

**Μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του
τσιμέντου και του σκυροδέματος**
Decrease of the environmental footprint of cement and
concrete

Αντωνία ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ¹, Μαρία ΚΡΟΥΣΤΑΛΛΑΚΗ²

Λέξεις κλειδιά: 18^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 18^ο Concrete Conference, Αθήνα, Athens, αειφορία, sustainability, περιβαλλοντικό αποτύπωμα, environmental footprint, τσιμέντο, cement, σκυρόδεμα, concrete

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η αειφορία στην κατασκευή με μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος είναι μια αμφίπλευρη διαδικασία, με δεδομένο το γεγονός ότι η ανάγκη για παραγωγή περιβαλλοντικά φιλικού τσιμέντου και κατ' επέκταση σκυροδέματος ολοένα και αυξάνει. Εξετάζονται, αφενός, τα προβλήματα που δημιουργούνται στο περιβάλλον από τη διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος και αφετέρου η προστασία του σκυροδέματος στην κατασκευή από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Δίνονται λύσεις, όπως η χρήση πράσινων σύγχρονων τσιμέντων για την παραγωγή σκυροδέματος, η χρήση υλικών και ορυκτών καυσίμων, που προέρχονται από ανακυκλώσιμα υλικά και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντίστοιχα, μέθοδοι προστασίας της μάζας του σκυροδέματος και του χάλυβα κ.α. Η εφαρμογή των λύσεων αυτών αποτελεί σήμερα επιτακτική ανάγκη για μια μελλοντικά αειφόρο κατασκευή.

ABSTRACT : Sustainability in construction, to reduce the environmental footprint, is a two-sided process, given that the need to produce environmental friendly cement and thus concrete is increasing. The problems created in the environment, by the process of cement and concrete industry, and the protection of the concrete from the environmental impact are examined. Solutions such as the use of environmental friendly cements for the production of concrete, the use of materials and fossil fuels, derived from recyclable materials and renewable energy sources, methods of protection of the mass of concrete and steel, etc. are available. The implementation of these solutions is now imperative for a sustainable construction in the future.

¹ Καθηγήτρια, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: amoropul@central.ntua.gr

² Υποψήφια Διδάκτορας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: mariakroust@gmail.com

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση του πληθυσμού της γης ακολουθεί ανοδική πορεία τα τελευταία χρόνια και σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του ΟΗΕ θα φτάσει τα 9 δισεκατομμύρια πριν το 2050. Είναι, επομένως, επιτακτική ανάγκη η άμεση ανταπόκριση του κατασκευαστικού κλάδου για στέγαση και υποδομές, σχεδιάζοντάς τα με αειφόρες προδιαγραφές (μείωση των ρύπων, εξοικονόμηση πόρων, ευκολία στην εφαρμογή κλπ.) για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Το κυριότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα που δημιουργεί ο τομέας των κατασκευών είναι οι εκπομπές του CO₂ από την παραγωγή του τσιμέντου. Παγκοσμίως καταναλώνονται 2 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου ετησίως, αφού οι τεράστιες ανάγκες του πλανήτη για υποδομές και στέγαση θα ήταν αδύνατο να καλυφθούν χωρίς αυτό, λόγω του ότι είναι ένα υλικό με εξαιρετική σχέση κόστους-ποιότητας, εξαιρετική αντοχή και πολλαπλές χρήσεις.

Είναι, επομένως, απαραίτητο να εστιάσουμε στη σχέση “περιβάλλοντος-σκυροδέματος”, να εντοπιστούν τα προβλήματα και να δοθούν λύσεις ούτως ώστε να επιτευχθεί η αειφορία στην κατασκευή. (Moropoulou, Karoglou, 2003)

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ενεργειακή κατανάλωση για την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος από τις αντίστοιχες βιομηχανίες.

Στο 2% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης έχει φτάσει σήμερα η κατανάλωση ενέργειας στη βιομηχανία του τσιμέντου και σχεδόν στο 5% της συνολικής ενέργειας στον τομέα της βιομηχανίας γενικότερα. Το κόστος για την καύση στερεών υγρών και αερίων καυσίμων (**πίνακας 1**) για την παραγωγή του τσιμέντου ανέρχεται στο 30% και η μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται χρησιμοποιείται στην περιστροφή της καμίνου. Καταναλώνεται ακόμη και ηλεκτρική ενέργεια ίση με 100 KW/t τσιμέντου με την εξής κατανομή:

- 27,5 % η προετοιμασία των πρώτων υλών
- 27,7% η παραγωγή του κλίνκερ
- 39,8% παραγωγή του τελικού προϊόντος
- 5% άλλες διεργασίες

Η υπέρμετρη κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος είναι το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα σύμφωνα με τον **πίνακα 2** η ενσωματωμένη ενέργεια ανά m³ σκυροδέματος οφείλεται κατά 91,5% στην ενέργεια που χρειάστηκε για την παραγωγή του περιεχομένου τσιμέντου (εξόρυξη πρώτων υλών, θραύση, περιστροφική κάμινος, άλεση του κλίνκερ, κλπ.) και μόνο 8,5% περίπου στα αδρανή υλικά του σκυροδέματος. Η τσιμεντοβιομηχανία είναι μία εξαιρετικά ενεργοβόρος βιομηχανία και έχει

σημαντική συμβολή στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων αερίων στην ατμόσφαιρα. Είναι επομένως αναγκαίο το σκυρόδεμα να χρησιμοποιείται με ορθολογικό τρόπο στον κατασκευαστικό τομέα και να μην παραβλέπονται οι σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του (Bieksa, Martinaitis, Sakmanas, 2006).

Πίνακας 1. Ποσοστιαία κατανάλωση καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου στην ΕΕ (Τσακαλάκης 2010).

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

Πίνακας 2. Ενέργεια στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος (Τσακαλάκης 2010).

Υλικό	Βάρος (%)	Παραγωγή kWh/t πρώτης ύλης	Μεταφορά kWh/t πρώτης ύλης	kWh/m ³ σκυροδέματος	Μάζα πρώτων υλών (t/m ³ σκυροδέματος)	Ενέργεια (%)
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

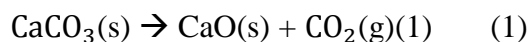
Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του τσιμέντου στην εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα είναι μεγαλύτερο από το 50% του συνολικού δείγματος σκυροδέματος. Παγκοσμίως υπολογίζεται ότι η βιομηχανία τσιμέντου συμβάλει με ποσοστό 5% στις συνολικές εκπομπές CO_2 στην ατμόσφαιρα ανάμεσα σε όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες, δηλαδή 1,6 δις τόνοι CO_2 . Οι εκπομπές αυτές συμβάλλουν στην επιδείνωση του “φαινομένου του θερμοκηπίου” και επιβάλλεται να αντιμετωπιστούν ακολουθώντας την φορολογική πολιτική καυσίμων της Ευρωπαϊκής Ένωσης ώστε αυτά να περιοριστούν στα αντίστοιχα επίπεδα του 1990. Οι εκπομπές αυτές αναλυτικότερα προέρχονται:

- Από την μεταλλουργική διεργασία δηλαδή πύρωση και θερμική διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) σε CaO και CO_2 μέσα στις περιστροφικές καμίνους των τσιμεντοβιομηχανιών. Από την πύρωση προκύπτουν $0,53\text{t CO}_2/\text{t τσιμέντου}$.
- Από την καύση των ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.α.) κατά την παραγωγή του τσιμέντου. Από αυτήν προκύπτουν $0,53\text{t CO}_2/\text{t τσιμέντου}$.

Διαδικασία υπολογισμού του παραγόμενου CO_2 στην ατμόσφαιρα:

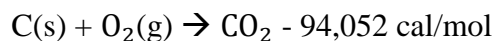
Πύρωση του CaCO_3 :



Για την παραγωγή 1t τσιμέντου απαιτούνται $1,21\text{ t CaCO}_3$, επομένως σύμφωνα με την εξίσωση 1 παράγεται:

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

Η εναπομένουσα ενέργεια προέρχεται κατά 60% από στερεά, υγρά και αέρια καύσιμα τα οποία κατά την καύση τους ελευθερώνουν ενέργεια σύμφωνα με την εξώθερμη αντίδραση:



Η ενέργεια που εκλύεται αντιστοιχεί σε $94052/12=7837,7 \text{ cal/g}$. Επομένως από την καύση 1g άνθρακα εκλύεται αυτή η ποσότητα ενέργειας. Είναι γνωστό ότι $1\text{cal} = 4,1868 \text{ J}$ δηλαδή $7837,7 * 4,1868 = 32815\text{kJ/kg}$ άνθρακα.

Η παραγόμενη ενέργεια από παντός είδους ορυκτά είναι:

$$\left. \begin{array}{l} (69,5 + 524,8 + 3885,3) * 10^3 \text{ BTU/t τσιμέντου} \\ 1\text{BTU} = 1,0555\text{KJ} \end{array} \right\} \Rightarrow 4728,2 \text{ KJ/Kg τσιμέντου}$$

Για να παραχθεί η ως άνω ενέργεια απαιτείται καύση άνθρακα και έτσι θα απαιτηθούν:

$$(4728,2 \text{ KJ/Kg τσιμέντου}) / (32815 \text{ KJ/Kg άνθρακα})$$

Από αυτήν την καύση όμως θα προκύψει:

$$0,144*(44/12) = 0,528 \text{ (Kg CO}_2/\text{ Kg τσιμέντου)}$$

Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν και από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή τσιμέντου. Επομένως συνεισφέρει και αυτή στην παραγωγή και εκπομπή CO_2 .

Εφαρμόζοντας την ως άνω διαδικασία υπολογισμού CO₂ προκύπτει παραγωγή 0,099 Kg CO₂/ Kg τσιμέντου. Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ο κάτωθι **πίνακας 3**.

Πίνακας 3. Παραγωγή CO₂ στις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος (Τσακαλάκης, 2010).

Πηγές εκπομπών CO ₂ στη βιομηχανία τσιμέντου	kg CO ₂ /t τσιμέντου	kg CO ₂ /m ³ σκυροδέμα	Ποσοστό % συνολικού CO ₂
CO ₂ από την πύρωση του ασβεστολίθου	532	158.2	45.9
CO ₂ από την παραγωγή ενέργειας από καύσιμα	528	157.2	45.6
CO ₂ από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	99	29.3	8.5
Συνολική παραγωγή CO ₂	1159	344.7	100

Άλλες επιβλαβείς εκπομπές

Άλλου είδους επιβλαβείς, για την ατμόσφαιρα, εκπομπές που προκαλούνται από την τσιμεντοβιομηχανία και τη βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος είναι η σκόνη από την περιστροφική κάμινο, από την άλεση του κλίνκερ, από την ανάμειξη των πρώτων υλών κ.α. Προτεινόμενος τρόπος αντιμετώπισης είναι η δέσμευση, συλλογή και ανακύκλωση της σκόνης αυτής με χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων, μηχανικών διατάξεων συλλογής, σακκόφιλτρων κ.α.). Σημαντικό, παρόλα αυτά, πρόβλημα είναι η αλκαλική συμπεριφορά της σκόνης αυτής και η αντιμετώπισή της συχνά βρίσκει χρήση στη ρύθμιση του pH όξινων λιμνών και για την επεξεργασία γεωργικών εδαφών. Τέλος, μειωμένης σημασίας εκπομπές είναι αυτές του διοξειδίου του θείου (SO₂), του οξειδίου του αζώτου (NO_x), και του τριοξειδίου του θείου (SO₃). Η αντιμετώπιση αυτών γίνεται με τη χρήση τους ως καύσιμα πρώτων υλών χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και δέσμευση των αερίων με κατάλληλο εξοπλισμό περιβαλλοντικού ελέγχου (Ji Xi, Chen, 2005).

Ρύπανση των υδάτων

Η κατανάλωση νερού στις μονάδες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος είναι πρόβλημα μείζονος σημασίας. Υπολογίζεται ότι m³ νερού/ μπετονιέρα χρειάζονται τη μέρα για έκπλυση και το νερό αποκτά pH 12, γίνεται δηλαδή αλκαλικό και κατά συνέπεια τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς. Η αντιμετώπιση αυτής της ρύπανσης των υδάτων πραγματοποιείται με λίμνες απόρριψης αυτών των υδάτων, όπου τα περιεχόμενα στερεά καθιζάνουν και το νερό επεξεργάζεται με σκοπό την επανάχρησή του.

ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τρεις είναι οι τομείς που συνιστούν την παραγωγή του δομημένου περιβάλλοντος (Μπουγγιούρη κ.α., 2009):

- Τα οικοδομικά υλικά καθορίζουν την ποιότητα της δόμησης και αφορούν την προέλευση, τη σύσταση και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών.
- Η παραγωγή των οικοδομικών υλικών είναι συνδεδεμένη με τη βιομηχανία και ιδιαιτέρως με τη χημική βιομηχανία.
- Ο τρόπος δόμησης των κατασκευών είναι συνάρτηση των υλικών δόμησης και των κατασκευαστικών μεθόδων.

Τέσσερις είναι οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η “φιλικότητα” των δομικών υλικών απέναντι στο περιβάλλον.

- Η ποσότητα ενέργειας που εκλύουν τα ορυκτά καύσιμα.
- Η ανανεωσιμότητα των φυσικών πόρων από όπου προέρχονται.
- Αν τα απορρίμματα που παράγονται είναι ανακυκλώσιμα.
- Από την τοξικότητα τους σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και τους τελικούς χρήστες.

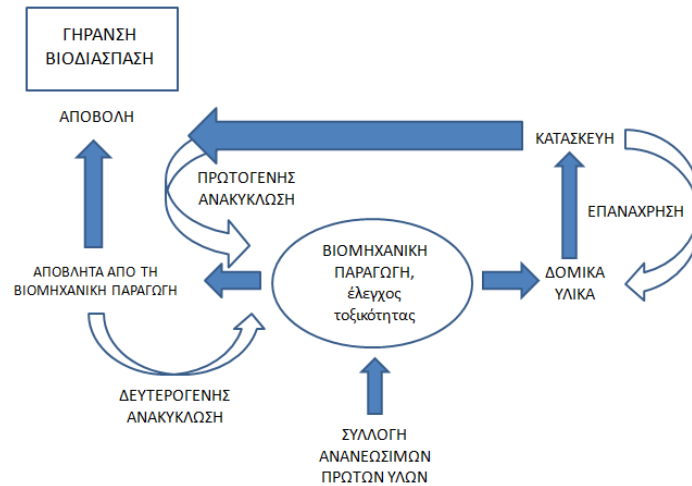
Για να περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις από την αλόγιστη δόμηση, στο περιβάλλον, είναι απαραίτητο να βρει εφαρμογή η οικολογική δόμηση. Οι αρχές που τη διέπουν είναι:

- Η χρήση δομικών υλικών που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ανακυκλώσιμα υλικά, και η αποδοτική τους χρήση.
- Η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων.
- Η χρήση δομικών υλικών με μεγάλο προσδόκιμο ζωής.
- Ο λειτουργικός σχεδιασμός κτιρίων που φιλοξενούν πολλά είδη χρήσεων.
- Η ανακύκλωση των δομικών υλικών μετά από κατεδάφιση (Huberman, Pearlmutter, 2008).

Ένας ακόμη τρόπος μείωσης της παραγόμενης ενέργειας από ορυκτά καύσιμα στην οικοδομική δόμηση είναι:

- Η αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων με καύσιμα που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Η ανάπτυξη τεχνολογιών εξόρυξης χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων (Courard, Rademaker, Teller, 2001).

Στο τελικό στάδιο του κύκλου ζωής μιας κατασκευής προκύπτει το μείζον ερώτημα: “Ανακύκλωση και απορρίμματα ή ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση;”. Συχνά η ανακύκλωση ενός υλικού απαιτεί μεγαλύτερη ενέργεια από την παραγωγή του. Η γενική αρχή που ισχύει είναι ότι τα υλικά με μικρή διαδικασία βιομηχανικής παραγωγής ανακυκλώνονται εύκολα (Levy, Helene, 2004).



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής της ανακύκλωσης των υλικών (Κορωναίος, κ.α., 2005)

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΦΙΛΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Διαδικασία παραγωγής και χρήσης του σκυροδέματος με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας

- Μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και αντικατάστασή τους με βιομηχανικά απόβλητα π.χ. λάδια, ελαστικά, πλαστικά κ.α.
- Βελτίωση της τεχνολογίας παραγωγής του τσιμέντου.
- Αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη, ποζολάνη (επαναχρησιμοποίηση- ανακύκλωση βιομηχανικών υλικών), (Katsioti, Gkanis, κ.α., 2009).
- Αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος και επομένως αύξηση του ορίου ζωής του (Khalaf, Devenny, 2005).

Διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου με λιγότερη ρύπανση

Τα τελευταία χρόνια οι τσιμεντοβιομηχανίες εργάζονται με σκοπό τη δημιουργία του “πράσινου σκυροδέματος”, εκείνου δηλαδή που θα εκπέμπει λιγότερο CO₂ στην ατμόσφαιρα. Το στόχο αυτό πέτυχε, ήδη από το 2007, η γαλλική εταιρία Lafarge. Μείωσε δηλαδή το εκπεμπόμενο CO₂ κατά 16%.

Επίσης η χρήση του καινοτόμου υλικού “Ductal”, από την ίδια εταιρία, ενός δηλαδή υλικού που περιέχει τσιμέντο, θρυμματισμένο χαλαζία και ίνες χάλυβα

διαμέτρου 120 μικρά επιτυγχάνει οικονομία 35% σε πρώτες ύλες, 46% σε ενέργεια και 53% σε εκπομπή CO₂, συγκριτικά με το κλασσικό σκυρόδεμα (Koroneos, κ.α. 2005).

Η εταιρία Novacem με έδρα την Αγγλία χρησιμοποιεί πυριτικό μαγνήσιο κατά την παραγωγή του τσιμέντου το οποίο δεν εκπέμπει CO₂ κατά την καύση του, η οποία γίνεται και σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Ακόμη το σκυρόδεμα με τη χρήση πυριτικού μαγνησίου κατά τη διαδικασία της σκλήρυνσής του δεσμεύει περισσότερο CO₂ από την ατμόσφαιρα.

Τέλος, η εταιρία Calera της Καλιφόρνια πέτυχε τη δημιουργία σκυροδέματος ως αποθήκη του CO₂ της ατμόσφαιρας. Αντέστρεψε, δηλαδή, τη διαδικασία εκπομπής CO₂ κατά τη δημιουργία του τσιμέντου, αντί να παράγεται CO₂ παγιδεύεται στην ατμόσφαιρα και αποθηκεύεται από το παραγόμενο τσιμέντο. Με λίγα λόγια μετατρέπεται το CO₂ σε ανθρακικό οξύ και στη συνέχεια σε ανθρακικά άλατα.

Παραγωγή σκυροδέματος από υλικά κατεδαφίσεων ή παραγωγών βιομηχανιών ως αδρανών.

Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για εκ νέου παραγωγή και μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος (Blengin, 2009).

Παραγωγή σκυροδέματος με βελτιωμένες ιδιότητες.

- Σκυροδέματα υψηλής αντοχής και ελαφροσκυροδέματα (μικρότερες σε όγκο κατασκευές)
- Μονωτικά σκυροδέματα
- Χαμηλής υδατοπερατότητας σκυροδέματα
- Ανθεκτικά στη διάβρωση σκυροδέματα
- Διαπερατά σκυροδέματα, επιτρέπουν στο νερό να διέρχεται προς το έδαφος, χρησιμοποιούνται κυρίως σε επιστρώσεις εξωτερικών χώρων.

ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ

Με χρήση νανοϋλικών στη μάζα του σκυροδέματος

Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην τσιμεντοβιομηχανία και τη βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος αποτελεί μια πρωτοποριακή προσέγγιση για την βελτίωση των ιδιοτήτων του. Συγκεκριμένα με τη χρήση νανοσωματιδίων παράγεται νανοσκυρόδεμα από τσιμέντο και τσιμεντοειδή σωματίδια μεγέθους έως 500 nm. Με τη νανοτεχνολογία επιτυγχάνονται για το σκυρόδεμα οι εξής ιδιότητες:

- Αυξημένη μηχανική αντοχή
- Ικανότητες αυτοίασης, αυτοκαθαρισμού και αυτοελέγχου των ρωγμών

- **Υψηλή πλαστικότητα**

Στο νωπό σκυρόδεμα, από την άλλη, έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση νανοσωματιδίων πυριτίου (nano-SiO₂) και τιτανίου (nano-TiO₂) μειώνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος λόγω της μεγάλης ειδικής τους επιφάνειας καθιστώντας απαραίτητη την προσθήκη περισσότερου νερού. Αντιθέτως, βελτιώνει τη συνοχή και την ομοιογένειά του περιορίζοντας έτσι την εξίδρωση και το διαχωρισμό του. Τέλος, η χρήση νανοϋλικών μειώνει το χρόνο πήξης, καθώς επιταχύνεται η ενυδάτωση και αυξάνεται η απελευθέρωση θερμότητας.

Όσο αναφορά στη μικροδομή του σκυροδέματος, τα νανοϋλικά βελτιώνουν την πυκνότητα και μειώνουν το πορώδες λόγω του εξαιρετικά μικρού μεγέθους τους σε σχέση με τα συμβατικά συστατικά του σκυροδέματος.

Βελτίωση υπάρχει στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος από τα νανοϋλικά αφού βελτιώνουν τη ζώνη επαφής μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού προσφέροντας έναν καλύτερο διεπιφανειακό δεσμό μεταξύ τους. (Τσακαλάκης, 2010)

Με προστασία του σιδηροπλισμού των κατασκευών από σκυρόδεμα

Σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, στις οποίες υπάρχει υποψία διάβρωσης του σιδηροπλισμού, δύναται να πραγματοποιηθούν έλεγχοι διάβρωσης και να εφαρμοστούν αποτελεσματικές μέθοδοι επισκευής με απώτερο στόχο την αύξηση του χρόνου ζωής της κατασκευής, οι οποίες είναι:

- **Ηλεκτροχημικές μέθοδοι προστασίας:** τα φορτισμένα ιόντα μετακινούνται μεταξύ ανοδικών και καθοδικών περιοχών του χάλυβα. Εγκαθιστώντας μια εξωτερική άνοδο, είτε στην επιφάνεια είτε στο εσωτερικό του σκυροδέματος, μετατρέπεται ο χάλυβας σε κάθοδο. Με τη βοήθεια μιας εξωτερικής πηγής τάσεως συνεχούς ρεύματος, ρεύμα περνάει μεταξύ ανόδου και χάλυβα. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται με τρεις διαφορετικές εφαρμογές: αποκατάσταση της αλκαλικότητας, καθοδική προστασία, ηλεκτροχημική απομάκρυνση ιόντων χλωρίου.
- **Εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης:** χημικές ενώσεις (αναστολείς διάβρωσης) εισάγονται σε ήδη σκληρυμένο σκυρόδεμα και αυξάνουν το χρόνο ζωής των οπλισμών του σκυροδέματος. Αποξυλώνονται τα σαθρά τεμάχια του σκυροδέματος, καθαρίζεται η επιφανειακή οξείδωση του σιδηροπλισμού και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο επαλειφόμενος αναστολέας διάβρωσης. Για τον μη αποκαλυμμένο σιδηροπλισμό χρησιμοποιείται η μέθοδος του ψεκασμού με διαχεόμενο αναστολέα διάβρωσης ο οποίος προστατεύει τον οπλισμό ηλεκτροχημικά. Τέλος, η μέθοδος του εναέριου αναστολέα διάβρωσης εφαρμόζεται με τη βοήθεια ειδικής κάψουλας η οποία τοποθετείται στο σώμα του σκυροδέματος και σφραγίζεται με πώμα. Αυτή αναστέλλει τη διάβρωση μέσω της παθητικοποίησης του χάλυβα που οφείλεται στην αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος (Μπατής, Μοροπούλου, κ.α., 2009).

Με προστατευτικά μάζας σκυροδέματος και σιδηροπλισμού

- **Επιστρώματα:** παρασκευάζονται από σκυροδέματα υψηλής αντοχής κατασκευασμένα με τσιμέντο Portland ή πρόσθετα πολυμερή με σκοπό τη

μείωση της διαπερατότητας της μάζας του σκυροδέματος. Το πάχος τους είναι συνήθως 40-50mm και για την εφαρμογή τους απαιτείται προετοιμασία του υποστρώματος για καλύτερη συνάφεια του παλιού με το νέο υλικό. Τέτοια επιστρώματα είναι οι υδατοστεγείς μεμβράνες, δηλαδή έτοιμα βιομηχανοποιημένα φύλλα που εμποδίζουν τη διείσδυση των χλωριόντων και της υγρασίας. Στην κατηγορία των επιστρωμάτων ανήκει και η μέθοδος του πολυμερικού διαποτισμού, δηλαδή μια μέθοδος η οποία προστατεύει τη μάζα του σκυροδέματος από πολύ διαβρωτικά περιβάλλοντα, μειώνοντας τη διαπερατότητά του, πληρώνοντας τα κενά σε βάθος 35-50mm. Εφαρμόζεται σε όλα τα σκυροδέματα ανεξαρτήτως ιδιότητας και σύστασης και βελτιώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες.

- **Συμβατικές επικαλύψεις:** χρήση, δηλαδή, χρωμάτων υδατικής διασποράς ("πλαστικά" και "ακρυλικά" χρώματα) τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε συμβατικές εφαρμογές, σε σκυρόδεμα και σε τοιχοποιία. Παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως καλές αντοχές στις εξωτερικές συνθήκες, στο νερό, στο πλύσιμο, στην τριβή, στον ήλιο κ.α. και επομένως αυξάνουν τη διάρκεια ζωής της μάζας του σκυροδέματος και κατ' επέκταση των κατασκευών με αποτέλεσμα τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. (Τσακαλάκης, 2010)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη διερεύνηση των σύγχρονων πορισμάτων της έρευνας και τεχνολογίας για την εισαγωγή καινοτομιών στην κατασκευή, με έμφαση στην σχέση «περιβάλλοντος – σκυροδέματος», και με την εφαρμογή των ως άνω στρατηγικών αειφορίας επεμβαίνουμε στην διεπιφάνεια περιβάλλοντος σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μην προστατεύουμε απλώς το περιβάλλον αλλά το τσιμέντο στο περιβάλλον βελτιώνοντας τη σχέση τους και αυξάνοντας το χρόνο ζωής των κατασκευών.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Biekša D., Martinaitis V., Sakmanas A.A., (2006), "An estimation of exergy consumption patterns of energy-intensive building service systems", *Journal of Civil Engineering and Management* 12 (1), pp. 37-42.

Blengini G.A., (2009), "Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy", Elsevier- *Journal of Building and Environment* 44 (2), pp. 319-330.

Courard L., Rademaker Ch., Teller Ph., (2001), "Environmental evaluation of materials and building processes: Application of the life cycle analysis to the construction of an industrial hall", Springer- *Journal of Materials and Structures*, 34 (241), pp. 404-412.

Huberman N., Pearlmutter D., (2008), "A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert", Elsevier-Journal of Energy and Buildings 40 (5), pp. 837-848.

Ji Xi and Chen G.Q., (2005). "Exergy analysis of energy utilization in the transportation sector in China", Elsevier-Journal of Energy Policy, 34, 1709-1719.

Katsioti M., Gkanis D., Pipilikaki P., Sakellariou A., Papathanasiou A., Teas Ch., Chaniotakis E., Moundoulas P., Moropoulou A., "Study of the substitution of limestone filler with pozzolanic additives in mortars", Elsevier-Journal of Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 5, May 2009, Pages 1960-1965.

Khalaf F.M., Devenny A.S., "Properties of New and Recycled Brick Aggregates for Use in Concrete", Journal of Materials In Civil Engineering © ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE) 0899-1561 (2005) 17:4 (456), 2005.

Koroneos C., Roumbas G., Moussiopoulos N. (2005), "Exergy analysis of cement production", Int. J. Exergy, Vol. 2, No. 1, pp.55-68.

Levy S.M., Helene P., "Durability of recycle aggregates concrete: a safe way to sustainable development", Elsevier-Journal of Cement and Concrete Research 34 (2004) 1975-1980.

Bougiouri V., Xydis G., Karoglou M., Koroneos Ch., Moropoulou A., "Monitoring and Assessment Innovative Tools of Sustainable Construction", Construction & Building Materials (in press).

Γ. Μπατής, Α. Μοροπούλου, Ε. Ρακαντά, Π. Μούνδουλας, Ε. Αγγελακοπούλου «Καθοδική προστασία καθολικού του Ναού Νέας Μόνης Χίου», 16ο Πανελλήνιο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ 2009, Πάφος, Κύπρος.

Moropoulou A., Karoglou M., (2003a), "The role of materials and the design for the environmental impact assessment at the sustainable construction", HELECO'03, Αθήνα, 2003.

Moropoulou A., Karoglou M., "Protection of historic buildings for a sustainable cultural city", Int. Conf. Sustainable building for a green city; enhancing transferability of policies and good practices in the Mediterranean region, June 2004, (CD ROM).

Μοροπούλου Α., (2005b), «Συγκρότηση και θέσεις του Εθνικού Φόρουμ για τη συμμετοχή στην Ευρωπαϊκή Τεχνολογική Πλατφόρμα για την Έρευνα και Τεχνολογία στην Κατασκευή», 1η Εθνική Συνάντηση ΕΠΕΤΚ, 5 Φεβρουαρίου 2005, HELECO '05.

Μοροπούλου Α., (2005c), «Στρατηγική της Ελληνικής Πλατφόρμας Έρευνας και Τεχνολογίας για την Κατασκευή με έμφαση στην Αειφόρο Κατασκευή και την Προστασία της Πολιτιστικής Κληρονομιάς», 2η Εθνική Συνάντηση ΕΠΕΤΚ, 19 Οκτωβρίου 2005.

Μοροπούλου Α., Καθηγήτρια ΕΜΠ, Πρόεδρος της Ελληνικής Πλατφόρμας Έρευνας και Τεχνολογίας για την Κατασκευή «Σύγχρονες τάσεις στην κατεύθυνση της αειφόρου κατασκευής. Η σχέση περιβάλλοντος – σκυροδέματος», 16ο Πανελλήνιο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ 2009, Πάφος, Κύπρος.

Μπουγιούρη Β., Βλαχοπούλου Μ., Δελέγκου Α., Καραγιάννης – Μπακόλας Α., Αργυροπούλου Κ., Καρόγλου Μ., Χανδρινός Ι., Μπατής Γ., Μοροπούλου Α. «Διαγνωστικός έλεγχος υλικών και φθοράς – Υλικά επεμβάσεων συντήρησης σε κτίριο αρχιτεκτονικής κληρονομιάς από φέρουσα λιθοδομή και οπλισμένο σκυρόδεμα. Η βιομηχανία ΕΜΑΓΕ στην Κέα», 16ο Πανελλήνιο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ 2009, Πάφος, Κύπρος.

Πιπιλικάκη Π., Χανιωτάκης Μ., Μοροπούλου Α., Μπατής Γ., Κατσιώτη Μ., «Αξιολόγηση της διαμόρφωσης της πορώδους μικροδομής τσιμεντοκονιαμάτων από τετραμερή σύνθετα τσιμέντα και της επίδρασής της στην ανθεκτικότητα», 16ο Πανελλήνιο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ 2009, Πάφος, Κύπρος.

Τσακαλάκης Κ., Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων, Αθήνα, 2010.