

## Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων και Τεχνικών για Μείωση του Περιβαλλοντικού Κόστους των Κατασκευών

**Ε.Γ. Παπαδάκης**

*Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων*

*Λέξεις κλειδιά:* Βιομηχανικά παραπροϊόντα, περιβάλλον, κατασκευές, κόστος, σκυρόδεμα

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Ο τομέας δόμησης στον Ελληνικό χώρο κατέχει πρωτεύουσα θέση στις γενικότερες βιομηχανικές/ τεχνολογικές δραστηριότητες (κύκλος εργασιών, απασχόληση). Αντίστοιχη είναι και η συμμετοχή του στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος από πλευράς κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και πόρων, αερίων εκπομπών (κυρίως CO<sub>2</sub>), στερεών αποβλήτων, κλπ. Την σημαντικότερη θέση στον τομέα δόμησης κατέχει η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος. Στο παρόν άρθρο εξετάζονται θέματα βιώσιμης ανάπτυξης του τομέα δόμησης και προσεγγίζεται το περιβαλλοντικό κόστος που προκύπτει κατά την παραγωγή, μεταφορά και σύνθεση των κατασκευαστικών υλικών. Προτείνονται χρήσεις και τεχνικές για μείωση του περιβαλλοντικού κόστους του σκυροδέματος και άλλων δομικών υλικών. Οι τρόποι μείωσης περιλαμβάνουν μείωση της παραγωγής αποβλήτων και της εκπομπής αερίων φαινομένου θερμοκηπίου, εκτεταμένη χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων και αναμίξεων, πιο αποτελεσματική χρήση ορυκτών και μεταλλικών πόρων, αυξημένη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, παράλληλα με επιμήκυνση της ανθεκτικότητας των κατασκευών.

## Use of Industrial By-products and Techniques for Decreasing the Environmental Cost of Constructions

**V.G. Papadakis**

*Associate Professor, Department of Environmental and Natural Resources Management, University of Ioannina, Greece*

*Keywords:* Concrete, constructions, cost, environment, industrial by-products

**ABSTRACT:** The building sector in Greece occupies prime position within the industrial / technological activities (turnover, employment). Its contribution to the environmental burdening is also similar due to consumption of non-renewable sources of energy and natural sources, gas emission (mostly CO<sub>2</sub>), solid residues, etc. The most important position in the building sector has the industries of cement and concrete. In the present paper, issues of sustainable development of the building sector are examined and the environmental cost is approached from the production, transportation and application of the component construction materials. Various usages and techniques for the decreasing of the environmental cost are proposed for concrete and other building materials. These proposals include restriction of residue production and emission responsible for the greenhouse phenomenon, extended use of industrial by-products and their various mixtures, more efficient use of mineral and metallic sources, increases use or recycled materials, in parallel with lengthening of the construction durability.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Υπάρχει για χρόνια η αντίληψη ότι οι στόχοι της βιομηχανίας και εν γένει της οικονομικής μεγέθυνσης δεν συμβαδίζουν με τη διατήρηση και την αναβάθμιση του περιβάλλοντος. Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία πως η αντίληψη αυτή, εν μέρει έστω, ισχύει και σήμερα – αντιπαλεύεται όμως από την προτεινόμενη «βιώσιμη ή πράσινη ανάπτυξη». Τις τελευταίες δεκαετίες σχεδιασμού της περιβαλλοντικής πολιτικής, έχει γίνει σαφής εστίαση για την προστασία της ποιότητας του περιβάλλοντος με μείωση της ανθρωπογενούς ρύπανσης, σε επίπεδο που να είναι «αποδεκτό» από την κοινωνία. Αυτοί που καθορίζουν την περιβαλλοντική πολιτική έχουν κοπιάσει αρκετά για να εντοπίσουν το «πόσο καθαρό είναι το καθαρό» και δέχονται την πρόκληση να θεσπίσουν αποδοτικά, σε σχέση με το κόστος, μέτρα για την επίτευξη του όποιου επιπέδου ποιότητας καθορίζεται [1,2].

Η βιώσιμη ανάπτυξη γενικά, αλλά και ειδικότερα στον τομέα της δόμησης, εκφράζει μια σύγχρονη πρόκληση προς τους περιβαλλοντολόγους, τους διαχειριστές των φυσικών πόρων και τους μηχανικούς, που καλούνται να την κατανοήσουν και να την προσεγγίσουν. Αυτό συνεπάγεται ότι κάθε είδους κατασκευή πρέπει πάντα να συνοδεύεται από μία περιβαλλοντική μελέτη, η οποία θα οδηγεί τους κατασκευαστές, μέσω εναλλακτικών λύσεων, σε δομές περισσότερο βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Αυτού του είδους η πολιτική δεν εφαρμόζεται σε αυστηρό βαθμό σήμερα – βρισκόμαστε όμως μάλλον στις απαρχές της.

Στο παρόν άρθρο εξετάζονται καταρχήν στοιχεία που συνθέτουν το ζήτημα της βιωσιμότητας του τομέα δόμησης. Υποθέτοντας ότι είναι γνωστά τα τεχνικά στοιχεία των βασικότερων δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στον κατασκευαστικό τομέα, υπολογίζεται το περιβαλλοντικό κόστος που προκύπτει κατά την παραγωγή, μεταφορά και εφαρμογή τους και γίνονται συνοπτικές αναφορές σε επικρατέστερες χρήσεις και τεχνικές που μειώνουν το περιβαλλοντικό κόστος μιας κατασκευής.

## 2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ & ΒΙΩΣΙΜΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει κατά κοινή ομολογία παρατηρηθεί έντονο ενδιαφέρον για το περιβάλλον, ενώ τελευταία αυτό εκδηλώνεται όλο και πιο δυναμικά τόσο από κυβερνήσεις παγκοσμίως, όσο και από διάφορα κοινωνικά στρώματα, ΜΚΟ, κλπ. Το οικουμενικό ενδιαφέρον για το περιβάλλον δεν άφησε αδιάφορους και τους διάφορους παραγωγικούς τομείς και βιομηχανίες όπως η κατασκευαστική βιομηχανία, η οποία επιδιώκει την προσαρμογή της στις απαιτήσεις και αρχές της Βιώσιμης Ανάπτυξης μέσω της Βιώσιμης Κατασκευής.

Στην πορεία προς την Βιώσιμη Κατασκευή, η Comitee International du Batiment - International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), ως ο καθοδηγητικός διεθνής οργανισμός για τις ερευνητικές συνεργασίες στα κτίρια και τις κατασκευές, εστίασε τις δραστηριότητές της στην Βιώσιμη Κατασκευή και είχε ως αποτέλεσμα το Παγκόσμιο Συνέδριο των Κατασκευών του 1998 στο Gavle της Σουηδίας να έχει θέμα: «*Η Κατασκευή και το Περιβάλλον*». Στόχος του συνεδρίου ήταν να επιτευχθεί μια παγκόσμια συνεργασία για την χάραξη της πορείας προς μια μελλοντικά βιώσιμη κατασκευαστική βιομηχανία. Από την συνεργασία μεταξύ πολλών διεθνών οργανισμών όπως RILEM, IEA, CERF, ISIAQ κλπ. προέκυψε η κοινά αποδεκτή «*Ατζέντα 21 για την Βιώσιμη Κατασκευή*».

Οι σημαντικές τάσεις μέσα στη σημερινή κοινωνία που έχουν ή θα έχουν μια άμεση επίδραση στη βιομηχανία των κατασκευών είναι οι εξής:

1. Η συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού.
2. Η επέκταση των απαιτήσεων υποδομών.

3. Η ύπαρξη περισσότερης πίεσης για τη μείωση των εκπομπών των επιβλαβών αερίων, ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).
4. Η συνειδητοποίηση ότι οι φυσικοί πόροι είναι περιορισμένοι.

Οι εργασίες κατασκευών είναι μια μεγάλη δραστηριότητα και στην Ελλάδα. Σαν αποτέλεσμα, η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος έχει αναπτυχθεί ευρέως τόσο σε ποιότητα όσο και σε ποσότητα. Κατά μέσο όρο παράγονται στην Ελλάδα 15 εκατομμύρια τόνοι τσιμέντου με περίπου 50% να εξάγεται. Βάση αυτών των δεδομένων, η Ελλάδα είναι η πέμπτη χώρα στην Ευρωπαϊκή Ένωση στην παραγωγή τσιμέντου, η πρώτη Ευρωπαϊκή χώρα σε εξαγωγή τσιμέντου και μια από τις πρώτες χώρες εξαγωγής στον κόσμο. Το ποσό κατανάλωσης τσιμέντου ανά κάτοικο στην Ελλάδα αγγίζει τους 0.8 τόνους ετησίως και είναι ένα από τα υψηλότερα ποσοστά του κόσμου.

Σε διεθνές επίπεδο και κυρίως στις χώρες της Δ. Ευρώπης και Β. Αμερικής έχουν ξεκινήσει δυναμικά διάφορες προσπάθειες μείωσης του περιβαλλοντικού κόστους των κατασκευών προς βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα δόμησης. Στην Ελλάδα επίσης παρατηρούνται αρκετές τέτοιες προσπάθειες από ερευνητικές ομάδες Πανεπιστημίων και τμημάτων Έρευνας & Ανάπτυξης Βιομηχανιών. Τα προγράμματα αυτά στοχεύουν στην ανάπτυξη διαύλων επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ των ακαδημαϊκών, ερευνητικών, τεχνολογικών φορέων και επιχειρήσεων του Ιδιωτικού Τομέα που έχουν επιστημονικά ενδιαφέροντα στο θέμα της *βιώσιμης ανάπτυξης του κατασκευαστικού τομέα*.

Ο τομέας δόμησης κατέχει πρωτεύουσα θέση στις γενικότερες βιομηχανικές και τεχνολογικές δραστηριότητες. Στον ευρύτερο Ευρωπαϊκό χώρο παρουσιάζει κύκλο εργασιών 800 δισ. ευρώ ετησίως που αντιστοιχεί στο 11% του συνολικού Ευρωπαϊκού εισοδήματος. Απασχολεί περί τα 30 εκατ. ανθρώπους, περίπου το 20% του συνολικού εργατικού δυναμικού της ΕΕ. Αντίστοιχη είναι και η συμμετοχή του τομέα δόμησης στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος από πλευράς κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εκπομπής αερίων ρύπων, στερεών αποβλήτων, κλπ. Για την κοινότητα αυτού του τομέα, η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης περιλαμβάνει τη χρήση υλικών υψηλής απόδοσης που παράγονται σε λογικό οικονομικό κόστος και με το χαμηλότερο δυνατό περιβαλλοντικό κόστος .

Την σημαντικότερη θέση στον τομέα δόμησης κατέχει **η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος** (65% του εργατικού δυναμικού, 80% των αερίων εκπομπών). Το σκυροδέμα με τσιμέντο Portland είναι ένα σημαντικό υλικό κατασκευών διεθνώς. Δυστυχώς η παραγωγή τσιμέντου Portland ελευθερώνει μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Επειδή αυτό το αέριο συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, οι αναπτυγμένες χώρες συνεχώς εξετάζουν την θέσπιση πιο αυστηρών κανονισμών και περιορισμών όσον αφορά την εκπομπή CO<sub>2</sub>. Λόγω των αναγκών υποδομής των αναπτυσσόμενων χωρών, η ανάγκη σκυροδέματος και κατά συνέπεια τσιμέντου αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στο προσεχές μέλλον. Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή σκυροδέματος είναι περίπου 5 δισεκατομμύρια τόνοι. Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί σε αυτό το σημείο, το γεγονός ότι η παγκόσμια κατανάλωση σκυροδέματος έρχεται δεύτερη μετά την παγκόσμια κατανάλωση νερού! Η παραγωγή κατασκευών από τούβλα είναι μόνο το ένα δέκατο περίπου της ποσότητας σκυροδέματος σε βάρος και οι ξύλινες κατασκευές που χτίζονται είναι λιγότερο από το 5% της ετήσιας παραγωγής σκυροδέματος, σε βάρος. Εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας παραγωγής είναι σημαντικό να προσδιοριστεί και να περιορισθεί η επίδραση του σκυροδέματος στην οικολογία.

Σήμερα η βιωσιμότητα της βιομηχανίας σκυροδέματος εξετάζει τα ζητήματα των υλικών, όπως τα συστατικά που χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση του τσιμέντου Portland και την ανακύκλωση του σκυροδέματος. Η βιομηχανία σκυροδέματος αντιμετωπίζει τις αλλαγές και τις προκλήσεις που επιδρούν στο μέλλον της. Υπάρχουν 2 πηγές αλλαγής που οδηγούν τη βιομηχανία σκυροδέματος σήμερα: α)εκείνες προερχόμενες μέσα από τις εξελίξεις της κοινωνίας μας και β)εκείνες που προέρχονται μέσα από την ίδια τη βιομηχανία. Έτσι ο τρόπος με τον οποίο το

σκυρόδεμα σχεδιάζεται, προσδιορίζεται, παράγεται, παραδίδεται, τοποθετείται και ανακυκλώνεται θα αλλάξει στο μέλλον.

Ο σκοπός της βιώσιμης ανάπτυξης στις βιομηχανίες τσιμέντου και σκυροδέματος είναι κατά συνέπεια πολύ σημαντικός και μπορεί να επιτευχθεί εάν γίνει σοβαρή προσπάθεια για τη πλήρη αξιοποίηση των υδραυλικών παραπροϊόντων που παράγονται από σταθμούς παραγωγής θερμικής ισχύος και μεταλλουργικές βιομηχανίες. Έχοντας σαν στόχο την παγκόσμια βιώσιμη ανάπτυξη, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά υδραυλικά υλικά ώστε να αντικαταστήσουν μεγάλο μερίδιο του τσιμέντου στις κατασκευές. Ανάμεσα σε αυτά, το πλέον διαθέσιμο συμπληρωματικό υδραυλικό υλικό παγκοσμίως είναι αναμφίβολα η ιπτάμενη τέφρα (IT), ένα παραπροϊόν των σταθμών παραγωγής θερμικής ισχύος.

### 3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Το περιβαλλοντικό κόστος των κατασκευών μπορεί να μετρηθεί κυρίως σε εκπομπές CO<sub>2</sub> (ή και αερίων θερμοκηπίου) που παράγονται στα διάφορα στάδια παραγωγής, μεταφοράς και χρήσης των υλικών στις κατασκευές. Η ενέργεια που καταναλώνεται από τις βιομηχανίες αποτελεί έναν επιπλέον σημαντικό παράγοντα προς μελέτη. Η ενέργεια αυτή που μετρείται σε kWh αποβάλλει στο περιβάλλον ρύπους με τη μορφή CO<sub>2</sub>. Έτσι συνυπολογίζεται και αυτή για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους των κατασκευών. Ακόμα εξετάζονται και άλλοι παράγοντες όπως η κατανάλωση α' υλών και νερού, η εκπομπή άλλων ρύπων και σκόνης, η ηχορύπανση, κλπ., παράγοντες ως αποτέλεσμα της κατασκευαστικής δραστηριότητας και θα πρέπει να εξεταστούν και να συνυπολογιστούν στο συνολικό περιβαλλοντικό κόστος.

Τα βασικά κατασκευαστικά υλικά συνηθισμένων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι:

- το σκυρόδεμα (τσιμέντο, αδρανή, νερό, πρόσθετα, πρόσμικτα)
- ο χάλυβας
- τα τούβλα
- τα επιχρίσματα
- κλπ. (μονώσεις, πλακάκια, χρώματα, κουφώματα, ηλεκτρομηχαν/κός εξοπλισμός, κ.α.)

Όσον αφορά το βασικό υλικό δόμησης, το τσιμέντο, οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> από τις τσιμεντοβιομηχανίες υπολογίζονται ως το σύνολο του ποσού των εκπομπών CO<sub>2</sub> από την παραγωγή κλίνκερ (αντιδράσεις διάσπασης CaCO<sub>3</sub>), από την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και από την παραγωγή της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας (συνήθως καύση άνθρακα ή άλλου οικονομικού καυσίμου) στις βιομηχανικές μονάδες. Επιπλέον, η μεταφορά των πρώτων υλών και των τελικών προϊόντων συμβάλλει έμμεσα στο μερίδιο της εκπομπής CO<sub>2</sub> από τη βιομηχανία τσιμέντου. Σε παγκόσμια κλίμακα η βιομηχανία τσιμέντου είναι υπεύθυνη σε ποσοστό 20% των ανθρωπογενών εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου περίπου 0.97 τόνοι CO<sub>2</sub> παράγονται για κάθε τόνο παραγόμενου κλίνκερ. Τα ποσοστά αναλογούν στο ψήσιμο κατά τις αντιδράσεις διάσπασης CaCO<sub>3</sub> (0.55 τόνοι), στη χρήση (καύση) του άνθρακα και καυσίμων (0.34 τόνοι) και για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (0.11 τόνοι) (Marchal, 2001). Σε έναν μέσο όρο, περίπου 900 kg κλίνκερ χρησιμοποιούνται σε κάθε 1000 kg τσιμέντου που παράγονται. **Κατά συνέπεια κάθε τόνος τσιμέντου συνδέεται με 0,873 τόνους εκπομπών CO<sub>2</sub>** (CEMBUREAU, 1996, 1998, 1999; International Energy Agency, 1999; McCaffrey, 2001). Εάν σε αυτά προσθέσουμε και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> που προέρχονται από την μεταφορά των πρώτων υλών και των τελικών προϊόντων, τότε αναλογικά **η παραγωγή 1 τόνου τσιμέντου ελευθερώνει περίπου 1 τόνο CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα**. Επειδή οι εκπομπές που αφορούν τα άλλα συστατικά του σκυροδέματος (αδρανή, νερό, κλπ.) είναι κατά πολύ μικρότερες, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που προέρχονται από το τσιμέντο είναι και αυτές που

χαρακτηρίζουν συνολικά το παραγόμενο σκυρόδεμα. Αντίστοιχοι υπολογισμοί υπάρχουν και για τα άλλα δομικά υλικά, που τελικά διαμορφώνουν το σύνολο του περιβαλλοντικού κόστους.

#### 4 ΜΕΙΩΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η σχέση μεταξύ Δόμησης και Περιβάλλοντος σημαίνει ότι οποιαδήποτε ενέργεια αφορά την κατασκευή έχει άμεση επίδραση στο περιβάλλον και έχει τέσσερις συνιστώσες:

- λήψη μεγάλων ποσοτήτων πρώτων υλών (αδρανή για την παραγωγή τσιμέντου, σκυροδέματος, κεραμικών) με αποτέλεσμα τη δραστική μείωση των αποθεμάτων του ορυκτού φυσικού πλούτου που διαρκώς υποβαθμίζεται,
- κατανάλωση υψηλών ποσοτήτων ενέργειας για την παραγωγή, μεταφορά, χρήση των πρώτων υλών και των τελικών προϊόντων τους,
- εκπομπές μεγάλων ποσοτήτων αερίων όπως CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, κατά την παραγωγή τους,
- δημιουργία τεράστιων όγκων δομικών απορριμμάτων από τις παλιές κατασκευές που είναι εκτός λειτουργίας ή κατεδαφίζονται λόγω νέων απαιτήσεων, αλλά και από υλικά κατεδάφισης που προέρχονται από φυσικές καταστροφές (σεισμοί, θύελλες, κλπ.).

Η μακροπρόθεσμη προσέγγιση για να μειωθεί η περιβαλλοντική επίδραση από την χρησιμοποίηση οποιουδήποτε υλικού, είναι να ελαττωθεί το ποσοστό κατανάλωσής του. *Βραχυπρόθεσμα, πρέπει να αρχίσουμε να εφαρμόζουμε τη βιομηχανική οικολογία για μια βιώσιμη βιομηχανική ανάπτυξη.* Η εφαρμογή της βιομηχανικής οικολογίας περιλαμβάνει την ανακύκλωση των άχρηστων προϊόντων μιας βιομηχανίας και την χρησιμοποίησή τους από μια άλλη βιομηχανία, αντικαθιστώντας τις παρθένες πρώτες ύλες με τις ανακυκλώσιμες. Με αυτόν τον τρόπο μειώνουν την περιβαλλοντική επίδραση και οι δύο βιομηχανίες.

Σύμφωνα με τις υπάρχουσες πληροφορίες, πάνω από 1 δισεκατομμύριο τόνοι απόβλητα από την κατασκευή και τη κατεδάφιση παράγονται κάθε έτος, παγκοσμίως. Οι οικονομικώς αποδοτικές τεχνολογίες είναι διαθέσιμες να ανακυκλώσουν τα περισσότερα από αυτά τα απόβλητα και να τα χρησιμοποιήσουν ως μερική αντικατάσταση των χονδρών αδρανών στις νωπές αναμίξεις σκυροδέματος. Ομοίως, τα υγρά βιομηχανικά απόβλητα και τα μη πόσιμα ύδατα μπορούν να αντικαταστήσουν το κλασικό νερό ανάμιξης στην παραγωγή του σκυροδέματος, εκτός αν αποδεικνύονται επιβλαβή από τις δοκιμές. Τα σύνθετα τσιμέντα που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, που προέρχεται από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με άνθρακα και η σκωρία υψικάμινων, αποτελούν άριστα παραδείγματα της βιομηχανικής οικολογίας.

Οι μεγάλες ποσότητες τσιμέντου στην παραγωγή σκυροδέματος θα πρέπει να αντικατασταθούν από άλλα υλικά που θα προσφέρουν με ασφάλεια τις ίδιες ή ακόμα και καλύτερες ιδιότητες στο σκυρόδεμα. Ο τομέας κατασκευής σκυροδέματος χρησιμοποιεί ήδη μίγματα που περιέχουν αντικαταστάσεις τσιμέντου, από ιπτάμενη τέφρα έως 25% ή από σκωρία έως 40% σε μάζα.

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένοι τρόποι αλλά και υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του περιβαλλοντικού κόστους.

##### 4.1 Ανακύκλωση Σκυροδέματος

Η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των δομικών υλικών ανταποκρίνεται στις σύγχρονες τάσεις της τεχνολογικής ανάπτυξης που αποτελούν μέρος της σύγχρονης απαίτησης για βιώσιμη ανάπτυξη, τη διαφύλαξη του φυσικού πλούτου και την αποτελεσματική διαχείριση των απορριμμάτων. Η τεχνολογία για την ανακύκλωση σκυροδέματος υπάρχει και τα μηχανήματα τεμαχισμού έχουν αναπτυχθεί. Οι ράβδοι χάλυβα μπορούν να διαχωριστούν και επίσης να ανακυκλωθούν. Το συντετριμμένο σκυρόδεμα ανακυκλώνεται εύκολα ως αδρανές για παραγωγή νέου σκυροδέματος. Εντούτοις, παρά το γεγονός ότι μια μερίδα του τσιμέντου στο παλαιό

σκυρόδεμα δεν έχει ενυδατωθεί, τουλάχιστον η ίδια ποσότητα νέου τσιμέντου πρέπει να χρησιμοποιηθεί, όπως στη παραγωγή σκυροδέματος από κανονικά ποσά αμμοχάλικου.

Η ετήσια «παραγωγή» των ορυκτών απορριμμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση εκτιμάται ότι υπερβαίνει τους 300 εκατομμύρια τόνους αλλά ήδη σε πολλές χώρες η αξιοποίησή τους με επαναχρησιμοποίηση υπερβαίνει έως και το 80% (Τσώχος & Οικονόμου, 2002). Δυστυχώς στην Ελλάδα το σύνολο σχεδόν των δομικών απορριμμάτων, που υπολογίστηκαν πάνω από 2 εκατομμύρια τόνοι το χρόνο, οδηγείται προς τυχαία απόθεση με τα γνωστά αρνητικά αποτελέσματα. Η σύσταση των δομικών απορριμμάτων είναι ένα άλλο σημαντικό στοιχείο. Σχετική έρευνα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ σε 8 κτίρια προς κατεδάφιση της Θεσσαλονίκης (Οικονόμου 2002), έδειξε σε γενικές γραμμές την ακόλουθη βασική σύσταση των δομικών απορριμμάτων: σκυρόδεμα 40%, κεραμικά υλικά 25%, ξύλο 15%, πλαστικά υλικά 5%, μεταλλικά υλικά 5%, διάφορα 10%. Εάν δεν υπολογισθούν τα είδη υγιεινής, τα ξύλινα στοιχεία, τα κουφώματα κλπ, τότε η σύσταση των δομικών απορριμμάτων είναι περίπου η ακόλουθη: σκυρόδεμα 55%, τοιχοποιία 40%, διάφορα 5%. Τα σχετικά αποτελέσματα συμφωνούν με βιβλιογραφικά δεδομένα (Mueller & Winkler, 1998) και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο κύριος όγκος των δομικών απορριμμάτων από κτίρια προς κατεδάφιση αποτελείται από σκυρόδεμα, κεραμικά υλικά και κονιάματα.

Είναι ενδεικτικό ότι στην Ολλανδία χρησιμοποιούνται ανακυκλωμένα αδρανή σε ποσοστό 18% του συνολικού απαιτούμενου όγκου πρώτων υλών. Ακόμη και τα μεταχειρισμένα ελαστικά (τα οποία συνήθως απορρίπτονται στις χωματερές) είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν στην παραγωγή τσιμέντου και οπλισμένου σκυροδέματος (καύση στους κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών για εξοικονόμηση ενέργειας, τεμαχισμό και χρησιμοποίηση ως αδρανούς υλικού, ανάκτηση του χάλυβα που περιέχουν και χρησιμοποίησή του ως οπλισμού κλπ.). Στη Μεγάλη Βρετανία βιομηχανίες έχουν λάβει την άδεια για καύση ελαστικών αυτοκινήτων συνολικού βάρους 100.000 τόνων για την παραγωγή τσιμέντου. Στη Φινλανδία το ετήσιο ανακυκλώσιμο ποσό σκυροδέματος από τα νέα κτίρια είναι 42 kg/κάτοικο και από την ανακαίνιση το ετήσιο ποσό είναι περίπου 10 kg/κάτοικο. Από τα κατεδαφισμένα κτίρια το ποσό αποβλήτων από το σκυρόδεμα και τα τούβλα είναι 60 kg/κάτοικο. Γενικότερα, το συνολικό ποσό αποβλήτων σκυροδέματος και τούβλων είναι πάνω από 110 kg/έτος/κάτοικο και μεταφέρεται συνήθως στις χωματερές. Εάν γίνει μια σωστή διαχείριση των μεγάλων αποστάσεων μεταφοράς, μια σχετικά μεγάλη μερίδα των αποβλήτων από σκυρόδεμα μπορεί να ανακυκλωθεί επικερδώς.

#### **4.2 Σκυρόδεμα Υψηλής Περιεκτικότητας σε Ιπτάμενη Τέφρα**

Το σκυρόδεμα υψηλής περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα (high-volume fly ash concrete - HVFA) αναπτύχθηκε προς το τέλος της δεκαετίας του '80 και παρέχει το πιο ελπιδοφόρο παράδειγμα για το πώς μπορούμε να χτίσουμε κατασκευές από σκυρόδεμα που να είναι ανθεκτικότερες και αποδοτικές, όσον αφορά τους φυσικούς πόρους, από τις συμβατικές. Είτε ως συστατικό του σύνθετου τσιμέντου Portland, είτε ως ορυκτή ανάμιξη που προστίθεται στο σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της μίξης, η περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα των HVFA μιγμάτων σκυροδέματος, είναι χαρακτηριστικά μεταξύ του 50 και 60% της μάζας του συνολικού υδραυλικού υλικού.

Εν συντομία, αυτός ο τύπος σκυροδέματος έχει μια πολύ χαμηλή αναλογία νερού/τσιμέντου, μια πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό και ενσωματώνει περίπου 55% ιπτάμενη τέφρα (ASTM Class F, ιπτάμενη τέφρα χαμηλού ασβεστίου). Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε νερό, χρησιμοποιείται υπερρευστοποιητής για να επιτευχθούν καθήσεις που κυμαίνονται από 150 έως 200mm. Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά είναι τυπικά του σκυροδέματος HVFA που χρησιμοποιείται για τα οδοστρώματα των εθνικών οδών:

- Ένα ελάχιστο ποσό από 50 ως 60% ASTM Class F ιπτάμενη τέφρα από τη μάζα των υδραυλικών υλικών.
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό, γενικά λιγότερη από 130 kg/m<sup>3</sup> του σκυροδέματος.

- Περιεκτικότητα σε τσιμέντο όχι περισσότερη από 200 kg/m<sup>3</sup> του σκυροδέματος, αλλά γενικά περίπου 150 kg/ m<sup>3</sup>.
- Χαμηλή δόση ενός υπερρυστοποιητή, εάν είναι απαραίτητο.
- Χαμηλή αναλογία νερού/τσιμέντου, γενικά λιγότερη από 0.35.

Εκτός από το γεγονός ότι το υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα με HVFA είναι ανώτερο από το κανονικό σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland σχεδόν σε όλες τις πτυχές, έχει επίσης σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Στο παρελθόν, τα HVFA μίγματα σκυροδέματος γενικά δεν απέδωσαν καλά όσον αφορά την ανάπτυξη της σταθερότητας, τη συρρίκνωση από ξήρανση και την ανθεκτικότητα. Αυτό έγινε επειδή η ιπτάμενη τέφρα που παράγονταν από τις παλαιές εγκαταστάσεις θερμικής ενέργειας ήταν πιο χονδρόκοκκη και περιείχε συνήθως περισσότερο άνθρακα. Τα εργαστήρια και η εμπειρία στο τομέα έχουν δείξει ότι όταν χρησιμοποιείται σε έναν μεγάλο όγκο η ιπτάμενη τέφρα από τις σύγχρονες εγκαταστάσεις θερμικής ενέργειας (που χαρακτηρίζονται γενικά από τη χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και την υψηλή λεπτότητα), είναι σε θέση να μεταδώσει την άριστη εργασιμότητα στο σκυρόδεμα, το οποίο έχει περιεκτικότητα σε νερό 15- 20% χαμηλότερη από αυτή στο σκυρόδεμα χωρίς ιπτάμενη τέφρα. Οι περαιτέρω μειώσεις της περιεκτικότητας σε νερό ανάμιξης μπορούν να επιτευχθούν με καλύτερης ποιότητας αδρανή και με τη βοήθεια υπερρυστοποιητών.

Ο σχεδιασμός των σύγχρονων οδοστρωμάτων των εθνικών οδών είναι βασισμένος στην αντοχή και στη κάμψη του σκυροδέματος. Το ενισχυμένο υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα με HVFA χρησιμοποιείται σε αποβάθρες, σε τοίχους που χρησιμοποιούνται ως αντιστηρίγματα και σε άλλα μέρη γεφυρών. Τα χλωριόντα, τα θειικά άλατα και η ενανθράκωση δεν διαπερνούν βαθιά το σκυρόδεμα με HVFA λόγω της πολύ χαμηλής διαπερατότητάς του. Υπάρχει μια παρερμηνεία μεταξύ μερικών μηχανικών από τις αναπτυσσόμενες χώρες, ότι η χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα αυξάνει τον κίνδυνο της διάβρωσης επειδή η ποζολανική αντίδραση μειώνει το pH. Οι πολυάριθμες δημοσιεύσεις παγκοσμίως και η διαδεδομένη χρήση του σκυροδέματος με ιπτάμενη τέφρα στις δομικές εφαρμογές στην Ευρώπη και στη Βόρεια Αμερική, υποστηρίζουν τη δυνατότητα που έχει το σκυρόδεμα με την ιπτάμενη τέφρα να προστατεύει τον ενισχυμένο χάλυβα από τη διάβρωση, υπό τον όρο ότι οι αναλογίες μιγμάτων τροποποιούνται κατάλληλα. Η πολύ χαμηλή διαπερατότητα του σκυροδέματος με HVFA αντισταθμίζει οποιαδήποτε οριακή μείωση του pH του σκυροδέματος, λόγω των μεγάλων ποσοτήτων της ιπτάμενης τέφρας. Στον Καναδά και τις ΗΠΑ, υπάρχουν παραδείγματα κτιρίων όπου το υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα με HVFA έχει χρησιμοποιηθεί και για τα θεμέλια και για τα δομικά μέλη. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα Ελληνικού χώρου είναι το φράγμα RCC του ποταμού Νέστου στην Πλατανόβρυση Δράμας. Ένα άλλο πλεονέκτημα του υψηλής απόδοσης σκυροδέματος με HVFA είναι η μειωμένη θερμότητα ενυδάτωσής του, λόγω των πολύ χαμηλών ποσών τσιμέντου.

### 4.3 Ανακυκλωμένο Γυαλί

Το γυαλί, υπό μορφή μπουκαλιών και βάζων, είναι ένα σημαντικό υλικό συσκευασίας παγκοσμίως. Τα συστήματα ανακύκλωσης γυαλιού ποικίλλουν από τη μια χώρα στην άλλη και εξαρτώνται πολύ από τα οικονομικά κίνητρα για τον καταναλωτή, τη βιομηχανία και την κοινωνία.

Στη Νορβηγία π.χ. ανακυκλώνεται σήμερα το 86% του γυαλιού που προέρχεται από τα μπουκάλια και βάζα. Τα μπουκάλια και τα βάζα συλλέγονται μέσω ενός συστήματος παράδοσης στις υπεραγορές ή στους στρατηγικά τοποθετημένους κάδους. Μετά από το καθάρισμα, το συλλεγμένο γυαλί ταξινομείται σε χρωματισμένους και μη χρωματισμένους τύπους και έπειτα τρίβεται και στη συνέχεια γίνεται μια νέα πρώτη ύλη. Περίπου το 1/3 του ανακυκλωμένου γυαλιού χρησιμοποιείται για τη νέα παραγωγή γυαλιού. Το άλλο 1/3 γίνεται πρώτη ύλη για την παραγωγή υλικού μόνωσης και το υπόλοιπο 1/3, το οποίο στους απολογισμούς της Νορβηγίας είναι περίπου 22.000 τόνοι, είναι διαθέσιμο για άλλους λόγους.

Το γυαλί μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή δομικών υλικών ως ελαφρύ αδρανές (πυκνότητα περίπου  $1120 \text{ kg/m}^3$ ). Η τραχεία επιφάνεια του προϊόντος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την άποψη της σύνδεσης και της σταθερότητας του νωπού σκυροδέματος, καθώς επίσης και μια απαίτηση για ένα υψηλότερο περιεχόμενο σε υλικά πληρώσεως για να εξασφαλίσει την αποδεκτή εργασιμότητα. Λόγω της ισχυρής δυνατότητας για την αντίδραση αλκαλοπυριτίου μεταξύ των αλκαλίων του τσιμέντου και του δραστικού πυριτίου στο γυαλί, η χρησιμοποίηση του γυαλιού ως χονδρό ή λεπτό αδρανές, απαιτεί ακόμα και τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας Class C (υψηλού ασβεστίου) για να ελέγξει την αντίδραση. Μέσω μιας ενδιαφέρουσας έρευνας (SINTEF, Trondheim), διάφορα μίγματα σκυροδέματος παρήχθησαν με θλιπτική αντοχή άνω των 40 MPa χωρίς σημαντική διόγκωση.

#### 4.4 Χρήση Άμμου Χυτηρίων και Σκωρίας Υψικαμίνων

Τα χυτήρια στη βιομηχανία χύτευσης μετάλλων παράγουν παραπροϊόντα όπως η χρησιμοποιημένη άμμος χυτηρίων, η σκωρία, η bag-house σκόνη κατά τη διάρκεια των διαδικασιών παραγωγής κυλίνδρων και σχηματοποίησης και σκωρία υψικαμίνου κατά τη διάρκεια των διαδικασιών τήξης. Η άμμος χυτηρίων αποτελεί την ομοιόμορφα ταξινομημένη, υψηλής ποιότητας άμμο πυριτίου, που συνδυάζεται με ένα υλικό σύνδεσης και χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει τις φόρμες για τις σιδηρούχες (σίδηρος και χάλυβας) και μη σιδηρούχες (χαλκός, αργίλιο και ορείχαλκος) χυτεύσεις. Η αυτοματοποιημένη βιομηχανία παράγει την πλειοψηφία των παραπροϊόντων χυτηρίων. Τα Αμερικάνικα χυτήρια δημιουργούν περίπου 15 εκατομμύρια τόνους παραπροϊόντων ετησίως.

Οι ιδιότητες της άμμου χυτηρίων ποικίλλουν και εξαρτώνται από το τύπο εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία στα χυτήρια από τον τύπο πρόσθετων ουσιών, από τις φορές που η άμμος επαναχρησιμοποιείται και από το τύπο και το ποσό του συνδετικού. Η σκωρία υψικαμίνων έχει χρησιμοποιηθεί επίσης ως χονδρόκοκκο αδρανές στο σκυρόδεμα. Η πυκνότητα της σκωρίας ορθοκαμίνων ( $1280 \text{ kg/m}^3$ ) είναι μεταξύ αυτής του κανονικού βάρους αδρανούς ( $1600 \text{ kg/m}^3$ ) και του δομικού ελαφρού αδρανούς ( $1120 \text{ kg/m}^3$ ).

*Εφαρμογές:* Μερικές εταιρίες έχουν αντικαταστήσει μέχρι και περίπου 8% από το βάρος της κανονικής άμμου με τη χρησιμοποιημένη άμμο χυτηρίων στο σκυρόδεμα. Εκτενείς έρευνες αποκάλυψαν ότι η άμμος χυτηρίων μπορεί να αντικαταστήσει την κανονική άμμο στο δομικό σκυρόδεμα σε ποσοστό μέχρι 35% σε βάρος. Περαιτέρω έρευνες καθόρισαν ότι η συνετή χρήση της ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας Class C, θα μπορούσε να αντισταθμίσει την οποιαδήποτε απώλεια αντοχής στο σκυρόδεμα που περιέχει την άμμο χυτηρίων.

Τα μίγματα σκυροδέματος με μια αναλογία άμμου χυτηρίων και κανονικής άμμου μεταξύ του 20 και 40% και με μια αντικατάσταση υδραυλικών υλικών μέχρι 25% από την ιπτάμενη τέφρα Class C, επιτυγχάνουν θλιπτικές αντοχές των 42 MPa σε 28 ημέρες. Η θλιπτική κι εφελκυστική αντοχή, ο συντελεστής ελαστικότητας και η αντοχή στη τριβή, του μίγματος που περιέχει την αντικατάσταση μέχρι 40% της κανονικής άμμου με την άμμο χυτηρίων, συγκρίθηκε με τις ίδιες ιδιότητες ενός ελεγχόμενου σκυροδέματος (42 MPa). Το μίγμα με 40% άμμο χυτηρίων παρουσίασε ελαφρώς υψηλότερη αντοχή από το σκυρόδεμα αναφοράς. Η επίδραση της άμμου χυτηρίων και της ιπτάμενης τέφρας στην εφελκυστική αντοχή των μιγμάτων ήταν παρόμοια με αυτήν που παρατηρήθηκε για τη θλιπτική αντοχή, ενώ ο συντελεστής της ελαστικότητας δεν επηρεάστηκε αρκετά. Και τα δύο συγκεκριμένα μίγματα παρουσίασαν υψηλή αντοχή στην τριβή.

Σε άλλη έρευνα για την αξιολόγηση της απόδοσης των παραπροϊόντων χυτηρίων στο σκυρόδεμα, έγιναν δύο σειρές μιγμάτων: η αερόψυκτη σκωρία χυτηρίων χρησιμοποιήθηκε στο σκυρόδεμα ως αντικαταστάτης (50 και 100%) χονδρόκοκκων αδρανών και η άμμος χυτηρίων χρησιμοποιήθηκε ως μερικός αντικαταστάτης (μέχρι 35%) λεπτόκοκκων αδρανών, με πλεονεκτικά αποτελέσματα. Οι Naik, Singh, και Ramme υπέβαλαν μια έκθεση σχετικά με τη χρήση της χρησιμοποιημένης άμμου χυτηρίων σε παραγωγή σκυροδέματος ελεγχόμενης χαμηλής αντοχής. Τα αποτελέσματα



τους έδειξαν ότι η άμμος χυτηρίων μείωσε τη συγκέντρωση ορισμένων μολυσματικών παραγόντων και εξασφάλισε καλύτερη υδατοπερατότητα.

#### 4.5 Τέφρα Βιομάζας

Η τέφρα διαφόρων μορφών βιομάζας είναι ένα επίκαιρο παραπροϊόν που δημιουργείται κατά την καύση υπολειμμάτων ξύλου και διάφορων αγροτικών παραπροϊόντων (κλαδεμάτων, στελεχών, πυρήνων ελιάς, κλπ.) για την παραγωγή ενέργειας. Η βιομάζα αυτή (σε μορφή pellets ή άλλως) καίγεται παρουσία ή όχι συμπληρωματικών καυσίμων, όπως ο άνθρακας, το κοκ πετρελαίου, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η τέφρα αυτή αποτελείται από ανόργανες και οργανικές ενώσεις. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητές της καθορίζουν τις ευεργετικές χρήσεις της, και επηρεάζονται από τα είδη του ξύλου και τις μεθόδους καύσης, οι οποίες περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία καύσης, την αποδοτικότητα του λέβητα και τα συμπληρωματικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται.

Ένας μέσος όρος περιεκτικότητας σε υγρασία είναι περίπου 13% για την ιπτάμενη τέφρα και 22% για την τέφρα πυθμένα, αλλά ποικίλει από 0-79%. Ο μέσος όρος της πυκνότητας (ASTM C 29) είναι  $490 \text{ kg/m}^3$  για την ιπτάμενη τεφρά και  $827 \text{ kg/m}^3$  για την τέφρα πυθμένα. Ο μέσος δείκτης δραστηριότητας ASTM C 311/C 109 των 28 ημερών για την ιπτάμενη τέφρα είναι περίπου 66%. Η μέση απαίτηση νερού (ASTM C 311) για την ιπτάμενη τέφρα ξύλου είναι 11.6%. Γενικά, η ιπτάμενη τέφρα βιομάζας έχει ιδιότητες μεταξύ αυτών της ιπτάμενης τέφρας άνθρακα Class C και της ηφαιστειακής τέφρας.

*Εφαρμογές:* Περίπου το 70% της τέφρας βιομάζας που παράγεται στις ΗΠΑ χρησιμοποιείται στα υλικά οδοποιίας. Ένα πρόσθετο 20% χρησιμοποιείται ως εδαφολογικό συμπλήρωμα. Βασισμένοι στις φυσικές, χημικές και ορυκτολογικές ιδιότητες, οι Naik και Kraus ανέφεραν ότι η τέφρα ξύλου παρουσιάζει ουσιαστική δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως ποζολανικό ανόργανο συστατικό και ως ενεργοποιητής στο σκυρόδεμα και τα κονιάματα. Το σκυρόδεμα, με την αντικατάσταση μέχρι και 35% του υδραυλικού υλικού από τέφρα, απέκτησε θλιπτικές αντοχές των 35 MPa.

Σε πειράματα που έγιναν σε συγκεκριμένα μίγματα σκυροδέματος, τέφρα βιομάζας χρησιμοποιήθηκε για να αντικαταστήσει περίπου το 15, 25 και 35% του τσιμέντου. Μερικά μίγματα παρήχθησαν με τέφρα ξύλου και ιπτάμενης τέφρας Class C μαζί. Χρησιμοποιήθηκαν δύο επίπεδα αντικατάστασης της αναμειγμένης τέφρας (περίπου 25 και 35%). Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

- Οι ποζολανικές συνεισφορές της τέφρας βιομάζας ήταν σημαντικές.
- Ο συνδυασμός της τέφρας βιομάζας με την ιπτάμενη τέφρα Class C βελτίωσε σημαντικά την απόδοση του σκυροδέματος.
- Το δομικό σκυρόδεμα έκανε τη χρήση της τέφρας βιομάζας ή/και των μιγμάτων του να επιτύχουν θλιπτικές αντοχές έως 50MPa σε 28 ημέρες.

#### 4.6 Στερεά Υπολείμματα Κατεργασίας Πολτού και Χαρτιού

Περισσότεροι από 4 εκατομμύρια τόνοι στερεών υπολειμμάτων πολτού και χαρτιού, από τους αρχικούς καθαριστήρες, παράγονται στην Αμερική. Ο πολτός και η λάσπη χαρτιού (ή στερεά υπολείμματα, όταν μειώνεται η περιεκτικότητά τους σε νερό) αποτελούνται από ίνες κυτταρίνης (και ξύλινα σωματίδια), άργιλο, ενώσεις τριμμένης τέφρας, χημικές ουσίες και υγρασία. Αυτήν την περίοδο, περίπου τα μισά από τα στερεά υπολείμματα τοποθετούνται στο έδαφος, το 1/4 αποφερώνεται και τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται με κάποιο άλλο τρόπο, όπως στην αποκατάσταση μεταλλευμάτων, για την εδαφολογική βελτίωση του καλλιεργήσιμου εδάφους ή για τη βοήθεια της κομποστοποίησης.

*Εφαρμογές:* Περίπου 300kg λάσπης παράγονται για κάθε τόνο χαρτιού. Οι Soroushian, Shah, και Won χρησιμοποίησαν τις ανακυκλωμένες ίνες για την παραγωγή προϊόντων τσιμέντου, λεπτού

επικαλύμματος. Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσίασαν βελτίωση στην δύναμη κάμψης και την ανθεκτικότητα.

Μελέτες που αφορούν τη χρήση των μελανωμένων και πρωτογενώς καθαρισμένων υπολειμματικών στερεών έγιναν στο σκυρόδεμα. Πριν την ανάμιξη, τα υπολειμματικά στερεά τους προαναμίχθηκαν με νερό και με ρευστοποιητές για να τα αποκροκιδώσουν. Σε 28 ημέρες, η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή και η αντοχή κάμψης του σκυροδέματος που περιέχει τα μελανωμένα υπολειμματικά στερεά, ήταν μεταξύ 45 και 75% των αντίστοιχων δυνάμεων ενός σκυροδέματος αναφοράς με 0% υπολειμματικά στερεά. Η προσθήκη των υπολειμματικών στερεών στο σκυρόδεμα μείωσε τη διείσδυση των χλωριόντων. Το σκυρόδεμα που περιέχει υπολειμματικά στερεά παρουσίασε επίσης υψηλότερη αντίσταση στα άλατα που προκαλούν ζημία κατά την πήξη και τήξη. Τα στερεά από την ανακύκλωση χαρτιού πρέπει να διασκορπιστούν κατάλληλα στο νερό, κατά προτίμηση σε καυτό νερό, πριν χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή του σκυροδέματος.

#### **4.7 Άλλα Προϊόντα των Μεταλλευτικών Βιομηχανιών**

Οι περισσότερες εξορυκτικές και μεταλλευτικές επιχειρήσεις παράγουν απόβλητα ή παραπροϊόντα. Οι περιοχές απόθεσης αποβλήτων έχουν μειωθεί και η φορολογία για τις αποθέσεις έχει δημιουργήσει ισχυρότερη ενημέρωση και προσπάθειες ώστε να μετατραπούν τα απόβλητα σε δευτεροβάθμια προϊόντα. Η οικολογική συνειδητοποίηση και τα ισχυρότερα οικονομικά κίνητρα έχουν επιταχύνει αυτήν την διαδικασία.

Τα ημιμεταλλικά απόβλητα από την παραγωγή των οξειδίων ιλλουμινίτη και τιτανίου, έχουν χρησιμοποιηθεί ως συσσωματώματα για την παραγωγή σκυροδέματος με υψηλότερη πυκνότητα από αυτή του κανονικού. Τέτοιο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους τοίχους αντιστήριξης, στα θεμέλια και στα δάπεδα με θλιπτική αντοχή που ξεπερνά τα 30 MPa. Το επικάθημα (κέικ) των φίλτρων, ένα παραπροϊόν της παραγωγής καρβιδικού ασβεστίου, έχει χρησιμοποιηθεί σαν υλικό πληρώσεως στα μίγματα σκυροδέματος για διάφορους λόγους. Το κύριο συστατικό του επικαθήματος είναι το  $\text{CaCO}_3$  σε μέγεθος κόκκων πολύ μικρότερο από εκείνο των παραδοσιακών υλικών πληρώσεως. Είναι ένας πολύ αποτελεσματικός σταθεροποιητής για τα σκληρά μίγματα και έχει επίσης ιδιότητες αντικατάστασης τσιμέντου σε μικρές δόσεις (λιγότερο από 15% του βάρους τσιμέντου). Από το υπόλειμμα της παραγωγής κροκιδών, μια επιχείρηση παραγωγής ανυδρίτη, χρησιμοποιώντας έναν ρευστοποιητή ως διαλυτή των συσσωρευμένων κόκκων και το τσιμέντο ως ενεργοποιητή, αναπτύσσει σημαντικά υλικά αντικατάστασης τσιμέντου σε κονιάματα, κλπ. εφαρμογές.

## **5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Σήμερα οι γρήγοροι ρυθμοί αστικοποίησης και οικονομικής μεγέθυνσης έχουν οδηγήσει σε αλόγιστη σπατάλη ενέργειας και φυσικών πόρων. Ως ο μεγαλύτερος καταναλωτής των φυσικών πόρων και ως σημαντικός καταναλωτής ενέργειας, η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος είναι ένας από τους αρχικούς συντελεστές στη μη βιωσιμότητα. Εντούτοις, οι οικονομικά αποδοτικές και οικολογικές τεχνολογίες που είναι τώρα διαθέσιμες, θα επιτρέψουν την εισαγωγή των βιομηχανικών παραπροϊόντων στα συμβατικά μίγματα σκυροδέματος. Έτσι οδηγούμαστε στη βιώσιμη κατασκευή, η οποία με νέο οικολογικό χαρακτήρα, θα προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε θέματα ανθεκτικότητας, οικονομικού ενδιαφέροντος αλλά και σε βελτιωμένων περιβαλλοντικών επιδόσεων. Αυτό θα συμβεί καθώς η υποκατάσταση ή η αντικατάσταση ορισμένων ρυπογόνων, κατά την παραγωγή τους, πρώτων υλών, θα μειώσει σημαντικά το περιβαλλοντικό κόστος των κατασκευών και θα κάνουν τον τομέα δόμησης φιλικότερο προς το περιβάλλον.

Η σημαντική βελτίωση στην αποδοτικότητα των πόρων στη βιομηχανία σκυροδέματος είναι δυνατή εάν, μακροπρόθεσμα, μειώσουμε το ποσοστό κατανάλωσης του σκυροδέματος με την επιμήκυνση της ζωής των κατασκευών. Επιπλέον η υποκατάσταση και η αντικατάσταση ορισμένων πρώτων υλών καθώς και η ανακύκλωση, είναι μερικές έννοιες, που μπορούν να εφαρμοστούν ικανοποιητικά στον κατασκευαστικό τομέα με σημαντικά περιβαλλοντικά ευεργετήματα.

Η χρησιμοποιημένη άμμος χυτηρίων μπορεί να αντικαταστήσει την κανονική άμμο στο σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland. Η σκωρία υψικαμίνου, από τα χυτήρια χάλυβα και σιδήρου, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην κατασκευή ελαφροβαρούς σκυροδέματος. Το καταναλωτικό γυαλί μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μερική αντικατάσταση των λεπτόκοκκων προσθέτων στο κανονικό και εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Οι τέφρες βιομάζας έχουν σημαντικές ποζολανικές ιδιότητες και είναι χαρακτηριστικά πιο δραστικές από τις φυσικές ποζολάνες, αλλά λιγότερο δραστικές από την ιπτάμενη τεφρά υψηλού ασβεστίου. Το σκυρόδεμα που περιέχει υπολειμματικά στερεά από τον πολύ χαρτιού από τις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης χαρτιού, βελτιώνει την αντοχή στη διείδυση χλωριόντων και στην πήξη και τήξη χωρίς απώλεια αντοχών. Όλα αυτά, μαζί με το γεγονός ότι το σκυρόδεμα είναι ένα από τα ευκολότερα ανακυκλώσιμα οικοδομικά υλικά, βελτιώνει την οικολογική ισορροπία του σκυροδέματος και μπορεί να την μεταφέρει στην ομάδα των δομικών υλικών που επιβαρύνουν το περιβάλλον ελάχιστα.

Συμπερασματικά, μεγάλη έμφαση πρέπει να δοθεί στις εξής παρατηρήσεις:

1. Οι βιομηχανίες τσιμέντου και σκυροδέματος πρέπει να στοχεύσουν προς μια βιώσιμη ανάπτυξη, και να απαντήσουν πειστικά στην ποικιλία των προκλήσεων. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών του CO<sub>2</sub>, καθώς επίσης και η ανακύκλωση του σκυροδέματος είναι πολύ σημαντικά παραδείγματα.
2. Η αυξανόμενη αποδοχή της ισορροπημένης κατανάλωσης των πόρων και οι προτεραιότητες στα περιβαλλοντικά ζητήματα, δημιουργούν νέες δυνατότητες για τη βιομηχανία σκυροδέματος και συναρπαστικές προκλήσεις για την έρευνα του τσιμέντου και του σκυροδέματος.
3. Πρέπει να δοθούν κίνητρα, οικονομικά και φορολογικά, από τους πολιτικούς και νομοθετικούς φορείς στις βιομηχανίες και τους χρήστες ώστε να χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο ανακυκλωμένα υλικά.
4. Οι τρέχουσες τεχνολογίες στον τομέα δόμησης πρέπει να αλλάξουν. Αυτό θα μπορέσει να γίνει εφικτό μόνο εάν εμφανιστούν μεταρρυθμίσεις στο παρόν σύστημα εκπαίδευσης και έρευνας, στους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας του σκυροδέματος και των δομικών υλικών προς ένα «πρασίνισμα» ολόκληρου του κατασκευαστικού κλάδου.

## 6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Βαβίζος Γ., Μερτζάνης Α., Περιβάλλον, Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2003.
2. Καρβούνης Σ., Γεωργακέλλος Δ., Διαχείριση του Περιβάλλοντος, Επιχειρήσεις και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα 2003.
3. Μπούρα Α., Κορωνάιος Χ., Οικονόμου Ν., Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης στα δομικά υλικά: Εφαρμογή στο σκυρόδεμα.
4. Οικονόμου Ν., Ανακυκλωμένο Σκυρόδεμα, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ.
5. Παπαδάκης Ε.Γ., Υπολογισμός διάρκειας ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα και πειραματική επιβεβαίωση, Επιστημονικό Πάρκο Πατρών Α.Ε., 2006.
6. Παπαδάκης Ε.Γ., Ευσταθίου Μ.Π., Ποσοτική συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων βιομηχανικών παραπροϊόντων ως πρόσθετα σκυροδέματος, 1<sup>ο</sup> Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ, Θεσσαλονίκη 2005.
7. Badogiannis, E., V.G. Papadakis, E. Chaniotakis, and S. Tsimvilis, 2004. Exploitation of Poor Greek Kaolins: Strength Development of Metakaolin Concrete and Evaluation by means of k-value, Cement and Concrete Research, Vol. 34(6), 1035-1041.
8. Berry, E.E., and Malhotra, V.M., 1987. Fly Ash in Concrete, in: Supplementary Cementing Materials for Concrete, Ed. V.M. Malhotra, CANMET SP-86-8E ,p. 35, Ottawa.

9. Bouzoubaa, N., Zhang, M. H.: Bilodeau, A. and Mahotra, V. M., "Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with High-Volume Fly Ash Blended Cements," Sixth CANMET/ACI/JCI Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP-178, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1998, pp. 575-603.
10. Connaughton, J. "Life Cycle Energy Costing," CIBSE Journal, Oct. 1990. Marsh. R., "The Energy of Building," Structural Engineer (London V. 67, No. 24,1989, p. 438.
11. Hawken, P., Lovins, E., and Lovins H., Natural Capitalism - Creating the Next Industrial Revolution, Little Brown and Co., 1999. 369 pp.
12. Industrially interesting approaches to "low-CO<sub>2</sub>" cements, Ellis Gartner, Lafarge Laboratoire Central de Recherche, 95 Rue du Montmurier, St. Quentin Fallavier 38291, France
13. Jahren, P., "Sustainable Development of Cement and Concrete: Two Practical Examples of Typical Implication for the Future," CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry, Ottawa, Canada, Oct. 21-23,1998, 198 pp.
14. Kreijger, P.C., "Ecological Properties of Building Materials." Materials and Structures, V. 20, No. 118, 1987, pp. 248-254.
15. Langley, W. S.; and Leaman, G. H., "Practical Uses for High-Volume Fly Ash Concrete," Sixth CANMET/ACI/JCI Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP-178, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1998, pp.545-574.
16. Malhotra, V. M, "Superplasticized Fly Ash Concrete for Structural Applications," Concrete international, V.8, No.12, Dec.1986, pp.28-31.
17. Malhotra, V. M, "Making Concrete Greener with Fly Ash," Concrete International, V. 21, No. 5, May 1999, pp. 61-66.
18. Malhotra, V. M, and Mehta, P. K, "High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixtures Incorporating Properties, Construction Practice and Case Histories," Jan, 2002 (available from the first author).
19. Mehta, P. K., "Reducing the Environmental Impact of Concrete", Concrete International, V. 23, No. 10, Oct. 2001, pp. 61-66.
20. Mehta, P. K., "Concrete Technology of Sustainable Development", Concrete International, V. 21, No. 11, Nov. 1999, pp. 47-53.
21. Mehta, P. K., and Burrows, R. W., "Building Durable Structures in the 21<sup>st</sup> Century," Concrete International, V.23, No.3, Mar.2001, pp.57-63.
22. Mehta, P.K., "Concrete Technology at the Crossroads, Problems and Opportunities," Concrete Technology: Past, Present, and Future, SP-144, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1993, pp.1-31.
23. Naik, T. R., et al, "Flexural Fatigue Strength Data of HVFA Concrete Systems," CBU Report 1998-07, University of Wisconsin-Milwaukee, Center for By-Products Utilization, EMS Building.
24. Naik, T. R.; Singh, S. S.; Tharaniyil, M. P.; and Wendorf, R. B., "Application of Foundry By-Product Materials in Manufacture of Concrete and Masonry Products," ACI Materials Journal, V.93, No.1, Jan.-Feb.1996, pp.41-50.
25. Naik, T.R. Singh, S.S., "Flowable Slurry Containing Foundry Sands, "Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, V.9, No.2,1997, pp.93-102.
26. Naik, T. R., "Tests of Wood Ash as a Potential Source for Construction Materials," CBU-1999-09, UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, Aug. 1999, 61 pp.
27. Naik, T.R. and Kraus, R.N., "Wood Ash: A New Source of Pozzolanic Material," Submitted to Concrete International, Oct. 2001, 23 pp.
28. Naik, T. R., "Use of Residual Solids from Pulp and Paper Mills for Enhancing Strength and Durability of Ready-Mixed Concrete," CBU-2002-03, UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, Jan. 2002, 67 pp.
29. National Council for Air and Stream Improvement, Inc. (NCASI), "Alternative Management of Pulp and Paper Industry Solid Wastes," Technical Bulletin No. 655, NCASI, New York, N.Y., Nov. 1993.
30. Papadakis, V.G., 1999. Experimental Investigation and Theoretical Modeling of Silica Fume Activity in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 29, p.79.
31. Papadakis V.G., 2000. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, Cement and Concrete Research, Vol. 30(2), 291.
32. Papadakis, V.G. and S. Tsimas, 2002. Supplementary Cementing Materials in Concrete - Part I: Efficiency and Design, Cement and Concrete Research, Vol. 32(10), 1525-1532.
33. Shalini Anand, Prem Vrat, R.P. Dahiya, Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO<sub>2</sub> emissions from the cement industry
34. Soroushian, P., Shah, S. P., and Won, J. P., "Optimization of Waste Paper Fiber-Cement Composites," ACI Materials Journal, V.92, No.1, Jan.-Feb.1995, pp.82-92.