



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΘ

Εφαρμογή Ανακυκλωμένων Υλικών στο Σκυρόδεμα – Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Ελευθέριος Αναστασίου, Επικ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

“Εναλλακτική Διαχείριση Αποβλήτων Εκσκαφών,
Κατασκευών & Κατεδαφίσεων:
ποιος, πώς, πού, γιατί.”



ANAKEM A.E.

Ανακύκλωση ΑΕΚΚ Κεντρικής Μακεδονίας Α.Ε.
Συλλογικό Σύστημα Εναλλακτικής Διαχείρισης Αποβλήτων Εκσκαφών Κατασκευών Κατεδαφίσεων

ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ



ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Εναλλακτικά υλικά στο σκυρόδεμα

- Εναλλακτικές κονίες – συστατικά τσιμέντου
 - Οικονομία
 - Ανθεκτικότητα / Ειδικές απαιτήσεις (αυτοσυμπυκνωσιμότητα, υψηλές αντοχές)
 - Μείωση CO₂ λόγω τσιμέντου
 - Συνήθως μείωση πρώιμων αντοχών, διαφοροποίηση εργασιμότητας
- Είναι εδώ και χρόνια ο κανόνας (CEM IV 32,5 ή CEM II 32,5)
- Γνωστότερα υλικά
 - Φυσική ποζολάνη
 - Ιπτάμενη τέφρα
 - Σκωρία υψικαμίνων
 - Πυριτική παιπάλη
 - Παιπάλη ασβεστόλιθου*
- Τα υλικά αυτά καλύπτονται από διεθνείς και εθνικές προδιαγραφές



Εναλλακτικά υλικά στο σκυρόδεμα

- Εναλλακτικά αδρανή
 - Οικονομία
 - Ανθεκτικότητα / Ειδικές απαιτήσεις (αντιολισθηρότητα, πυκνότητα)
 - Μείωση εξορύξεων / αποθέσεων
 - Συνήθως μείωση αντοχών, σταθερότητας όγκου
- Είναι η εξαίρεση στα συνήθη έργα (μόνο για ειδικές απαιτήσεις)
- Γνωστότερα υλικά
 - ΑΕΚΚ
 - Αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος
 - Σκωρία χαλυβουργίας
 - Υπάρχει πληθώρα βιομηχανικών παραπροϊόντων που δεν έχουν διερευνηθεί ακόμα πλήρως (σκωρία σιδηρονικελίου, μαρμαρόσκονη, ερυθρά ιλύς, κτλ.)
- Τα υλικά αυτά καλύπτονται μερικώς από διεθνείς και εθνικές προδιαγραφές



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τι ανακυκλώνουμε

- Συνολικά όλα τα απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων εξετάζονται μαζί (Construction and Demolition Waste)
- Αποτελούν το 25-30% των συνολικών αποβλήτων στην Ε.Ε.
- Περίπου 3 δις τόνοι ετησίως στην Ε.Ε. των 27
- Από αυτά περίπου το 1/3 προέρχονται από εκσκαφές και κατεδαφίσεις
- Ο ορισμός και η κατηγοριοποίηση των ΑΕΚΚ διαφέρουν από χώρα σε χώρα (κυρίως ως προς τα υλικά εκσκαφών)



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τι ανακυκλώνουμε

- Τυπικά, τα ΑΕΚΚ περιλαμβάνουν:
 - Σκυρόδεμα
 - Κεραμικά
 - Ξύλο
 - Γυαλί
 - Πλαστικό
 - Ασφαλτικά υλικά
 - Μέταλλα
 - Εδάφη και πέτρες
 - Μονωτικά υλικά
 - Γύψο και γυψοσανίδες
 - Χημικά
 - Ηλεκτρονικά και ηλεκτρολογικά υλικά
 - Υλικά συσκευασίας
 - Επικίνδυνα υλικά



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τι ανακυκλώνουμε

- Στις περισσότερες χρήσεις πολλά από τα παραπάνω δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν
- Απαιτείται διαλογή ή/και επεξεργασία
- Για χρήση στο σκυρόδεμα περισσότερο αποδεκτά είναι το σκυρόδεμα, τα κεραμικά, τα ασφαλτικά, η γύψος και το γυαλί
- Η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα καλύπτεται από τον ΕΛΟΤ EN 12620 (Αναφέρεται σε αδρανή προερχόμενα από κατασκευαστική δραστηριότητα, αλλά και σε βιομηχανικά αδρανή)
- Διαχωρίζεται η χρήση χονδρόκοκκων ($> 4\text{mm}$) με πυκνότητα τουλάχιστον 1500 kg/m^3 , αλλά και σε λεπτόκοκκα ($< 4\text{ mm}$) υπό όρους
- Παράλληλα υπάρχουν και τα απόβλητα βιομηχανικών διεργασιών (βιομηχανικά παραπροϊόντα), τα οποία είναι σημαντικά σε όγκο για να αγνοηθούν



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τεχνικά προβλήματα

- Η χρήση ΑΕΚΚ στο σκυρόδεμα είναι συγκριτικά με άλλες χρήσεις δυσχερέστερη λόγω των απαιτήσεων του υλικού
- Τα αδρανή επηρεάζουν στο σκυρόδεμα:
 - Την αντοχή
 - Την ανθεκτικότητα μέσω της διεπιφανειακής ζώνης
 - Την ανθεκτικότητα μέσω της περιεκτικότητας σε χλωριόντα και θειικά
 - Την ανθεκτικότητα μέσω της εκδήλωσης αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης
 - Τη σταθερότητα όγκου μέσω συστολής ξήρανσης και ανεπιθύμητων χημικών αντιδράσεων
 - Την εργασιμότητα νωπού σκυροδέματος λόγω τραχύτητας
 - Την απαίτηση νερού λόγω υδαταπορροφητικότητας

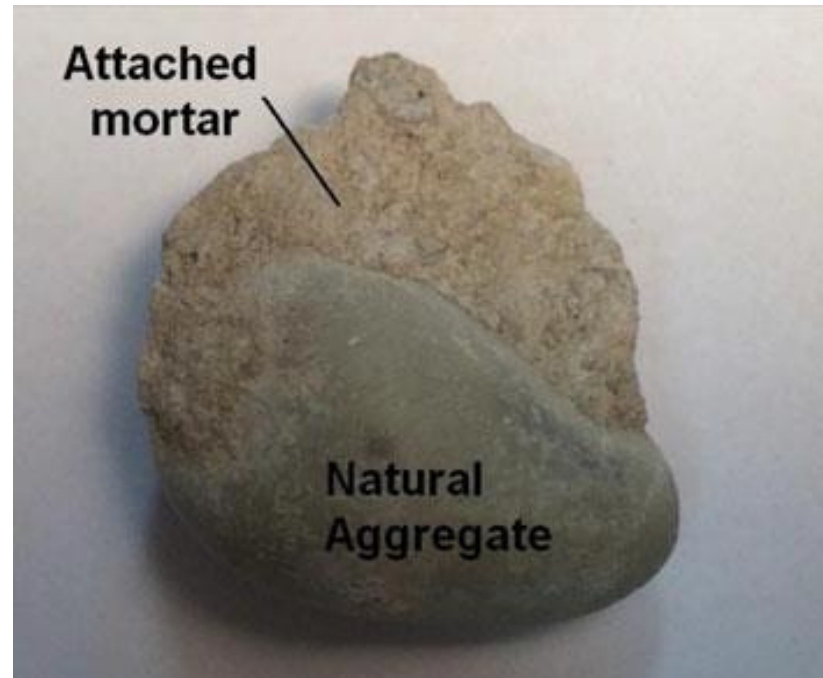


Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τεχνικά προβλήματα

- Τυπικά, τα χαρακτηριστικά των ΑΕΚΚ ως προς τα παραπάνω, συγκριτικά με τα συμβατικά αδρανή, είναι:
 - Χαμηλότερη αντοχή (π.χ. Los Angeles)
 - Πολύ αυξημένη υδαταπορροφητικότητα
 - Αυξημένη περιεκτικότητα σε θειικά και χλωριόντα
- Ο ΕΛΟΤ EN 12620 προβλέπει ξεχωριστούς ελέγχους για τα παραπάνω όταν πρόκειται για ΑΕΚΚ
 - Χαρακτηρισμός των συστατικών χονδρόκοκκων ΑΕΚΚ
 - Περιεκτικότητα θεικών και χλωριόντων
 - Επίδραση στο ρυθμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος
 - Περιεκτικότητα σε οργανικά
 - Πιθανότητα διόγκωσης
- Επίσης, αρνητικός παράγοντας είναι και η έλλειψη σταθερής ποιότητας των υλικών



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τεχνικά προβλήματα



Τυπική μορφή κόκκου ανακυκλωμένου αδρανούς από σκυρόδεμα

(πηγή: C. Pellegrino and F. Faleschini, *Sustainability Improvements in the Concrete Industry, Green Energy and Technology*, Springer 2016)



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Για ποιους λόγους ασχολούμαστε

- Διεθνώς λόγω απουσίας καλής ποιότητας αδρανών σε κάποιες χώρες (π.χ. Ολλανδία, Βέλγιο, Χόνγκ Κονγκ, κάποιες αραβικές χώρες)
- Οικονομία εφόσον δε μειώνεται η ποιότητα του σκυροδέματος (σκυρόδεμα χαμηλών απαιτήσεων, αναβάθμιση αδρανών)
- Σωστή εκμετάλλευση ανακυκλωμένων αδρανών ανάλογα με την ποιότητά τους
- Πολιτική μείωσης απορριμμάτων – μεγάλη ποσότητα υλικών
- Ικανότητα απορρόφησης μεγάλης ποσότητας υλικών από το σκυρόδεμα
- Πολιτική μείωσης περιβαλλοντικού αποτυπώματος (LCA)
- Κάθε χώρα βρίσκεται σε διαφορετική αρχική θέση ως προς την αναγκαιότητα αξιοποίησης των διαθέσιμων πρώτων υλών



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τεχνικές λύσεις

- Επιλεκτική κατεδάφιση και διαχωρισμός ανακυκλωμένων αδρανών από σκυρόδεμα
- Θραύση και κοσκίνιση ανακυκλωμένων αδρανών για διαχωρισμό της επικολλημένης τσιμεντόπαστας
- Χρήση μόνο του χονδρόκοκκου κλάσματος
- Αντικατάσταση μέρους των συμβατικών αδρανών με ανακυκλωμένα
- Επιτρεπόμενη χρήση μόνο σε χαμηλές κατηγορίες αντοχής



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Παραδείγματα: Βέλγιο

- Κατηγοριοποίηση αδρανών σε
 - Recycled Concrete Aggregate (RCA)
 - Recycled Masonry Aggregate (RCA)
 - Mixed aggregate
- Περιορισμός στη χρήση μόνο του χονδρόκοκκου κλάσματος
- Χρήση μόνο σε κατηγορίες έκθεσης Χ0 και ΧC1
- Επιτρεπόμενη χρήση σε κατηγορίες έως C25/30
- Μέγιστη χρήση σε αντικατάσταση έως 20% κ.ο. των συμβατικών αδρανών



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Παραδείγματα: Γερμανία

- Κατηγοριοποίηση αδρανών σε
 - Concrete chipings/concrete crusher sand (τουλάχιστον 90% σκυρόδεμα και αδρανή)
 - Construction chipings/construction crusher sand (τουλάχιστον 70% σκυρόδεμα και αδρανή)
 - Masonry chipings/masonry crusher sand
 - Mixed chipping/mixed crusher sand
- Τίθενται όρια για κάθε κατηγορία ως προς την πυκνότητα (π.χ. $\geq 2000 \text{ kg/m}^3$ για την 1^η κατηγορία) και την υδαταπορροφητικότητα (π.χ. $\leq 10\%$ για την 1^η κατηγορία)
- Μόνο οι δύο πρώτες κατηγορίες επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Παραδείγματα: Μεγάλη Βρετανία

- Κατηγοριοποίηση αδρανών σε
 - Recycled Concrete Aggregates – RCA (μέχρι 5% σε κεραμικό)
 - Recycled Aggregates – RA
- Περιορίζεται η χρήση των RA στην οδοποιία, σκυρόδεμα C16/20 και στις ηπιότερες κατηγορίες περιβαλλοντικής έκθεσης
- Τα RCA αντικαθιστούν έως 20% φυσικά αδρανή σε σκυροδέματα έως C40/50 και σε συγκεκριμένες κατηγορίες περιβαλλοντικής έκθεσης (Χ0, ΧC1, ΧC2, ΧC3, ΧC4, ΧF1)



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Παραδείγματα: Πορτογαλία

- Κατηγοριοποίηση αδρανών σε:

Κατηγορίες	Σκυρόδεμα (%)	Τοιχοποιία (%)	Ασφαλτικά (%)	Προσμίξεις (%)	Επιπλέοντα (%)
ARB1	≥ 90	≤ 10	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,2
ARB2	≥ 70	≤ 30	≤ 1	≤ 1	≤ 0,5
ARC	≥ 90	-	≤ 2	≤ 2	≤ 1

- Μόνο τα ARB1 και ARB2 επιτρέπονται στο σκυρόδεμα
- Τα ARB1 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σκυρόδεμα μέγιστης αντοχής C40/50 σε ποσοστό έως 25%
- Τα ARB2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σκυρόδεμα μέγιστης αντοχής C35/45 σε ποσοστό έως 20%
- Επιτρεπόμενες κατηγορίες περιβαλλοντικής έκθεσης (Χ0, ΧC1, ΧC2, ΧC3, ΧC4, ΧS1, ΧΑ1)



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Παραδείγματα: ΗΠΑ

- Δεν υπάρχει περιορισμός για τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα
- Ο ASTM C33 περιλαμβάνει το θραυσμένο σκυρόδεμα στον ορισμό των χονδρόκοκκων αδρανών
- Ο ASTM C125 περιγράφει τη χρήση θραυσμένο σκυροδέματος ως λεπτόκοκκο αδρανές
- Η χρήση τους παραμένει περιορισμένη στο σκυρόδεμα

- Σε πολλές περιπτώσεις και σε πολλές χώρες η χρήση είναι αποδεκτή με ευθύνη του μελετητή



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Πώς μπορεί να αυξηθεί η χρήση

- Εθνικό κανονιστικό πλαίσιο (Ο Κ.Τ.Σ. 2016 δεν περιλαμβάνει τα ΑΕΚΚ)
- Αύξηση διαθεσιμότητας ποιοτικών ανακυκλωμένων αδρανών (κατηγοριοποίηση)
- Αύξηση μονάδων παραγωγής και διαχείρισης ΑΕΚΚ
- Αντικίνητρα για τη χρήση φυσικών αδρανών
- Υιοθέτηση κριτηρίων Αποτίμησης Κύκλου Ζωής (LCA)
- Αύξηση της εμπιστοσύνης στα ανακυκλωμένα αδρανή μέσω πιστοποίησης
- Κατεύθυνση αδρανών σε χρήσεις ανάλογα με την κατηγορία τους

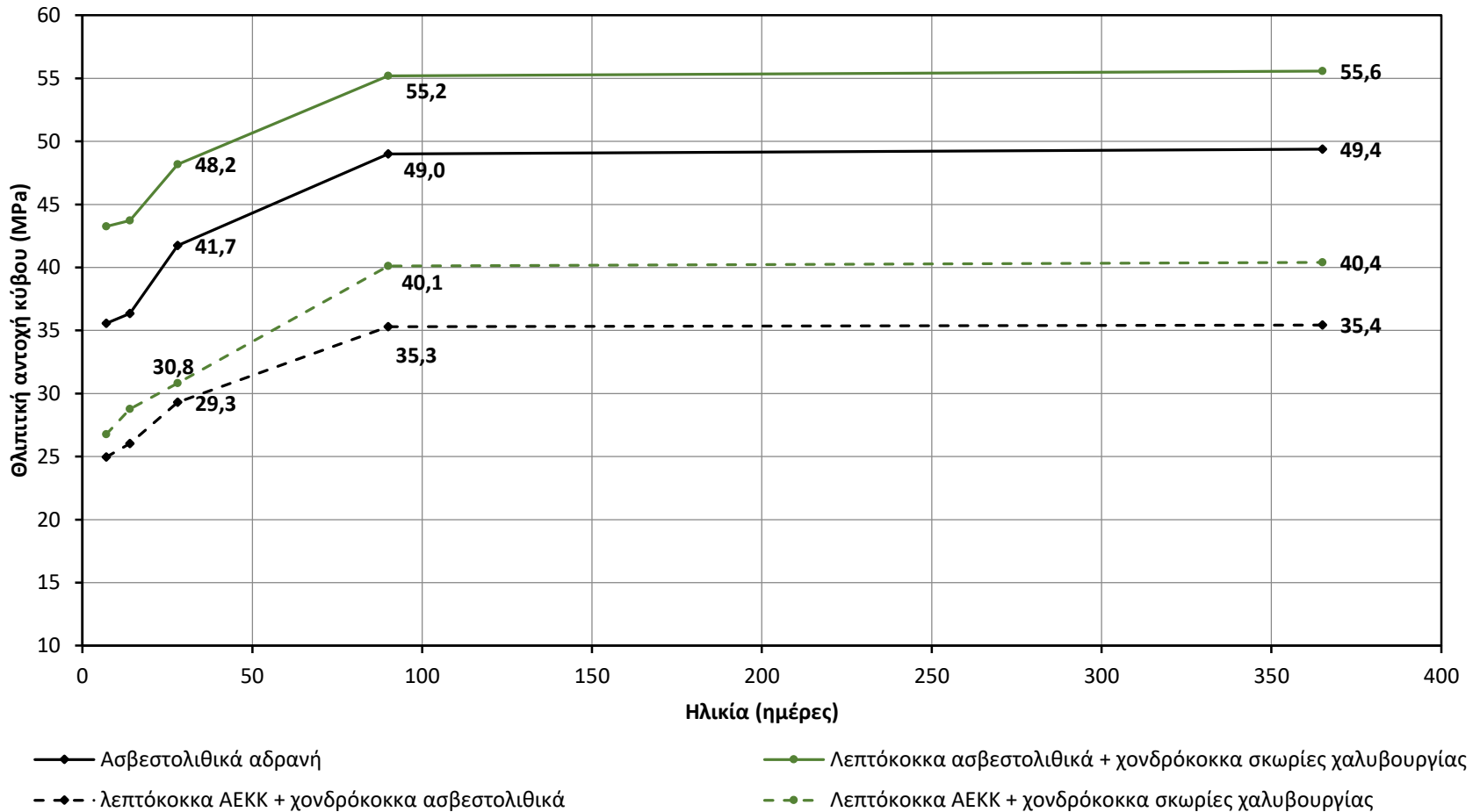


Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Έρευνα για την αντιμετώπιση προβλημάτων

- Βασικό πρόβλημα στη μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος με ΑΕΚΚ η αυξημένη υδαταπορροφητικότητα → μειωμένη εργασιμότητα και αντοχή
- Ερευνητές από τον Καναδά (Fathifazl et al, 2009) προτείνουν τη μεθοδολογία σύνθεσης Equivalent Mortar Volume, όπου λαμβάνεται υπόψη η αναλογία αδρανούς/επικολλημένης κονίας
- Ερευνητές από την Πορτογαλία (Ferreira et al, 2012) προτείνουν τον κορεσμό των ΑΕΚΚ με νερό πριν τη χρήση τους στο μίγμα (Mixing Water Compensation Method)
- Ερευνητές από την Κύπρο (Dimitriou et al, 2018) προτείνουν προκατεργασία των ΑΕΚΚ με κρούση και θραύση προκειμένου να αφαιρεθεί μεγάλο μέρος της επικολλημένης κονίας
- Έρευνα του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών Α.Π.Θ. (Anastasiou et al, 2014) προτείνει την ανάμιξη των ΑΕΚΚ με ισχυρότερα αδρανή προκειμένου να εξομαλυνθεί η απώλεια αντοχής

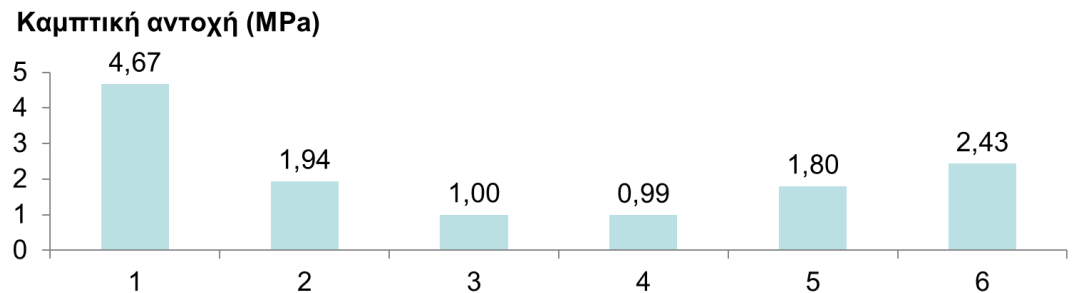
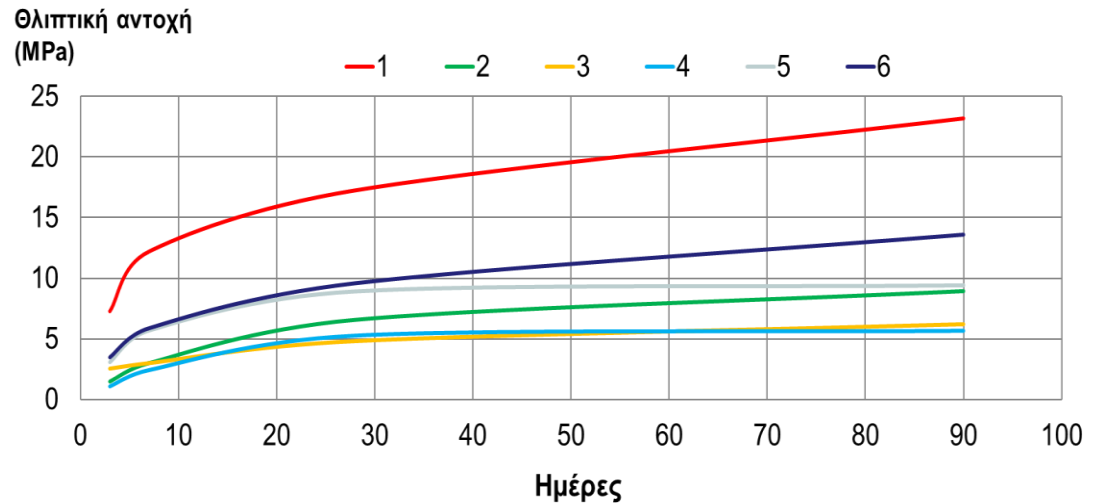


Παραδείγματα συνθέσεων σκυροδέματος με ΑΕΚΚ και βιομηχανικά παραπροϊόντα



Παραδείγματα συνθέσεων σκυροδέματος με ΑΕΚΚ και βιομηχανικά παραπροϊόντα

1. Σύνθεση αναφοράς: Ασβεστολιθικά αδρανή + τσιμέντο
2. Αντικατάσταση ασβεστολιθικής άμμου με ανακυκλωμένη
3. Αντικατάσταση 30% κ.ο. της ανακυκλωμένης άμμου με εττρινγκίτη
4. Αντικατάσταση 50% κ.ο. της ανακυκλωμένης άμμου με εττρινγκίτη
5. Πλήρης αντικατάσταση ασβεστολιθικής άμμου με μούργα
6. Αντικατάσταση 50% κ.ο. ασβεστολιθικής άμμου με μούργα



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Συμπεράσματα από τη διεθνή εμπειρία

- Όσο χαμηλότερη πυκνότητα εμφανίζουν τα ΑΕΚΚ, τόσο μεγαλύτερη μείωση της αντοχής αναμένεται να επιφέρουν
- Όσο μεγαλύτερη υδαταπορροφητικότητα εμφανίζουν τα ΑΕΚΚ, τόσο μεγαλύτερη μείωση της εργασιμότητας και της αντοχής αναμένεται να επιφέρουν
- Πλήρης αντικατάσταση φυσικών αδρανών με καλής ποιότητας αδρανή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα επιφέρει μείωση της αντοχής κατά 20-25%
- Πλήρης αντικατάσταση φυσικών αδρανών με καλής ποιότητας αδρανή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα δίνει σκυρόδεμα της τάξης των 20-40 MPa
- Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος μειώνεται περισσότερο από την αντοχή



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τα βιομηχανικά παραπροϊόντα

- Τα κοκκώδη, αδρανή και μη βλαβερά βιομηχανικά παραπροϊόντα επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα, εφόσον δεν καθυστερούν την πήξη του τσιμέντου
- Σε σχέση με τα ΑΕΚΚ, έχουν σταθερότερη σύσταση και ποιότητα
- Παγκοσμίως μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σκωρίες χαλυβουργίας, που περιγράφονται και στον EN 12620
- Στην Ελλάδα παράγεται σκωρία (EAF slag) σε μεγάλες ποσότητες από τη χαλυβουργία, αλλά και από τη ΛΑΡΚΟ
- Βρίσκει εφαρμογές κυρίως ως αντιολισθηρό αδρανές στην οδοποιία



Ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα – Τα βιομηχανικά παραπροϊόντα

- Οι σκωρίες χαλυβουργίας έχουν συνήθως μεγαλύτερη πυκνότητα, σκληρότητα και τραχύτητα από τα συμβατικά αδρανή
- Εφόσον σχεδιαστεί σωστά η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος μπορούν να αντικαταστήσουν το σύνολο των αδρανών και να αυξήσουν την αντοχή του σκυροδέματος κατά 10-30%
- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην πιθανότητα διόγκωσης λόγω ελεύθερου MgO
- Πολλά άλλα παρόμοια υλικά βρίσκονται υπό έρευνα για χρήση στο σκυρόδεμα παγκοσμίως (ελαστικά αυτοκινήτων, γυαλί, τέφρες βιομηχανικών διεργασιών, κτλ)



Ευχαριστώ για την προσοχή σας!