελληνική ερευνητική ομάδα.

Η ΤΦΡ μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλώς κονιορτοποιημένη και ομογενοποιημένη σε δομικές εφαρμογές. Υπάρχει δυνατότητα προσθήκης σε τσιμέντα ως δευτερεύον συστατικό (filler) διαθέτοντας και συνδετικές ιδιότητες ως ποζολανικό υλικό, με δυνατότητα αντικατάστασης μέρους του κλίνκερ τσιμέντου. Επιπλέον, μπορεί να προστεθεί απευθείας σε σκυροδέματα βελτιώνοντας σημαντικά τις αντοχές και ιδιαίτερα την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων και την επερχόμενη διάβρωση των χαλύβδινων οπλισμών. Τα εντυπωσιακά αποτελέσματα που προκύπτουν από την υποκατάσταση αδρανών με ΤΦΡ σε σκυρόδεμα, δικαιολογούν την ανάπτυξη σκυροδέματος υψηλών αντοχών για εξειδικευμένες χρήσεις, ως νέο δομικό υλικό. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς η θεαματική συμπεριφορά του ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά, θα προδιέθετε θετικά τους εν δυνάμει χρήστε του υλικού (τις τσιμεντοβιομηχανίες) οι οποίες θα παρέβλεπαν το βασικό μειονέκτημα του υλικού που σίγουρα δεν είναι η ποιότητά του αλλά το περιορισμένο της παραγωγής του. Ποσότητες της τάξης των 500 τόνων, που εκτιμάται ότι είναι η συνολική ετήσια παραγωγή της Agrino, θεωρούνται αμελητέες για ενσωμάτωση του υλικού στη συνηθισμένη παραγωγή της τσιμεντοβιομηχανίας.

3.5 ΈΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΔΙΑ ΜΕΣΟΥ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Εδώ αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα της έρευνας για τη σχέση σκυροδέματος και ραδονίου, που συνοψίζονται στην αποφυγή της χρήσης ραδιενεργών αδρανών στο σκυρόδεμα (π.χ. ραδιενεργή ιπτάμενη τέφρα ή γρανίτης) και στην διερεύνηση της δράσης του σκυροδέματος ως φράγματος της φυσικής ραδιενέργειας (ραδονίου) του εδάφους.

Οι Lambert και Renken (1999) μελέτησαν την **αξιοποίηση διαφόρων βιομηχανικών παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα** (Πίνακας 3.21) με σκοπό την **ελαχιστοποίηση της μεταφοράς της φυσικής ραδιενέργειας, δηλαδή του αερίου ραδονίου μέσω του σκυροδέματος**. Χρησιμοποίησαν μια κλασματική βιομηχανική πειραματική διάταξη για την αναγνώριση των στατιστικά βέλτιστων μιγμάτων, η οποία ήταν βασισμένη σε μετρήσεις διάχυσης αερίου ραδονίου. **Από τα τρία υπό εξέταση μίγματα μόνο ένα αποδείχτηκε αποτελεσματικός επιβραδυντής στη μεταφορά ραδονίου, αυτό που περιείχε ιπτάμενη τέφρα (fly ash) και σκωρία υψικαμίνου (slag)**. Παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη ελάττωση του συντελεστή διάχυσης του αερίου ραδονίου (56,6%), του συντελεστή αέριας διαπερατότητας (65,7%) και του πορώδους (31,3%) καθώς και αύξηση της αντοχής σε θλίψη (21,1%) σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Από την έρευνα αυτή **καταδείχτηκε η σημασία της μελλοντικής έρευνας στον τομέα αξιοποίησης βιομηχανικών παραπροϊόντων στη δομή του σκυροδέματος**.

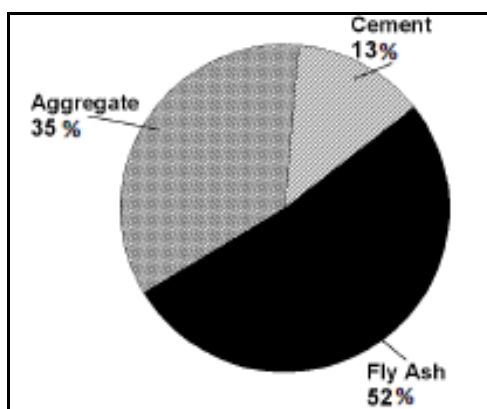
Πίνακας 3.21 Περιγραφή βιομηχανικών παραπροϊόντων που ερευνήθηκαν (Lambert & Renken, 1999).

Fly Ash	Type C fly ash produced at the Pleasant Prairie power plant operated by Wisconsin Electric Power Company. Light brown/tan color fine powder. Tested as highly cementitious when a small quantity was mixed alone with water and allowed to harden.
Bottom Ash	Produced at the Sheybogan power plant operated by Wisconsin Power and Light. Coarse sand-like in appearance with a very small amount of larger prune sized chunks scattered in between.
Slag	Produced at the Sheybogan power plant operated by Wisconsin Power and Light. Black glassine irregular shaped bits about 1mm x 1mm in size on average. A few larger marble sized chunks dispersed in between.
Silica Fume	Cormex Construction Chemicals commercially packaged microsilica. Grey very fine and light weight powder.
Crumb Rubber	Tires ground into 1-2 mm x 0.5 mm strings obtained from Tire Terminators, Inc., Waukesha, WI.

Επιπλέον, έρευνες των Lange, Juenger και Siegel το 2012 κατέδειξαν ότι **χρήζει περαιτέρω έρευνας η συσχέτιση ανάμεσα στους ρυθμούς εκπομπής αερίου ραδονίου και στο πορώδες του σκυροδέματος που περιέχει ιπτάμενη τέφρα με ραδιενεργά συστατικά**. Επιπλέον, υπολογίστηκε ότι **όταν στο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ως αδρανές γρανίτης που περιέχει ουράνιο, ο ρυθμός εκπομπής αερίου ραδονίου είναι πενταπλάσιος σε σχέση με σκυρόδεμα που δεν περιέχει ραδιενεργά αδρανή**.

Αναλυτικότερα, η ιπτάμενη τέφρα, ένα υλικό που συχνά αντικαθιστά το τσιμέντο και παράγεται κατά 90% από ανόργανο άκαυστο υπόλειμμα από την καύση του άνθρακα,

μπορεί να πολλαπλασιάσει την φυσικά υπάρχουσα ραδιενέργεια του σκυροδέματος, καθώς μπορεί να έχει έως και δέκα φορές μεγαλύτερη συγκέντρωση σε ουράνιο και θόριο σε σύγκριση με τον άκαυστο άνθρακα. Από πειράματα έχει βρεθεί π.χ. ότι σε ένα τυπικό σκυρόδεμα που αποτελείται κατά 70% κ.β. από αδρανή, 3% κ.β. από ιπτάμενη τέφρα (με 30% κ.β. αντικατάσταση τσιμέντου), και 7% κ.β. από τσιμέντο, **η ιπτάμενη τέφρα συμβάλλει περισσότερο από 50% (52%) στην ειδική ενεργότητα του ραδονίου σε σχέση με τη συμβολή του συμβατικού σκυροδέματος** (Εικόνα 3.23).



Εικόνα 3.23 Ποσοστά συμβολής της ιπτάμενης τέφρας, των αδρανών και του τσιμέντου στην ειδική ενεργότητα του ραδονίου (^{226}Ra) (Lange, Juenger και Siegel, 2012).

Παράλληλα, έχουν διεξαχθεί διάφορες έρευνες όσον αφορά τη σχέση της μεταφοράς ραδονίου στο σκυρόδεμα με τα ποσοστά υγρασίας και έχει γίνει η μοντελοποίηση αυτής της σχέσης (Cozmuta, van der Graaf και de Meijer, 2002). Οι ερευνητές αναφέρουν ότι στις περισσότερες χώρες τα δομικά υλικά σε σύγκριση με το έδαφος αποτελούν μικρότερη πηγή ραδονίου. Αξιοσημείωτες εξαιρέσεις είναι μόνο η Ιταλία και η Ολλανδία. Όμως, υποστηρίζουν ότι **στις περισσότερες χώρες το σκυρόδεμα θεωρείται ως ένα ωφέλιμο φράγμα από το ραδόνιο που πηγάζει από το έδαφος**. Τα συμπεράσματα της έρευνας αυτής συνοψίζονται ως εξής:

- **Το σκυρόδεμα ως πηγή ραδονίου:** Τόσο η παραγωγή όσο και η μεταφορά ραδονίου μέσα στο σκυρόδεμα εξαρτάται από την ποσότητα υγρασίας μέσα στους πόρους του. Έχει βρεθεί ότι **ο ρυθμός εκπομπής ραδονίου από το σκυρόδεμα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση έως 50 με 60% της υγρασίας. Με περαιτέρω αύξηση της υγρασίας (70 έως 80%) ο ρυθμός μεγιστοποιείται γύρω από μια τιμή και όσο περισσότερο αυξάνεται η υγρασία τόσο μειώνεται ο ρυθμός εκπομπής ραδονίου**. Αυτή η σχέση μοντελοποιήθηκε και πιστεύεται ότι ο συνδυασμός – συγχώνευση του μοντέλου αυτού με ένα δομικό μοντέλο σκυροδέματος θα οδηγήσει σε ένα πολύ ισχυρό σχεδιαστικό εργαλείο για τον σχεδιασμό σκυροδέματος με χαμηλές εκπομπές ραδονίου.
- **Το σκυρόδεμα ως φράγμα ραδονίου:** Οι τιμές ραδονίου μέσα σε ένα κτίριο εξαρτώνται από την εσωτερική σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH). Η μοντελοποίηση της σχέσης του ρυθμού εκπομπής ραδονίου ως συνάρτηση της εμπεριεχόμενης στο σκυρόδεμα υγρασίας, χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η δράση του σκυροδέματος όχι μόνο ως πηγή αλλά και ως φράγμα ραδονίου. Συνάγεται ότι **στα περισσότερα σπίτια όπου η σχετική**

υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 30 και 70%, ο ρυθμός εκπομπής μεταβάλλεται κατά πολύ μικρά ποσοστά 10-15%. Ως φράγμα ραδονίου συμπεραίνεται ότι το σκυρόδεμα αποδίδει καλύτερα σε μεγαλύτερα ποσοστά σχετικής υγρασίας. Μάλιστα, μόνο για πολύ ξηρά εδάφη η είσοδος στο σκυρόδεμα με διάχυση από το έδαφος μπορεί να αναμένεται ότι θα προκαλέσει παραγωγή ραδονίου εντός του σκυροδέματος.

Τέλος, οι Yu, Balendran, Koo και Cheung (2000), προκειμένου για τη μείωση της συγκέντρωσης του ραδονίου στο εσωτερικό κτιρίων και άρα την αποφυγή της τραχειοβρογχικής απόθεσης των προϊόντων διάσπασής του, που αποδεδειγμένα οδηγεί στην ανάπτυξη καρκίνου των πνευμόνων, διερεύνησαν τη **χρήση μη ραδιενεργών αδρανών αντί π.χ. του γρανίτη**. Μελέτησαν συγκεκριμένα, την αξιοποίηση πυριτικής παιπάλης (σιδηροπυρίτιο) για την αντικατάσταση του τσιμέντου Portland. Συμπέραναν ότι με τον τρόπο αυτό, αφενός παράγεται σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, αφετέρου αποφεύγεται το αναφερόμενο πρόβλημα ραδονίου. Η πυριτική παιπάλη μειώνει το πορώδες και γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου με αποτέλεσμα την επιβράδυνση της εκπομπής ραδονίου. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις εκπομπής ραδονίου έδειξαν χαμηλότερες εκπομπές (κατά περίπου $4 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα ($9 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Η συγκέντρωση ραδονίου στο εσωτερικό κτιρίων εκτιμάται περίπου στα 17 Bq m^{-3} ενώ η μείωση της δόσης ακτινοβολίας είναι περίπου 1 mSv yr^{-1} . Επομένως **η πυριτική παιπάλη (σιδηροπυρίτιο) αποδεικνύεται ότι είναι ένα απλό υλικό, με την αξιοποίηση του οποίου στο σκυρόδεμα, δύναται να μειωθεί αποτελεσματικά η συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους αλλά και η δόση ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος.**

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην τσιμεντοβιομηχανία αντιστοιχεί το 2% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και σχεδόν το 5% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται από τη βιομηχανία. Κατά συνέπεια, στο σκυρόδεμα ως δευτερογενές προϊόν ενσωματώνονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Επιπλέον, από τη βιομηχανία τσιμέντου εκτιμάται ότι εκλύονται 1.6 δισ. t CO₂ παγκοσμίως, που αντιστοιχούν στο 5% περίπου των συνολικών εκπομπών CO₂ από όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες με αποτέλεσμα οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την παραγωγή σκυροδέματος να κυμαίνονται μεταξύ 0.1 και 0.2 τόνους CO₂ ανά τόνο σκυροδέματος. **Προκειμένου για παραγωγή οικολογικότερου σκυροδέματος, είναι απαραίτητη λοιπόν η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματός του, που αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές κυρίως CO₂, την ποσότητα αδρανών που απαιτούνται για την παραγωγή του και εν γένει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του στη διάρκεια όλου του κύκλου ζωής του.** Υπάρχουν μάλιστα διάφοροι τρόποι ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και κυρίως ελάττωσης των εκπομπών CO₂, όπως αλλαγές στην παραγωγική διεργασία, ανακύκλωση – επαναχρησιμοποίηση του σκυροδέματος, αλλά και σχεδιασμός «πράσινων» σύνθετων τσιμέντων με την αξιοποίηση προσμίκτων. Το σκυρόδεμα βέβαια, έχει πολύ χαμηλότερη εμπιερχόμενη ενέργεια και εκπομπές αερίων ρύπων κατά την παραγωγή του, σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά όπως την άσφαλτο, το χάλυβα κ.ά. Πάντως, **η σχέση «περιβάλλοντος - σκυροδέματος» είναι θεμελιώδης για την επίτευξη της αειφορίας στην κατασκευή.** Για το λόγο αυτό, αναπτύσσονται διάφορες μέθοδοι περιβαλλοντικής αξιολόγησης των δομικών υλικών, οι οποίες βασίζονται στην ανάλυση του κύκλου ζωής ή σε πολυκριτηριακή ανάλυση.

Επιπρόσθετα, η εξάπλωση του γνωστού συνδρόμου του άρρωστου κτιρίου και η διαπίστωση της σχέσης που υπάρχει ανάμεσα στην παρουσία υλικών πιθανώς βλαβερών για την υγεία του ανθρώπου στους χώρους κατοικίας και στην εμφάνιση παθολογικών καταστάσεων στους εργαζομένους, είναι **το καμπανάκι του κινδύνου για μια κατασκευαστική τεχνολογία η οποία έσκυψε περισσότερο στα ζητήματα της παραγωγής, ξεχνώντας τον τελικό σκοπό των εργασιών της, την ανθρώπινη άνεση.** Έτσι, επειδή το θέμα των οικολογικών υλικών δεν είναι λυμένο, αναπτύσσεται σήμερα μια νέα επιστήμη, η «Επιστήμη Ζωής-Χρόνου-Μηχανικού».

Μία ακόμη παράμετρος που αξίζει να αναφερθεί είναι **η πρόοδος στην παρατήρηση της μικροδομής και η κατανόηση της νανοδομής του σκυροδέματος, αλλά και η αξιοποίηση λογισμικών μοντέλων πακεταρίσματος σωματιδίων αδρανών, με τα οποία διευκολύνθηκε σημαντικά η ανάπτυξη της τεχνολογίας σκυροδέματος,** αφού δεν στηρίζεται πλέον μόνο στην μέθοδο δοκιμής και σφάλματος για την ανάδειξη οργανικών ουσιών με χρήσιμες ιδιότητες για το σκυρόδεμα.

Επιπλέον, το σκυρόδεμα, το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό, εξελίσσεται διαρκώς. Το σύγχρονο σκυρόδεμα δεν είναι απλώς ένα μίγμα από τσιμέντο, νερό και αδρανή. Περιέχει ολοένα και συχνότερα ορυκτά συστατικά, χημικά πρόσμικτα, κ.λπ. που του προσδίδουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Τα οργανικά μόρια επιλέγονται έτσι ώστε να τονίσουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος ή να διορθώσουν ορισμένες αδυναμίες του, για ορισμένες εφαρμογές. **Η τσιμεντοβιομηχανία και η βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος αναμένεται να χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο περιβαλλοντικά φιλικότερες συνδετικές ουσίες και να ελέγχουν ολοένα και πιο πολύ τη βιομηχανία τεχνητών ποζολανικών υλικών (τέφρα φλοιού**

ρυζιού, άμορφο πυρίτιο, κ.ά.). Επιπλέον έχει καταρριφθεί πλέον ο μύθος ότι η χρήση στο σκυρόδεμα διαφόρων ορυκτών συστατικών μειώνει την αντοχή σε θλίψη.

Αναλυτικότερα, η εξέλιξη του σκυροδέματος αφορά τόσο **θέματα αντοχής / διάρκειας ζωής του, όσο και θέματα προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας:**

- Τα όρια αντοχής σκυροδέματος 20-25 MPa που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για ασφαλείς κατασκευές, για ορισμένες κατασκευές όπου απαιτείται η χρήση σκυροδέματος υψηλής απόδοσης, **αυξάνονται με την αξιοποίηση υπερρευστοποιητικών.**
- Δε δίνεται έμφαση πλέον μόνο στην αντοχή σε θλίψη την 28^η ημέρα, αλλά και στη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σχεδιάζονται μίγματα που διατηρούν την αντοχή της 28^{ης} ημέρας καθόλη τη διάρκεια ζωής τους και υπό οποιοσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Κάποιοι νέοι τύποι σκυροδέματος είναι πιο οικολογικοί από πλευράς εμπειερχόμενης ενέργειας, όπως π.χ. τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα.
- Τόσο το τσιμέντο, όσο και το σκυρόδεμα είναι απαραίτητο να εξελιχθούν σε αρμονία με το περιβάλλον, με αειφορική προοπτική, που αυτό σημαίνει την ενσωμάτωση προσμίκτων που παρουσιάζουν υδραυλικές, ποζολανικές και πληρωτικές ιδιότητες στο κλίνκερ, μικρότερες αναλογίες νερού/συνδετικής ουσίας, την αύξηση της διάρκειας ζωής των μιγμάτων σκυροδέματος και την πρόκληση μικρότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων (κυρίως εκπομπών CO₂). Επιπλέον, λόγω των τεράστιων ποσοτήτων παραγόμενου σκυροδέματος, συμπεραίνει κανείς ότι έστω και μια μικρή μείωση της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμέντο, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των παγκόσμιων εκπομπών CO₂.

Έχουν αναπτυχθεί τύποι σκυροδέματος με διάφορα πρόσθετα οποίοι επιδεικνύουν οικολογικές ιδιότητες. Σήμερα π.χ. η ιπτάμενη τέφρα ή οι ποζολάνες μπορούν να αντικαταστήσουν το τσιμέντο στο σκυρόδεμα σε ποσοστά που κυμαίνονται από 15 έως 35% και σε ειδικές περιπτώσεις (ογκώδη έργα) μπορεί να φτάσουν μέχρι 70%. Η ερευνητική πρόοδος στον τομέα της αξιοποίησης προσμίκτων δείχνει ότι η τσιμεντοβιομηχανία θα είναι ουσιαστικά η βιομηχανία των συνδετικών ουσιών (binders) που επιδεικνύουν υδραυλικές ιδιότητες. Έτσι, η τσιμεντοβιομηχανία αναμένεται να αναπτυχθεί μέσα σε πλαίσια αειφόρου ανάπτυξης, τα οποία ούτως ή άλλως θα πρέπει να εφαρμοστούν λόγω των απαιτήσεων της σχετικής περιβαλλοντικής νομοθεσίας.

- Είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη ολόκληρος ο κύκλος ζωής του σκυροδέματος και να ενσωματώνονται τα περιβαλλοντικά και τα κοινωνικοοικονομικά κόστη στο συνολικό κόστος. Έτσι, δεν θα είναι τελικά τόσο πιο ακριβοί κάποιοι τύποι σκυροδέματος, εφόσον ληφθεί υπόψη ότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μπορούν να ανακυκλωθούν πολύ εύκολα αρκετές φορές πριν να καταλήξουν ως κοκκώδη υλικά υποστρώματος για ένα δρόμο και απαιτούν τη χρήση πολύ λιγότερης πρώτης ύλης.
- Σε ό,τι αφορά την προστασία της ανθρώπινης υγείας από ραδιενέργεια, διεξάγεται έρευνα για τη μελέτη του σκυροδέματος ως «πηγή» ή ως «φράγμα» ραδονίου. Σε πολλές χώρες το σκυρόδεμα θεωρείται ως ένα

ωφέλιμο φράγμα από τη φυσική ακτινοβολία - ραδιενέργεια (ραδόνιο που πηγάζει από το έδαφος). Σε περιοχές όπου η συγκέντρωση ραδονίου υπερβαίνει τα όρια ασφαλείας (200 bequerel/m^3) προτείνονται πλέον κατασκευαστικοί τρόποι αποφυγής του ραδονίου στο χώρο της οικοδομής (ειδικά φρεάτια ή/και ειδικές μεμβράνες). Από έρευνες επίσης, **καταδείχτηκε η σημασία της μελλοντικής έρευνας στον τομέα αξιοποίησης βιομηχανικών παραπροϊόντων στη δομή του σκυροδέματος**, με όφελος τόσο την επιτυχή επιβράδυνση μεταφοράς αερίου ραδονίου, όσο και την περιβαλλοντικά φιλική και απλή ανακύκλωση – διάθεση των παραπροϊόντων αυτών. Τέλος, **το τσιμέντο κατασκευής του σκυροδέματος δεν πρέπει να περιέχει ραδιενεργά ή τοξικά πρόσθετα** (όπως π.χ. ο αμίαντος που απαγορεύτηκε ή η ραδιενεργός ιπτάμενη τέφρα) ή ραδιενεργά αδρανή όπως π.χ. γρανίτη που περιέχει ουράνιο. Προσοχή πρέπει να δίνεται σε αρκετά νέα υλικά που δεν έχουν πιστοποιηθεί ακόμη για την τοξικότητά τους. Αλλά και η **ενδεχόμενη ραδιενέργεια του χάλυβα του οπλισμένου σκυροδέματος είναι ένα σοβαρό πρόβλημα** της χαλυβουργικής βιομηχανίας, το οποίο έχει επιπτώσεις στο σκυρόδεμα. Και για τα δύο τελευταία θέματα θα πρέπει να παρέχονται τα σχετικά πιστοποιητικά από τους προμηθευτές τσιμέντου και οπλισμού.

Η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος ή καλύτερα η βιομηχανία των υδραυλικών συνδετικών ουσιών, όπως σύμφωνα με διάφορους ερευνητές αυτή αναμένεται να ονομαστεί αυτόν τον αιώνα, **πρέπει να είναι μια «πράσινη» βιομηχανία**. Και αυτό διότι, δεδομένων των καινοτομιών που αναδύονται ολοένα και περισσότερο, το σκυρόδεμα του αύριο έχει τη δυνατότητα όχι μόνο να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αλλά και να καλύπτει τις κοινωνικοοικονομικές ανάγκες με το μικρότερο δυνατό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Το σκυρόδεμα του μέλλοντος θα πρέπει αναμφισβήτητα να είναι «πράσινο» με την έννοια ότι θα πρέπει να έχει μικρότερη αναλογία νερού/συνδετικής ουσίας, μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς και εξειδικευμένα χαρακτηριστικά για διαφορετικές εφαρμογές. Μελλοντική πρόκληση αποτελεί επίσης η χρήση συνδετικών υλικών να παράγει σκυρόδεμα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και όχι απλά σκυρόδεμα μεγαλύτερης αντοχής. Επιπλέον, ερευνητές εκτιμούν ότι τα μελλοντικά συνδετικά υλικά αναμένεται να είναι οικονομικότερα από ό,τι σήμερα και να παράγονται με εναλλακτικά καύσιμα. Τέλος, το πάντρεμα της οργανικής και ορυκτής χημείας θα αποτελέσει το μυστικό επιτυχίας της τσιμεντοβιομηχανίας αυτόν τον αιώνα.

Τα πρόσμικτα του μέλλοντος αναμένεται να παράγονται εξειδικευμένα για το σκυρόδεμα και οι παραγωγοί τσιμέντου να δίνουν μια λίστα με συμβατά και μη πρόσμικτα στους πελάτες τους (βιομηχανίες σκυροδέματος). Οι παραγωγοί τσιμέντου και σκυροδέματος θα πρέπει να συνειδητοποιήσουν ότι είναι σημαντικό όχι τόσο το κόστος ανά m^3 σκυροδέματος, όσο το κόστος του ΙΜΡα ή του ενός έτους του κύκλου ζωής μιας κατασκευής. Μάλιστα, εάν υπάρξουν περισσότερες συμβάσεις BOOT (Build - Own - Operate - Transfer = Κατασκευή - Ιδιοκτησία - Εκμετάλλευση - Παράδοση), που προβλέπουν δηλαδή την μεταφορά του έργου στο Δημόσιο μετά το πέρας της περιόδου παραχώρησης, αναμένεται αυτές να υποχρεώσουν τους αναδόχους των έργων να εφαρμόσουν τις καινοτομίες της έρευνας στον τομέα του σκυροδέματος. Οι παραγωγοί σκυροδέματος θα συνειδητοποιήσουν ότι θα πρέπει να αξιοποιήσουν όσα προσφέρουν οι παραγωγοί τσιμέντου και πρόσμικτων, ώστε να παρέχουν στους αναδόχους την πιο high-tech και παράλληλα οικονομικότερη λύση για κάθε εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τον κύκλο ζωής του σκυροδέματος και όχι

απλά το κόστος ανά m^3 . Η βιομηχανία σκυροδέματος του μέλλοντος θα πρέπει να συνεχίσει να παράγει ένα αγαθό για όλους, αλλά ταυτόχρονα να είναι σε θέση να παράγει εξειδικευμένους τύπους σκυροδέματος, υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι το σκυρόδεμα είναι ένα θαυμάσιο δομικό υλικό, με ευέλικτη σύνθεση, γεμάτο ανεξερεύνητες ή ανεκμετάλλευτες δυνατότητες, που μπορεί να είναι ταυτόχρονα οικολογικό. Προτείνεται επομένως, η σχετική έρευνα να ενταθεί και να αναζητηθούν επιπλέον τρόποι ποιοτικής βελτίωσής του ώστε το σκυρόδεμα να καταστεί ακόμα φιλικότερο προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Σ. Κ. Αντίοχος, Δ. Φίλη, Ε. Παπαδάκης, Α. Κυρίτση, Μ. Τσίμας, Χ. Τ. Γκαλμπένης, Σ. Τσίμας, Παραγωγή σκυροδέματος με ελληνική τέφρα φλοιού ρυζιού (ΤΦΡ). Προσεγγίσεις και προοπτικές (<http://www.scribd.com>)

Αργ. Δημούδη, Οικολογικά Δομικά Υλικά, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Περιβαλλοντικού και Ανθρωπογνωστικού Σχεδιασμού, Ξάνθη 2006

Γ. Ζήρα, Διπλωματική Εργασία, Η συμβολή των δομικών υλικών στο βιοκλιματικό σχεδιασμό κτιρίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα 2010

Αιμ. Γ. Κορωνάιος, Γ. Σαργέντης, Δομικά Υλικά και Οικολογία, ΕΜΠ, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Αθήνα 2005

Μ. Λαζαρίδης, Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Υγεία, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2005

Α. Μοροπούλου, Σύγχρονες Τάσεις στην Κατεύθυνση της Αειφόρου Κατασκευής. Η Σχέση Περιβάλλοντος – Σκυροδέματος, Current Trends towards the Sustainable Construction. The Relation between Environment and Concrete, 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος

Α. Γ. Μπίσκα, Ν. Οικονόμου, Ανάπτυξη πρότυπου λογισμικού συστήματος περιβαλλοντικής διαχείρισης στον τομέα παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος, 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου, 2006

Ε. Ι. Πανταλέων, Ωπλισμένο Σκυρόδεμα, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Α. Ε. Σάββα, Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή: Επίδραση της ομοιογένειας του σκυροδέματος προέλευσης, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, τεύχ. 2 2010 Tech. Chron. Sci. J., No 2, Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ

Β. Ε. Στιβανάκης, Έρευνα και ανάπτυξη νέων δομικών υλικών από στερεά παραπροϊόντα λιγωτικής καύσης ενεργειακού κέντρου Μεγαλόπολης, Διδακτορική διατριβή, Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2003

Κ. Τσακαλάκης, Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων, Αθήνα, 2010

Ξένη Βιβλιογραφία

P. C. Aïtcin, Review: Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow, Cement and Concrete Research, Volume 30, Number 9, September 2000, pp. 1349-1359

B. Ballard, V. Rant, Materials for architectural design, Lawrence King Publishing 2006

I. Cozmuta, E.R. van der Graaf, R.J. de Meijer, Moisture dependence of radon transport in concrete: Measurement and modeling, Paper submitted to Health Physics. December 2002

J. S. Damtoft, M. Glavind, C. Munch-Petersen, Danish Centre for Green Concrete, Proceedings of CANMET/ACI International conference, San Fransisco, 2001

S. A. A. M. Fennis, Design of ecological concrete by particle packing optimization, ISBN 978-94-6108-109-4, Netherlands 2010

A. N. Givi, S. A. Rashid, F. N. A. Aziz, M. A. M. Salleh, Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete: A Review Journal of American Science 2010;6(3), Naji Givi, et al, Rice Husk Ash in Concrete

T.L. Lambert, K.J. Renken, Experiments on industrial by-product utilization as a concrete admixture to reduce radon gas transport properties. In: The 1999 International Radon Symposium. 13.0-13.24 Las Vegas 1999.

T. Lange, S., Stewart, J., Juenger, M. G.C., Siegel, J.A., The Contribution of Fly Ash toward Indoor Radon Pollution from Concrete. Building and Environment, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.009>

C. V. Nielsen, M. Glavind, Danish experiences with a decade of green concrete, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 5, No. 1, 3-12, February 2007

K. J. Renken, T. Rosenberg, Laboratory Measurements and Analysis of the Transport of Radon Gas through Concrete Samples, 1993 International Radon Conference, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee. Wisconsin 1993

University of Dundee, Green Concrete – a life cycle approach, Featured in the proceedings of "Challenges of Concrete Construction, September 2002

K. N. Yu, R. V. Balendran, S. Y. Koo, T. Cheung, Silica Fume as a Radon Retardant from Concrete, Environ. Sci. Technol., 2000, 34 (11), pp 2284–2287 Publication Date (Web): April 21, 2000 Copyright © 2000 American Chemical Society, Department of Physics and Materials Science and Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Tat Chee Avenue, Kowloon Tong, Hong Kong,

Ιστοσελίδες

ECTP: European Construction Technology Platform, <http://www.ectp.org/>

Ελληνική Πλατφόρμα Έρευνας & Τεχνολογίας για την Κατασκευή (ΕΠΕΤΚ)
<http://www.hctp.tee.gr/>

Τεχνικό Επιστημονικό Περιοδικό Σκυρόδεμα και Χάλυβας <http://www.skyrodemanet.gr/>

CEMBUREAU, COMPETITIVENESS OF THE EUROPEAN CEMENT INDUSTRY, The European Cement Association, 2006 www.cembureau.be

http://www.texnikos.gr/sick/sick_02.shtml

http://www.buildings.gr/greek/eksoplismos/oikologika_ilika/radonio.htm

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:91998E3490:EL:HTML>

http://www.buildings.gr/greek/eksoplismos/oikologika_ilika/ylika_filika_pros_to_peri_vallon.htm

http://www.themistsipiras.gr/eco_materials.html

http://www.ecolife.gr/images/ecohouse_2011/ecohouse_2011.pdf
www.europa.eu.int/eur-lex/pri/el/oj/dat/2002/l-094/l-094200204111e/00130027.pdf
<http://www.ecosmes.net/cm/navContents?l=EL&navID=lcaSmesIntro&subNavID=1&pagID=1>
<http://www.ecosmes.net/cm/navContents?l=EL&navID=lcaSmesIntro&subNavID=1&pagID=1>
http://news.kathimerini.gr/4dcgi/_w_articles_world_2_08/05/2010_400254
<http://flyash.com/>
<http://www.gronbeton.dk/>
<http://www.aalborgportland.com/default.aspx?m=2&i=250>