

# Εκφάνσεις αειφορίας σε τσιμέντο και σκυρόδεμα με ορίζοντα το 2050

## Sustainability aspects in cement and concrete towards 2050

Σταμάτης Τσίμας<sup>1</sup>

*Λέξεις κλειδιά: Αειφορία, Απόβλητα, Κυκλική Οικονομία, Συνεπεξεργασία*  
*Keywords: Sustainability, Waste, Circular Economy, co-treatment*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Ο χώρος των δομικών υλικών και ειδικότερα αυτός των Κονιών, Κονιαμάτων και Σκυροδέματος (ΚΚΣ) συμβάλλει πολλαπλώς στην αειφορία των κατασκευών και γενικότερα στην προστασία του περιβάλλοντος. Στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος έχουν εργαστηριακά μελετηθεί και στην πράξη επιτυχώς εφαρμοστεί πολλαπλές παρεμβάσεις με κοινή συνισταμένη τη συμβολή στην αειφορία των ΚΚΣ, Με ορίζοντα το 2050 και υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας, στην ανακοίνωση, εκτός από τα ιδιαίτερος μελετημένα και επιτυχώς εφαρμοσμένες περιβαλλοντικές λύσεις, συζητούνται περαιτέρω τεχνολογικά ορθές και συνάμα οικολογικές παρεμβάσεις. Σε αυτές συγκαταλέγονται: η συνεπεξεργασία πάσης φύσεως αποβλήτων με τις πρώτες ύλες, η ανάπτυξη ειδικών τσιμέντων και σκυροδεμάτων μειωμένων ενεργειακά απαιτήσεων, η αξιοποίηση των προϊόντων από κατεδαφίσεις, η χρησιμοποίηση εναλλακτικών καυσίμων και η ελαχιστοποίηση του επιστρεφόμενου απορριπτόμενου έτοιμου σκυροδέματος

**ABSTRACT:** The building materials area, and in particular that of Cement, Mortar and Concrete (CMC), contributes to the sustainability of constructions and, more generally, to the protection of the environment. In the process of production of cement and concrete have been studied in practice and have been successfully implemented many interventions with a common contribution to the sustainability of CMC. Looking forward 2050 and under circular economy rules, in the presentation and in addition to highly studied environmental benefits, further technologically and ecological correct are discussed. These include: the co-processing of wastes, the development of special cements and concretes, the use of demolition products for both the replacement of aggregates and the raw material mix, the use of alternative fuels and the minimization of disposed ready-mixed concrete from its respective manufacturing units.

---

<sup>1</sup> Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ, Email: [stangits@central.ntua.gr](mailto:stangits@central.ntua.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι η βιομηχανία τσιμέντου έχει σημαντική συμμετοχή στις εκπομπές CO<sub>2</sub> αντιπροσωπεύοντας περίπου το 5-6% της παγκόσμιας ανθρωπογενούς παραγωγής CO<sub>2</sub>, παράλληλα όμως έχει πολλαπλή και ουσιαστική συμβολή στις αναληφθείσες, εδώ και 25 χρόνια, προσπάθειες μείωσης του. Επιπροσθέτως, τα συμβατικά κτίρια από σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της ζωής τους είναι υπεύθυνα για το 18% της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως και, μένοντας στην Ευρώπη, το ποσοστό αυτό μπορεί να φθάσει και το 35%. (Cembureau 2014). Και στον τομέα όμως αυτό, με τις προσπάθειες που έχουν την τελευταία 15ετία αναληφθεί για έξυπνα σχεδιασμένο σύγχρονο σκυρόδεμα, τα κτίρια στο σύνολό τους μπορούν να χρησιμοποιήσουν κατά 75% λιγότερη ενέργεια. Ειδικά για το σκυρόδεμα ενδιαφέρον έχει η διαπίστωση ότι παγκοσμίως παράγονται ανά έτος 3τόνοι /άτομο, ποσότητα που είναι διπλάσια από όλα τα άλλα γνωστά δομικά υλικά μαζί (Cembureau 2016).

Η εστίαση, με στόχο την αειφορία, των ερευνητικών προσπαθειών των ασχολουμένων στο χώρο θα πρέπει να συνεκτιμήσει ότι αναμένεται: i) έως το 2050 αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού από 7 σε 9,3 δισεκατομμύρια. την ίδια στιγμή που εκτιμάται ότι ο αστικός πληθυσμός θα αυξηθεί από 3,6 δις. σε περισσότερο από 6 δις. το 2050 και ii) αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων κατά 80% λόγω 4πλασιασμού της παγκόσμιας οικονομίας. Τα ως άνω στοιχεία ενέχουν βεβαίως το ρίσκο της πρόβλεψης καθόσον δεν μπορούν με ακρίβεια να εκτιμηθούν τα οικονομικά δεδομένα 30 χρόνια μετά, όπως 30 χρόνια πριν δεν μπορούσε να προβλεφθεί η γιγάντωση της οικονομίας της Κίνας και η πρωταγωνιστική διείσδυση της στην παγκόσμια αγορά.

Η εργασία επομένως αυτή έχει δύο στόχους όπως είναι: α) η επιγραμματική ανάλυση των διαφορετικών ερευνητικών πρωτοβουλιών που έχουν αναληφθεί σε Ευρωπαϊκή και Πανελλήνια κλίμακα και που έχουν οδηγήσει τόσο σε εξοικονόμηση πρώτων υλών και ενέργειας, όσο και μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και β) η επικέντρωση σε περαιτέρω προσπάθειες που πρέπει να αναληφθούν και οι οποίες, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, θα συμβάλλουν για να προβληθούν στο 2050 και να βελτιωθούν περαιτέρω τα επιτεύγματα από τη διατιθέμενη σημερινή τεχνολογία.

### 1. Ο ρόλος των εκπομπών CO<sub>2</sub> και οι διαχρονικές προσπάθειες μείωσης των

Δεν απαιτείται ιδιαίτερη εμβάθυνση στα θέματα της βιομηχανίας τσιμέντου για να γίνει αντιληπτό ότι η περιβαλλοντική επιβάρυνση (και συνεπώς οι προσπάθειες για αποφυγή τους στο πλαίσιο μιας αειφόρου αντιμετώπισης) από αυτήν εστιάζεται: i) στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, ii) στην απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγική διαδικασία και iii) στην μεγάλη κατανάλωση φυσικών πόρων που αποτελούν τις πρώτες ύλες για την παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, i) οι εκπομπές CO<sub>2</sub> οφείλονται τόσο στην αναπόφευκτη διάσπαση του ασβεστόλιθου όσο και στην καύση του καυσίμου στις Περιστροφικές Καμίνους (ΠΚ), ii) η ενέργεια είναι απαραίτητη κυρίως ως θερμική για την επίτευξη των θερμοκρασιών (>1400°C) κλινκεροποίησης αλλά και ως ηλεκτρική για την άλεση του τελικού

προϊόντος και iii) ο ασβεστόλιθος κυρίως και τα άλλα αργιλλοπυριτικά συστατικά δίδουν τις πρώτες ύλες για τη σύνθεση των απαραίτητων ορυκτολογικών συστατικών του κλίνκερ. Στην κατηγορία αυτή βεβαίως προσμετρώνται και οι ορυκτοί άνθρακες που χρησιμοποιούνται για την καύση. Οι τρεις αυτές συνιστώσες είναι αλληλένδετες έχοντας όμως ως συνισταμένη τη μείωση των εκπομπών. Συνεπώς τα μέτρα που θα ληφθούν είτε για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας είτε για υποκατάσταση των φυσικών πόρων ή βελτίωση των υφιστάμενων, θα μειώσουν εκ των πραγμάτων τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και, κατά συνέπεια δικαιολογείται η εστίαση σε αυτές (Gartner, 2002).

Άμεση συνέπεια των προηγούμενων αποτελεί το γεγονός ότι στην Ευρώπη, για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> από 720 σε 650 kg/t τσιμέντου τα τελευταία 25 χρόνια, δεν υπήρχε μία λύση και δεν ακολουθήθηκε κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία, αλλά αντιθέτως αυτό υπήρξε συνδυασμός ενός μίγματος μεθοδολογιών και επενδύσεων οι οποίες μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν:

Αντικατάσταση των παλαιότερων περιστροφικών καμίνων υγρής μεθόδου με αντίστοιχους ξηρής μεθόδου οι οποίες είναι πολύ περισσότερο ενεργειακά αποδοτικές. Σήμερα, πάνω από το 90% του κλίνκερ που παράγεται στην Ευρώπη βασίζεται σε καμίνους αυτής της μεθόδου (Cembureau, 2014).

Αντικατάσταση μέρους του κλίνκερ με υλικά με ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες όπως αλεσμένες φυσικές ποζολάνες (Φτίκος, 1977), δραστικά βιομηχανικά παραπροϊόντα (πχ ιπτάμενες τέφρες) (Papayianni, 1987, Mehta, 1998), λεπτώς αλεσμένο ασβεστολιθικό υλικό (Tennis et al, 2011, Tsvivilis et al, 2000) και άλλα.

Βελτίωση των τεχνολογιών άλεσης με αποτέλεσμα αποδοτικότερη χρήση της προσφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Χρήση μεγαλύτερων ποσοτήτων εναλλακτικών καυσίμων (επταπλάσια αύξηση από το 1990), που συνίσταται στη χρήση είτε αποβλήτων είτε βιομάζας.

Αξιοποίηση της κατανάλωσης θερμικής ενέργειας, μέσω εγκατάστασης συστημάτων ελαχιστοποίησης των απωλειών θερμότητας. (Βελτιστοποίηση μονώσεων ΠΚ, παράλληλα με αξιοποίηση του θερμικού περιεχομένου των απαιριών και κλίνκερ).

Εκσυγχρονισμό των υφιστάμενων εγκαταστάσεων με την εγκατάσταση τελευταίας τεχνολογίας συστημάτων αυτομάτου ελέγχου της διαδικασίας

Χρήση ευρείας γκάμας απορριμμάτων και αποβλήτων αντί του ασβεστόλιθου αλλά και άλλων φυσικών υλικών που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες, φορείς CaO στην παρασκευή κλίνκερ

Με τη συνδυαστική χρήση όλων αυτών των μεθοδολογιών και με την επιρόσθητη παρατήρηση ότι για τις δύο πρώτες ενέργειες, ήδη πριν από το 1990 είχαν ξεκινήσει οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες και επιτυχείς εφαρμογές, καταγράφεται στην Ευρώπη τα τελευταία 25 χρόνια μια μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 32% περίπου (από τους 170Mt στους 113Mt). Η μείωση αυτή κατανέμεται: i) στη βελτίωση της αποδοτικότητας των ΠΚ, παράλληλα με την εισαγωγή νέων τύπων καυσίμων (34 Mt CO<sub>2</sub>), ii) στην υποκατάσταση μέρους του κλίνκερ με νέα υλικά και στη διαρκή έρευνα για δημιουργία νέων τύπων τσιμέντου που καταγράφονται πλέον στα EN (11 Mt CO<sub>2</sub>), iii) στη μείωση των

εκπομπών από τη διάσπαση του ασβεστόλιθου λόγω της χρησιμοποίησης εναλλακτικών φορέων CaO (10 Mt CO<sub>2</sub>) και iv) διάφορες άλλες ενέργειες (2 Mt CO<sub>2</sub>).

## 2. Από τη διαχείριση των πόρων στη διαχείριση των αποβλήτων

Από τα ήδη εκτεθέντα φάνηκε ότι κλειδί για την εξοικονόμηση ενέργειας και πρώτων υλών παράλληλα με τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι η χρησιμοποίηση επιλεγμένων ποσοτήτων αποβλήτων σε διάφορες φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου που μπορεί να αποδοθεί με τον όρο συνεπεξεργασία (co-processing). Φαίνεται επομένως ότι, οι βιομηχανίες τσιμέντου αλλά και σκυροδέματος, προσβλέποντας σε μία αιεφόρο ανάπτυξη και εξασφαλίζοντας και στο μέλλον (2050) επαρκές και ποιοτικό τσιμέντο, μεταθέτουν το προβληματισμό τους της διαχείρισης των πόρων σε αυτόν της διαχείρισης των αποβλήτων. Είναι προφανές ότι παρά την κοινή βάση, κάθε χώρα ανάλογα με τα απόβλητά της αλλά και τις δυνατότητες της αγοράς της, προσεγγίζει το πρόβλημα από διαφορετική οπτική.

Γενικά η συνεπεξεργασία είναι η χρήση αποβλήτων ως πρώτης ύλης ή ως πηγής ενέργειας για την αντικατάσταση τόσο των φυσικών ορυκτών πόρων όσο και των ορυκτών καυσίμων. Η συνεπεξεργασία των αποβλήτων στη βιομηχανία τσιμέντου παρέχει μέγιστη αντικατάσταση μη ανανεώσιμων υλικών καθόσον καλύπτει υλικά στα οποία η ανακύκλωση δεν είναι πάντα οικονομικά και οικολογικά βιώσιμη επιλογή, ενώ έχει το μοναδικό πλεονέκτημα της καταστροφής πληθώρας επικίνδυνων υλικών που υπάρχουν στα απόβλητα. Εντελώς περιληπτικά οι υψηλές θερμοκρασίες μέσα στην ΠΚ εξασφαλίζουν μια πλήρη καταστροφή των οργανικών ενώσεων, ολική εξουδετέρωση των όξινων αερίων, ενσωμάτωση βαρέων μετάλλων στη δομή του κλίνκερ και δεν δημιουργούν παραπροϊόντα, όπως υπολειμματική τέφρα.

Με δεδομένο ότι η συνεπεξεργασία αποβλήτων αποδεικνύεται κομβικής σημασίας για την αιεφόρο ανάπτυξη της βιομηχανίας τσιμέντου, προβάλλει επιτακτικό το θέμα της σωστής διαχείρισης τους, διαχείριση που θα είναι διαφορετική σε κάθε χώρα ανάλογα με τις διατιθέμενες ροές τους. Με γνώμονα την εξασφάλιση ομοιογένειας και σταθερής τροφοδοσίας στη ροή αποβλήτων που θα χρησιμοποιηθεί από τη βιομηχανία τσιμέντου, απαιτείται προ επεξεργασία τους που θα ομαλοποιήσει τη ροή εξασφαλίζοντας σταθερή ποιοτική παροχή χωρίς περιοδικές αυξομειώσεις σε κάποια μεταβλητή (Antiohos et al, 2005). Επιμέρους ενδεικτικές τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση (Lewandowski et al, 2007) είναι η ξήρανση, η άλεση (εκλεκτική ή μη), η ομογενοποίηση καθώς και η προεπιλογή (preselection), τεχνική που έχει μελετηθεί διεξοδικά στο εργαστήριο AAX και έχει εφαρμοστεί στην IT Πτολεμαΐδας (Tsimas et al, 2008).

Η ορθολογική διαχείριση των διατιθέμενων αποβλήτων συνέτεινε ώστε η εξοικονόμηση ενέργειας από τη χρήση αποβλήτων από 3% που ήταν το 1990, να φθάσει το 37%, το 2014 με αντίστοιχη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και των αποβλήτων που αποτίθενται στο περιβάλλον.

### **3. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του σκυροδέματος**

Το σκυρόδεμα είναι ένα ιδιαίτερα αξιόπιστο υλικό με ευρύτατο φάσμα εφαρμογών ακόμα και εκτός του αμιγούς κατασκευαστικού τομέα, που το καθιστούν ως το τρίτο μετά τον αέρα και το νερό, βασικό στοιχείο της σύγχρονης ζωής και κοινωνίας. Είναι βεβαίως γνωστό ότι εκτός από την κλασσική χρήση του στον φέροντα οπλισμό πάσης φύσεως κτιρίων, χρησιμοποιείται ευρέως σε μοντέρνες αρχιτεκτονικές δομές, σε τοιχία, πεζοδρόμια, γέφυρες, δρόμους, παρκινγκ, φράγματα, δεξαμενές, σωλήνες, σκάλες, ακόμη και σε πλοία.

Για να εκτιμηθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα οποιουδήποτε κατασκευαστικού υλικού είναι απαραίτητο να συνυπολογισθούν όλες οι φάσεις της ζωής του από την παραγωγή μέχρι την κατεδάφιση και την ανακύκλωση. Η παραγωγή είναι μια περιβαλλοντικά σημαντική διεργασία και αποσπά την μεγαλύτερη προσοχή. Αλλά και η κατασκευή ενός έργου είναι επίσης σημαντική αφού απαιτεί ενέργεια και παράγει κάποια απόβλητα. Παρόλο το γεγονός ότι το σκυρόδεμα αποτελείται κατά 80% από σκύρα εν τούτοις οι συνολικοί ρύποι εξαιτίας των σκύρων είναι μόλις 3% των συνολικών ρύπων και ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος. Το βασικό περιβαλλοντικό φορτίο καθορίζεται από το τσιμέντο και επομένως οι προσπάθειες που αναφέρθηκαν προηγουμένως και που στόχευαν την αειφορία στο χώρο της παραγωγής τσιμέντου αντανakλώνται άμεσα στο χώρο του σκυροδέματος (Papadakis et al, 2003). Εκτός από το τσιμέντο και τη χρησιμοποίηση στα σκυροδέματα τσιμέντων υψηλής επιτελεστικότητας, η χρησιμοποίηση τοπικών αδρανών (άρα μείωση του κόστους μεταφοράς), η αριστοποίηση της προσθήκης προσμίκτων) και της σύστασης του σκυροδέματος αλλά και η σωστή χρησιμοποίηση των προσθέτων που προβλέπονται στο EN 206-1, (Parayianni, 1992) είναι ενέργειες που ήδη ακολουθούνται και έχουν συμβάλει στη μείωση του αποτυπώματος.

### **4. Τσιμέντο, σκυρόδεμα και κυκλική οικονομία μπροστά στο 2050.**

Για τα επόμενα τριάντα χρόνια και με στόχο πάντοτε την αειφορία, δεν αναμένονται νέες επαναστατικές λύσεις αλλά εντατικοποίηση της έρευνας σε τεχνικές και μεθοδολογίες που ήδη περιεγράφηκαν. Αν επιχειρηθεί να ομαδοποιηθούν οι εναλλακτικές μεθοδολογίες σε ένα οδικό χάρτη, διακρίνονται δέσμες παράλληλων δράσεων για το τσιμέντο και το σκυρόδεμα οι οποίες χωριστά αλλά και συνδυαστικά μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών από την παραγωγή τόσο τσιμέντου, όσο και σκυροδέματος. Άμεσα συνδεδεμένος είναι και ο κατασκευαστικός τομέας, πού, όπως αναφέρθηκε, θα επωμισθεί το βάρος δημιουργίας μεγάλου όγκου κατασκευών που θα καλύψουν τις αυξημένες κοινωνικές ανάγκες. Στη συνέχεια με προοπτική το 2050 αναπτύσσονται διεξοδικότερα οι περισσότερες από αυτές τις δράσεις.

#### **4.1 Δράσεις σχετικές με την παραγωγή τσιμέντου**

Τα **εναλλακτικά καύσιμα** στα οποία συμπεριλαμβάνεται υψηλό ποσοστό αποβλήτων, βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή και αντιπροσωπεύουν πλέον το ένα τρίτο όλων των καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία της ΕΕ. Η ευρωπαϊκή

τσιμεντοβιομηχανία αύξησε σταθερά τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων (7πλάσια αύξηση από το 1990) και πλέον το 2010 χρησιμοποιούνται πάνω από 7 εκατ. τόνοι. Παράλληλα εκτιμάται ότι μέχρι το 2050, η απαιτούμενη ενέργεια θα καλύπτεται κατά 40% από παραδοσιακές πηγές (άνθρακας (30%) και petcoke (10%)) ενώ το 60% της ενέργειας της καμίνου θα προέρχεται από εναλλακτικά καύσιμα από τα οποία το 40% θα μπορούσε να είναι βιομάζα. Αυτό το μείγμα καυσίμων θα οδηγούσε σε συνολική μείωση κατά 27% στις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Οι κάμινοι παραγωγής κλίνκερ είναι ιδανικές για χρήση διάφορων υλικών όπως ελαστικά, χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια, λάσπες από μονάδες βιολογικών καθαρισμών, πριονίδια και γενικότερα βιομάζα με βασικό επακόλουθο, εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας, την ενσωμάτωση στις φάσεις του κλίνκερ των προσκοπτουσών τεφρών από τα υλικά αυτά. Με προοπτική το 2050 και προκειμένου να αυξηθεί η χρήση εναλλακτικών καυσίμων, θα πρέπει επίσης να αυξηθούν η πρόσβαση σε διάφορα απόβλητα (όπως οι λάσπες) και σε βιομάζα. Παράλληλα θα πρέπει να προωθηθούν και να γίνουν ευρέως κατανοητά τα οφέλη της συνεπεξεργασίας και να εισαχθεί νομοθεσία που να αντιμετωπίζει την συνεπεξεργασία και να ορίζει τα κατάλληλα υλικά αποβλήτων.

**Η υποκατάσταση πρώτων υλών** με διάφορα υλικά φορείς CaO, συμβάλει επίσης καθοριστικά τόσο στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> (καθόσον το 60% τους αποδίδεται στη διάσπαση των ανθρακικών αλάτων) όσο και στη μείωση της εκμετάλλευσης των λατομείων εξοικονομώντας με τον τρόπο αυτό πρώτες ύλες για τις επερχόμενες γενιές. Ο ασβεστόλιθος μπορεί επιτυχώς μερικώς να αντικατασταθεί (και αυτό σε κάποιον ποσοστό ήδη γίνεται) από μεγάλη γκάμα υλικών όπως είναι επιλεγμένα απόβλητα και βιομηχανικά παραπροϊόντα, ενώ πολλά από αυτά τα υλικά, όπως διάφορες λάσπες, έχουν και επιπροσθέτως και θερμογόνο δύναμη. Στα απόβλητα περιλαμβάνονται και τα απόβλητα από κατεδαφίσεις κτιρίων από τα οποία σημαντικό μέρος είναι σκυρόδεμα. Έχει αποδειχθεί ότι τα υλικά αυτά μετά από θρυμματισμό τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντικαθιστώντας τον ασβεστόλιθο, παράλληλα με την πιο διαδεδομένη χρήση τους ως αδρανή σε νέα σκυροδέματα. Η χρήση και η έρευνα για παρόμοια υλικά μπορεί να ενταθεί εν όψει του 2050, υπόκειται όμως σε αρκετούς περιορισμούς τόσο οικονομικής φύσεως (θα πρέπει η πηγή των υλικών αυτών να είναι σε κοντινή απόσταση από το εργοστάσιο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος μεταφοράς) αλλά και ποιοτικούς (θα πρέπει να μην υπάρχουν στοιχεία στη μάζα των αποβλήτων τα οποία θα υποβαθμίσουν την ποιότητα του τσιμέντου). Στην υποκατάσταση των πρώτων υλών περιλαμβάνεται και η υποκατάσταση της φυσικής γύψου με φορείς θειικού ασβεστίου όπως είναι το προϊόν της αποθείωσης των ενεργειακών μονάδων τόσο με ασβεστόλιθο (FGD Gypsum) (Tzouvalas et al, 2004), όσο και με CaO ή Ca(OH)<sub>2</sub> (SDAP) (Antiohos et al, 2014). Η ομοιογένεια στη σύσταση των διατιθέμενων υλικών είναι πάντοτε ζητούμενο στη βιομηχανία τσιμέντου και το κόστος πιθανών διατάξεων ομογενοποίησης και γενικότερα προ επεξεργασίας των υλικών θα πρέπει να προσμετράται. Τέλος για τη προσθήκη παρόμοιας φύσης υλικών θα πρέπει να υπάρχει και σχετική νομοθεσία.

Η **μερική υποκατάσταση του κλίνκερ** είναι η δράση που χρονικά είναι η πιο διαδεδομένη καθόσον η συνάλεση κλίνκερ με ποζολάνες αλλά και άλλα παρόμοιας φύσης υλικά προβλεπόταν ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '70. Η υποκατάσταση αυτή του κλίνκερ και η συνεπαγόμενη μείωση του λόγου κλίνκερ/τσιμέντο (K/T) συγκεντρώνει το σύνολο σχεδόν των εκφάνσεων αειφορίας καθόσον: i) εξοικονομείται ενέργεια ii) εξοικονομούνται πρώτες ύλες iii) μειώνονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> και iv) αξιοποιούνται παραπροϊόντα που διαφορετικά θα αποτίθεντο στο περιβάλλον. Η χρήση των υλικών αυτών γίνεται πάντα στο πλαίσιο της συμμόρφωσής τους με τα ισχύοντα πρότυπα (για την Ευρώπη το εναρμονισμένο EN 197-1) στα οποία και προβλέπονται πολλοί τύποι τσιμέντων η επιλογή των οποίων συναρτάται με τα επιθυμητά πεδία εφαρμογής του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Έτσι οι διαφορετικοί τύποι τσιμέντου με διαφορετικό λόγο K/T, έχουν διαφορετικές ιδιότητες στις οποίες μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται ο χρόνος ανάπτυξης αρχικών και τελικών αντοχών, η αντίσταση σε διαφορετικά περιβάλλοντα, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ενυδάτωσης καθώς και η εργασιμότητα του τσιμεντοπολτού. Ο διαφορετικός λόγος K/T βεβαίως συνεπάγεται διαφορετικά πεδία εφαρμογής όλα όμως στο πνεύμα της ανάπτυξης ανθεκτικών για 50 τουλάχιστον χρόνια σκυροδεμάτων που είναι και το κλειδί για την αειφορία των κατασκευών. Κάθε χώρα προσαρμόζει τα υπάρχοντα δυναμικά χρησιμοποιήσιμα υλικά της και το ποσοστό που τελικά θα χρησιμοποιηθεί από καθένα εξαρτάται και από τη συμμόρφωση με διάφορα ποιοτικά κριτήρια. Με διακύμανση από το 95% (στα παλαιότερα OPC ή στα CEM I με βάση το EN 197-1) στο 5% (σε ένα τύπο του EN), ο λόγος K/T στην Ευρώπη ήταν προ 10ετίας στο 78% και το 2014 κινείτο στα 73.7%. Για το μέλλον εκτιμάται ότι θα κινηθεί περί το 70% γεγονός που συνεπάγεται περαιτέρω μείωση των εκπομπών κατά 4%. Δύσκολα όμως θα μειωθεί περισσότερο καθόσον οι τοπικές αγορές στρέφονται προς κατασκευές που απαιτούν ταχύτερους ρυθμούς ανάπτυξης αντοχών.

Η μελέτη των **νέων τσιμέντων** και ιδίως αυτών με χαμηλές ή πολύ χαμηλές εκπομπές CO<sub>2</sub> που συνεπάγονται και αντίστοιχες μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις, είναι το αντικείμενο των ερευνητικών προσπαθειών μεγάλων Ευρωπαϊκών ερευνητικών κέντρων που ασχολούνται με το τσιμέντο. Μεταξύ άλλων αντιμετωπίζεται η δημιουργία και μελέτη ιδιοτήτων κονιών όπως οι θειοαλουμινικές βελτικές, γεωπολυμερή και άλλες (Dienemann, et al, 2013, Gartner, 2017). Χαρακτηριστικό των νέων αυτών τσιμέντων είναι ότι δεν έχουν ακόμα διεξοδικά διερευνηθεί ούτε για τη συμπεριφορά τους σε βάθος χρόνου ούτε ακόμα για την οικονομική βιωσιμότητα τους (τα αποθέματα πρώτων υλών είναι αβέβαια και εκτιμώνται μικρά για τα μεγέθη μιας τσιμεντοβιομηχανίας). Παρά τις διαφαινόμενες προοπτικές τους ειδικά στο θέμα της συμβολής στην αειφορία, οι προοπτικές χρήσης τους στο άμεσο μέλλον περιορίζονται σε μη δομικές εξειδικευμένες εφαρμογές και ένα μερίδιο 5% της συνολικής παραγωγής τσιμέντου δηλαδή 11 εκατομμύρια τόνοι αναμένεται να καλυφθεί από παρόμοιας φύσης νέα τσιμέντα. Εν όψει του 2050 θα πρέπει να ενταθεί η έρευνα όσον αφορά την ανθεκτικότητα τους, να πεισθεί η αγορά για τα πεδία εφαρμογής τους και να πεισθεί και ο δομικός τομέας να τα ενσωματώσει στα προϊόντα του.

Αναφορικά με τη περίπτωση **θερμικής ενέργειας** και της συμμετοχής της στην αειφορία του χώρου, εκτιμάται ότι με τις προσπάθειες της τσιμεντοβιομηχανίας στο τελευταίο τέταρτο του προηγούμενου αιώνα, η εξοικονόμηση ενέργειας και της συνεπαγόμενης μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> έχει φθάσει σε ένα οριακό επίπεδο 760-780 Kcal/Kg το οποίο πλέον πολύ δύσκολα θα μειωθεί περαιτέρω. Αυτό έχει επιτευχθεί με την εισαγωγή των προασβεστοποιητών στους πολυβάθμιους κυκλώνες προθέρμανσης για την εκμετάλλευση του θερμικού περιεχομένου των απαερίων, ενώ και η αξιοποίηση του θερμικού περιεχομένου του εξερχόμενου κλίνκερ έχει επίσης φθάσει στα τεχνικά της όρια. Υπενθυμίζεται και πάλι ότι στη τσιμεντοβιομηχανία οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από το καύσιμο αποτελούν το 35-38% των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> και ως εκ τούτου είναι πιο ελκυστική η ενασχόληση με τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τη διεργασία. Το ενεργειακό κέρδος που θα προκύψει στην κατεύθυνση αυτή θα πρέπει να αποδοθεί στην αντικατάσταση των όποιων παλαιού τύπου καμίνων δεν έχουν ακόμα αντικατασταθεί. Αυτό συνάγεται από τη διαπίστωση ότι στην Ευρώπη ο μ.ό. κατανάλωσης ενέργειας είναι στις 880-890 Kcal/Kg άρα υπάρχει περιθώριο μείωσης συγκρινόμενο με τις βέλτιστες αποδόσεις που, όπως αναφέρθηκε, είναι 760-780 Kcal/Kg.

#### **4.2 Δράσεις σχετικές με το σκυρόδεμα και τις κατασκευές**

Η σημασία του σκυροδέματος και η ανάγκη επικέντρωσης των προσπαθειών για την ορθολογικότερη διαχείρισή του προκύπτει και από την απλή διαπίστωση ότι, όπως αναφέρθηκε εισαγωγικά, η ογκωδέστατη αρχική του παραγωγή αναμένεται να εκτοξευθεί εν όψει του 2050. Το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, συγκρινόμενο με άλλα δομικά υλικά είναι χαμηλό και παράλληλα υπάρχουν αρκετοί τρόποι για περαιτέρω μείωση του. (Μοροπούλου, 2004, Παπαδόπουλος, 2009). Στα θετικά χαρακτηριστικά του είναι ότι μετά τη σκυροδέτηση απορροφά επιτόπου CO<sub>2</sub>, ενώ οι πρώτες ύλες δεν παράγουν μεγάλες ποσότητες απορριμμάτων. Ο χρόνος ζωής κτιρίων κινείται μεταξύ 50 και 100 έτη ενώ υπάρχουν πολλά παραδείγματα κτιρίων που έχουν ζωή μεγαλύτερη των 100 ετών και συμπεριφέρονται άψογα. Παράλληλα προσφέρει θερμική μάζα ενώ μπορεί να ανακυκλωθεί για επανάχρηση (Gottfried, 1996). Για την, κατά το δυνατόν, σφαιρικότερη αντιμετώπιση του προβλήματος και των δράσεων που πρέπει να αναληφθούν, θα πρέπει να συνεκτιμηθούν όλες αυτές οι παράμετροι αλλά και άλλες ερευνητικές προσπάθειες (όπως τα διαπερατά σκυροδέματα και η αξιοποίηση του επιστρεφόμενου από τις μονάδες ετοιμού σκυροδέματος νωπού σκυροδέματος) που στοχεύουν στην αειφορία.

Σχετικά με τις **βιώσιμες κατασκευές** θα πρέπει να τονιστεί ότι η ευκαιρία για μείωση των εκπομπών δεν περιορίζεται αποκλειστικά στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου, αλλά είναι συναφής με ολόκληρο τον κύκλο ζωής του σκυροδέματος. Η κατανάλωση ενέργειας (και ηλεκτρικής) των κτιρίων προβληματίζει καθώς τα κτίρια αντιπροσωπεύουν περίπου το 35% των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου της ΕΕ. Οι κατασκευές με σκυρόδεμα προσφέρουν μεγαλύτερες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας συγκρινόμενες με άλλα κατασκευαστικά υλικά, συμβάλλοντας στην κατασκευή κτιρίων πολύ χαμηλής κατανάλωσης



ενέργειας. Μεταξύ άλλων αυτό οφείλεται στις θερμομονωτικές του ιδιότητες που επιτρέπουν να παραμένει σταθερή η εσωτερική θερμοκρασία ακόμη και όταν υπάρχουν διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η **κατασκευή έξυπνων κτιρίων** προβάλλει ελκυστική λύση που η εξέλιξη της θα συντείνει στη γενικότερη εξοικονόμηση ενέργειας και θα έχει συμβολή στην κάλυψη του στόχου για το 2050. Τα συμβατικά κτίρια καταναλώνουν σήμερα περίπου 200kWh/m<sup>2</sup>/χρόνο. Με τη νέα διατιθέμενη τεχνολογία σκυροδέματος αντιθέτως θα υπάρχει δυνατότητα η κατανάλωση αυτή να πέσει στα 50kWh/m<sup>2</sup>/χρόνο. Πτυχή της λύσης αυτής είναι και η καινοτόμος χρησιμοποίηση του σκυροδέματος για την κατασκευή δεξαμενών αποθήκευσης ενέργειας. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να οδηγήσει στην εξοικονόμηση ενέργειας καθώς επίσης και στη μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης των εγκαταστάσεων. Σχετική μελέτη έχει δείξει ότι το σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ καλή ανθεκτικότητα στις θερμοκρασίες των δεξαμενών αποθήκευσης ενέργειας (Τσιβιλής, 2006). Οι δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας βρήκαν πολύ πετυχημένη εφαρμογή στο πρώτο ενεργειακά αυτόνομο κτίριο που κατασκευάστηκε στην Ελλάδα το 2007 (Προμηθεύς Πυρφόρος, το αυτόνομο ενεργειακά κτήριο).

Η ενανθράκωση και **επανανθράκωση** αναφέρεται στην ικανότητα των φάσεων του τσιμέντου να αντιδρούν με το CO<sub>2</sub> στον αέρα. Μέρος του εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub> κατά την παραγωγή τσιμέντου απορροφάται εκ νέου από το τσιμέντο μέσω της ενανθράκωσης. Η ενανθράκωση του σκυροδέματος εμφανίζεται στην επιφάνεια του όπου έρχεται σε επαφή με τον αέρα και την υγρασία, και εξελίσσεται με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο με την ποιότητά του. Είναι βέβαια γνωστό ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα στα σύγχρονα κτίρια και υποδομές ΠΜ σχεδιάζεται για να διαρκεί έως και πάνω από 100 χρόνια και σε αυτές τις περιπτώσεις ο ρυθμός ενανθράκωσης είναι απίθανο να προχωρήσει περισσότερο από μερικά χιλιοστά (5-20mm) κατά τη διάρκεια της ζωής της κατασκευής. Στο τέλος της ζωής του και μετά την κατεδάφισή του, το οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να θραυτεί και να μένει εκτεθειμένο στον αέρα για μερικούς μήνες οπότε οι δημιουργούμενες νέες επιφάνειες αυξάνουν την πιθανότητα επανθράκωσης. Έχει αποδειχθεί ότι το χαμηλό ποσοστό (5-15%) επανθράκωσης που συμβαίνει κατά την διάρκεια της ζωής του μπορεί να φθάσει και το 25% με ενέργειες που μπορούν να γίνουν στο τέλος της ζωής του.

Η **ανακύκλωση του σκυροδέματος** συζητιέται πάρα πολύ τα τελευταία 15 χρόνια και ήδη στην Ευρώπη περίπου 200 εκ. τόνοι από απόβλητα κατεδαφίσεων (C&DW) δημιουργούνται κάθε χρόνο. Ο στόχος της μηδενικής επιβάρυνσης του περιβάλλοντος εκτιμάται ότι το 2050 θα είναι ρεαλιστικός και σε αυτό βεβαίως θα συμβάλει και η προσεκτική σχεδίαση του αρχικού σκυροδέματος για να γίνει ανακυκλώσιμο (recyclable) (Schepper, 2014). Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα από C&DW μπορεί με προσεκτική θραύση να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές τόσο για το οδικό δίκτυο, όσο και σε νέες σκυροδετήσεις αδρανών, ενώ οι ενυδατωμένες και σκληρυμένες πάστες τσιμέντου (CSH) εφόσον διαχωριστούν επιτυχώς από τα αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορέας CaO αντί του ασβεστόλιθου στην παραγωγή κλίνκερ (Galbenis et al, 2006).

Η **αξιοποίηση του επιστρεφόμενου σκυροδέματος** κινείται σε δύο άξονες (αξιοποίηση του νερού έκπλυσης και αξιοποίηση της λούμης) που αμφότεροι έχουν θετική επίπτωση στο περιβάλλον. Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρησιμοποίηση ως έχει του νερού έκπλυσης των οχημάτων μεταφοράς ετοιμού σκυροδέματος αλλά και η αξιοποίηση της λούμης ως ασβεστολιθικό φίλλερ, συμβάλλουν στη μείωση της εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων, στη μείωση των βλαβερών επιπτώσεων από την απόθεση στο περιβάλλον του επιβαρυμένου νερού (Zervaki et al, 2013). Το **διαπερατό σκυρόδεμα** συνίσταται από τσιμέντο Πόρτλαντ, χονδρόκοκκα αδρανή, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα αδρανή, πρόσμικτα και νερό. Το σκυρόδεμα αυτό που μπορεί να πετύχει θλιπτικές αντοχές της τάξης των 28 MPa, έχει την ιδιαιτερότητα, λόγω του μεγάλου πορώδους του (18 - 35%) να επιτρέπει στο νερό της βροχής να διέρχεται μέσα από τη μάζα του, συντελώντας έτσι στη σωστή διαχείριση των όμβριων υδάτων, στην αποφυγή των πλημμυρών και στον εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων (Vardaka et al, 2014).

### **5. Το τριπλό όφελος (μοντέλο win/win/win)**

Με βάση μια βιώσιμη ανάπτυξη θα πρέπει ισότιμα να αντιμετωπίζονται και να κερδίζουν τρεις βασικοί πυλώνες όπως είναι η Κοινωνία, η Οικολογία και η Βιομηχανία. Στη βιομηχανία τσιμέντου το μοντέλο Win/win/win, με τη χρήση αποβλήτων και παραπροϊόντων, συνεχώς κερδίζει έδαφος στο πλαίσιο μιας ολιστικής αντιμετώπισης. Ο τομέας τσιμέντου βοηθά άλλες βιομηχανίες ή δήμους να διαθέσουν τα απόβλητά τους και, με τη σειρά του αποκτά πρόσβαση σε οικονομικά αποδοτικές πηγές καυσίμων ή σε πρώτες ύλες. Επιπλέον, η συνεξεργασία μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, μειώνει την υπερλατόμευση και εμποδίζει τα απόβλητα να καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Επίσης έχει άμεσο αντίκτυπο στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, καθώς μειώνει την ποσότητα των φυσικών πρώτων υλών, υλικών που απαιτούνται για την παραγωγή κλίνκερ. Παράμετρο σε όλα αυτά για την τελική απόφαση αποτελεί το πιθανό κόστος μεταφοράς, στοιχείο που πολλές φορές αποτρέπει την υλοποίηση μιας, κατά τα άλλα, ιδιαίτερα έξυπνης ιδέας.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η εισήγηση επικεντρώθηκε στο τι έχει γίνει και τι μπορεί να γίνει στο χώρο του τσιμέντου και του σκυροδέματος στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Τονίστηκαν τα σημεία όπου οι μέχρι τώρα προσπάθειες που στοχεύουν στην αειφορία, έχοντας αποδώσει σημαντικά, έχουν φθάσει σε ένα οριακό επίπεδο και επισημάνθηκαν και τα σημεία όπου με στόχο την αειφόρο ανάπτυξη στο 2050, υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω ενεργειών και ανάληψης συγκεκριμένων δράσεων. Με τη μεγάλη ανάπτυξη της ναυτεχνολογίας και την εμφάνιση στην αγορά πληθώρας καινοτόμων υλικών που όλα έχουν μερίδιο συμβολής στη μείωση των ρύπων, η παραγωγή του τσιμέντου και η ορθολογική χρησιμοποίηση των σωστών τύπων του στα σκυροδέματα, ανάλογα με τις εφαρμογές, είναι σημεία κλειδιά με στόχο την αειφορία. Ο στόχος για τη μείωση των εκπομπών

CO<sub>2</sub> κατά 80% (σε σχέση με το 1990) το 2050, αλλά και του τριπλού οφέλους, θα προσεγγιστεί μέσα από πολλές και εναλλακτικές δράσεις. Ενέργειες όπως η χρησιμοποίηση επιλεγμένων αποβλήτων τόσο στην παραγωγή τσιμέντου με την διαδικασία της συμπαραγωγής όσο και στη παραγωγή σκυροδέματος με υποκατάσταση αδρανών με υλικά κατεδάφισης παλαιών κτιρίων, η εντατικοποίηση στη μελέτη νέων τσιμέντων αλλά και η κατασκευή έξυπνων κτιρίων θα πρέπει συγκεντρώσει παγκοσμίως στο άμεσο μέλλον πολλές ερευνητικές προσπάθειες. Τέλος η δέσμευση και αποθήκευση CO<sub>2</sub> (Carbon Capture and Storage (CCS)) αποτελεί μία επαναστατική μακροπρόθεσμη λύση που θα συντείνει στην περαιτέρω επιτυχή αντιμετώπιση του προβλήματος και στη βιομηχανία τσιμέντου.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Antiohos S., Tsimas S. "Investigating the Role of Reactive Silica in the Hydration Mechanisms of High-Calcium Fly Ash/Cement Systems", *Cement and Concrete Composites* 27, (2005), 171-181

Antiohos S. K., Gioka E., Zervaki M., Fragoulis D. Tsimas S. "Cements incorporating Semi Dry Absorption (SDA) product; Opportunities and bottlenecks". 4th International Conference EuroCoalAsh 2014, Munich Germany, (2014), 57-69

Cembureau, "The role of cement in the 2050 low carbon economy", (2014)

Cembureau "Cement concrete and the circular economy", (2016)

Dienemann W., Schmitt D., Bullerjahn F., Ben Haha M., "Belite-Calciumsulfate aluminate-Ternesite (BCT) – A new low-carbon clinker technology", *Cement International* vol. 11, (2013)

Galbenis C-T, Tsimas S., "Use of construction and demolition wastes as new materials in cement clinker production" *China Particuology* 4, 1-2, (2006), 83-85

Gartner, E., Industrially interesting approaches to "low-CO<sub>2</sub>" cements, *Cement and Concrete Research*, 2004, 34, (2004), 1489-1498

Gartner E., "What are BYF cements, and how do they differ from CSA cements?", *The Future of Cement, 200 years after Louis Vicat*, (2017), UNESCO, Paris

Gottfried D.A. "The Economics of Green Buildings in Sustainable Technical Manual", Public Technology Inc. U.S.A, (1996)

Lewandowski, W., H-J Feuerborn, "Processing plants for fly ash in Europe" *Proc. of International Scientific and Practical Workshop ASHES ON TPPS, Moscow* (2007), 60-63

Mehta, P.K. "Role of pozzolanic and cementitious materials in sustainable development of the concrete industry", 6th CANMET/ACI, Malhotra V.M. (ed), I, (1998), 1-20

Papadakis, V.G., Tsimas S., "Supplementary Cementing Materials in Construction for Economic and Environmental Benefits" IACT Journal Vol 1 N1, (2003), 51-60.

Papayianni I., "Strength and Bond Data for Greek High-Lime Fly Ash Concrete", ACI-SP-91, Editor V. M. Malhotra, Vol. 1, Detroit (1986), 367-386.

Papayianni, J. "An investigation of the pozzolanicity and hydraulic reactivity of a high-lime fly ash", Magazine of Concrete Research, London, Vol. 39, No 138. (1987)

Papayianni I., "Concrete with high calcium Fly Ash", Proc. of CANMET/ACI, Athens (1992)

Schepper de Mieke, "Completely Recyclable Concrete for a more Environment Friendly Construction", Ph.D. Thesis, University of Gent. (2014)

Tennis, P.D., Thomas, MDA., WeissW.J. "State-of-the-art report on use of limestone in cements at levels of up to 15%, PCA R7D SN3148, (2011)

Tsimas, S., Vardaka G., Zervaki, M., "The preselection of high calcium fly ashes as the first step for their further evaluation" 1st EuroCoalAsh Conference Warsaw (2008), 249-256

Tsivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis G., Theodossis, D., "Properties and behavior of limestone cement, concrete and mortar", Cem. Concr. Res, Vol.30, 10 (2000) 1679-1683

Tsivilis, S., Skaropoulou, A., Fliska, M., Manouka O., & Benekis, V., "Use of concrete tanks for seasonal thermal storage: Behavior of cement mortars cured in water at temperatures 20-80oC", Proc. of the Sixth International Symposium on Cement & Concrete, CANMET/ACI Xi'an, P.R. China, V. II, (2006), 1188-1192

Tzouvalas G., Rantis G., Tsimas S., Alternative calcium sulfate bearing materials as cement retarders. Part II: FGD Gypsum, Cement and Concrete Research, 34, (2004), 2119-2125

Vardaka G., Thomaidis K., Leptokaridis C, Tsimas S., "Use of steel slag as coarse aggregate for the production of pervious concrete", J. of Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems, Vol. 2, Issue 1, (2014) 30-40

Zervaki, M., Leptokaridis, C., Tsimas, S., "Reuse of By-Products from Ready-Mixed Concrete Plants for the Production of Cement Mortars", J. of Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems Vol. 1. No 2, (2013) 152-162

Μοροπούλου Α., Καρόγλου Μ., "Ο ρόλος των υλικών και της αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην αειφόρο ανάπτυξη του δομημένου περιβάλλοντος", Τεχνικά Χρονικά 3-4 (2004), 1-15

Παπαδόπουλος Π., "Αειφορία στην Κατασκευή και Σκυροδέμα Sustainability of Concrete Construction 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/, Πάφος, Κύπρος, (2009)

Προμηθεύς Πυρφόρος, το αυτόνομο ενεργειακά κτήριο ([http:// www.Promitheaspirforos.gr/index.php?about=20](http://www.Promitheaspirforos.gr/index.php?about=20))

Φτίκος, Χ. "Μελέτη της δράσεως της θηραϊκής γης κατά την ενυδάτωση τσιμεντών μετ' αυτής". Διδ. Διατριβή ΕΜΠ, Αθήνα (1977)