

Αποτίμηση Κύκλου Ζωής των Έργων Υποδομής στο πλαίσιο της Αειφορίας των Κατασκευών

Life Cycle Assessment of Infrastructure Projects for Sustainable Constructions

Ιωάννα Παπαγιάννη¹, Αλέξανδρος Λιάπης², Μιχαήλ Παπαχριστοφόρου³,
Ελευθέριος Αναστασίου⁴

*Λέξεις κλειδιά: αποτίμηση κύκλου ζωής, έργα υποδομής, αειφορία, βιομηχανικά
παραπροϊόντα*

*Key words: life cycle assessment, infrastructure projects, sustainability, industrial
byproducts*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Λόγω της σημαντικής συνεισφοράς των έργων υποδομής στην οικονομική ανάπτυξη μιας χώρας αλλά και της ταυτόχρονης ανάγκης για προστασία του περιβάλλοντος, υπάρχει ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την προώθηση της αειφόρου ανάπτυξης στις κατασκευές. Ένα εμπειριστατωμένο εργαλείο για τον αειφορικό σχεδιασμό των κατασκευών είναι η μέθοδος της Αποτίμησης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), με την οποία στην παρούσα εργασία αξιολογούνται 5 εφαρμογές σκυροδέματος για έργα υποδομής (φράγμα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, δύσκαμπτο οδόστρωμα, ταμιευτήρας από ισχνό σκυρόδεμα, ταμιευτήρας από αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα και σήραγγα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα). Στις συνθέσεις αυτές μέρος της κονιάς ή/και των αδρανών έχει αντικατασταθεί από εγχώρια βιομηχανικά παραπροϊόντα και τοπικά διαθέσιμα υλικά, όπως ιπτάμενη τέφρα και σκωρία χαλυβουργίας, έτσι ώστε να μειωθεί η κατανάλωση φυσικών πόρων και η απόθεση βιομηχανικών αποβλήτων στο περιβάλλον. Παράλληλα εξετάζονται και τα πιθανά τεχνικά και οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες στην αξιοποίηση των υλικών αυτών.

¹ Ομότιμη Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: papagian@civil.auth.gr

² Υπ. Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: aliapisk@civil.auth.gr

³ Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: papchr@civil.auth.gr

⁴ Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: elan@civil.auth.gr

ABSTRACT: The importance of infrastructural works for the economic growth of a country, along with the need for environmental protection, have created a worldwide interest for the promotion of sustainable growth in construction. A valuable tool for the sustainable planning of constructions is the methodology of Life Cycle Assessment (LCA), with which five different infrastructural concrete applications (a RCC dam, a road pavement, a lean concrete embankment, self-compacting concrete and shotcrete) are assessed. For the mixtures, parts of the binder and/or aggregates are replaced by local byproducts or materials such as fly ash (lignite combustion byproduct) and steel slag (steel industry byproduct), in order to achieve natural resources' efficiency and reduction of waste that would otherwise be deposited into landfill. The evaluation is also considering the multilevel technical and economic benefits that arise from the byproducts utilization. The results show that there is a great potential in by-products' and locally available materials' utilization in infrastructure applications.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή έργων υποδομής συνεισφέρει σημαντικά στην παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη, αλλά συνοδεύεται και από σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εξάντληση των φυσικών πόρων (Zabalza et al., 2011), οι εκτεταμένες χρήσεις γης και οι αυξανόμενες εκπομπές ρύπων (Malhotra, 2010) είναι κάποιες από τις επιπτώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή δομικών υλικών (τσιμέντο, αδρανή) αλλά και την παραγωγή και εφαρμογή σκυροδέματος. Παράλληλα, μεγάλες ποσότητες βιομηχανικών παραπροϊόντων, σε διάφορες γραμμές παραγωγής (ή έμμεσα σχετικές με τον τομέα των κατασκευών) εναποτίθενται σαν απόβλητα στο περιβάλλον, δημιουργώντας ανεπανόρθωτη ζημιά. Επομένως, υπάρχει κοινό έδαφος μεταξύ αφ' ενός της εξοικονόμησης φυσικών πόρων και μείωσης των ρύπων της κατασκευαστικής δραστηριότητας και αφ' εταίρου της αξιοποίησης των βιομηχανικών παραπροϊόντων. Το Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, έχοντας ήδη την εμπειρία για την αξιοποίηση τέτοιων υλικών (Parayianni, 1993), (Parayianni & Anastasiou, 2010), (Parayianni & Anastasiou, 2011), έχει συμμετάσχει σε πολλά κατασκευαστικά έργα σαν επιστημονικός σύμβουλος, στο πεδίο της χρήσης βιομηχανικών παραπροϊόντων σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται πέντε από αυτά τα έργα: ένα φράγμα βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete – RCC), τμήμα δύσκαμπτου οδοστρώματος επίσης κατασκευασμένου από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, επίχωμα ταμιευτήρα από ισχνό σκυρόδεμα, ταμιευτήρας από οπλισμένο σκυρόδεμα με εφαρμογή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην κατασκευή σήραγγας. Τα βιομηχανικά παραπροϊόντα που χρησιμοποιούνται προέρχονται από δύο τοπικές βιομηχανίες και είναι τα εξής: ιπτάμενη τέφρα, η οποία είναι το παραπροϊόν της

καύσης λιγνίτη και ανέρχεται στα 8-10 εκατομμύρια τόνους ετησίως, καθώς και η σκωρία χαλυβουργίας, τα παραπροϊόντα της βιομηχανίας χάλυβα, και πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση της Ελλάδας, της μεθόδου παραγωγής του Κλιβάνου Ηλεκτρικού Τόξου (Electric Arc Furnace – EAF). Τα παραπροϊόντα αυτής της διαδικασίας παραγωγής χάλυβα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τη σκωρία κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου, η οποία παράγεται μορφή χονδρόκοκκου υλικού κατά το πρώτο στάδιο της μεταλλουργικής διαδικασίας και τη σκωρία κάδου (Ladle Furnace Slag – LFS) η οποία είναι λεπτόκοκκο υλικό, παράγεται κατά το στάδιο της δευτερογενούς μεταλλουργίας και χρησιμοποιείται είτε σαν κονία είτε σαν φίλλερ.

Για την περιβαλλοντική αποτίμηση των εξεταζόμενων εφαρμογών επιλέχθηκε η μέθοδος της Αποτίμησης Κύκλου Ζωής, η οποία αποδεικνύεται αποτελεσματική σε περιπτώσεις αξιολόγησης δομικών υλικών και κατασκευαστικών εφαρμογών (Huntzinger & Eatmon, 2009), (Anastasiou et al., 2015). Τα δεδομένα για την αποτίμηση προέρχονται κυρίως από Ελληνικές βιομηχανίες. Ο απαιτούμενος βαθμός λεπτομέρειας στα δεδομένα, καθώς και η έλλειψη μετρήσεων από κάποιες βιομηχανίες κατέστησαν αναγκαία τη χρήση συμπληρωματικών δεδομένων από βιβλιοθήκες και βάσεις δεδομένων του λογισμικού AKZ SimaPro. Για την εκτίμηση του οικονομικού κόστους των εφαρμογών σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν μέσες τιμές της Ελληνικής αγοράς, για την περίοδο 2014-2015.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μέθοδος της Αποτίμησης Κύκλου Ζωής χρησιμοποιείται από τα τέλη της δεκαετίας του '60, κερδίζοντας διαρκώς έδαφος σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου μελετάται το περιβαλλοντικό φορτίο της εκάστοτε γραμμής παραγωγής. Στα τέλη της δεκαετίας του '90 και αρχές του 2000 ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) εκδίδει τα πρότυπα 14040 (ISO, 2006a) και 14044 (ISO, 2006b), όπου καθορίζεται πλέον αναλυτικά το πλαίσιο και οι κανόνες εφαρμογής της μεθόδου. Επόμενο στάδιο από την παγίωση της AKZ, αποτελεί η δημιουργία των Περιβαλλοντικών Δηλώσεων Προϊόντων (Environmental Product Declarations – EPDs), οι οποίες αποδίδονται σε προϊόντα από πιστοποιημένους φορείς και παρέχουν πληροφορίες για την περιβαλλοντική συμπεριφορά των προϊόντων, σύμφωνα με τον κύκλο ζωής τους. Το πρότυπο ISO 14025 (ISO, 2006c) θέτει το γενικό πλαίσιο δημιουργίας των EPDs και το ευρωπαϊκό EN 15804 (CEN, 2012) ασχολείται με την περίπτωση των Δηλώσεων στα δομικά προϊόντα.

Η μέθοδος της AKZ συνοψίζεται σε τέσσερα κύρια στάδια: καθορισμός σκοπού και πεδίου δράσης, απογραφική ανάλυση, αποτίμηση επιπτώσεων και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η σημασία του πρώτου και του τελευταίου σταδίου γίνεται αντιληπτή από τις ονομασίες τους. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη ανάλυση των άλλων δύο σταδίων. Κατά το στάδιο της απογραφικής ανάλυσης πραγματοποιείται η λεπτομερής καταγραφή όλων των εισροών (πρωτογενείς και

δευτερογενείς ύλες, ενέργεια, μεταφορές, ανθρωπόωρες, χρήσεις γης κ.α.) και εκροές (προϊόντα, παραπροϊόντα, εκπομπές ρύπων σε αέρα/νερό/έδαφος) οι οποίες συμμετέχουν στον κύκλο ζωής του μελετώμενου προϊόντος. Στις κατασκευαστικές εφαρμογές το προϊόν μπορεί να είναι είτε ένας δεδομένος όγκος μίγματος σκυροδέματος, είτε ένα κατασκευαστικό στοιχείο, ή ακόμη και το σύνολο μιας κατασκευής, ανάλογα με τα χωρικά και χρονικά όρια που καθορίζονται για τη μελέτη. Στην παρούσα εργασία τα όρια χαρακτηρίζονται με τον όρο «απ' το λίκνο στην πύλη» (cradle to gate), που σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπ' όψη τα στάδια της χρήσης και της τελικής απόθεσης του προϊόντος μετά τη λήξη του χρόνου ζωής του. Επίσης η φάση της κατασκευής δεν συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς για το λόγο ότι το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα είναι ίδιο για τα διαφορετικά σενάρια που συγκρίνονται για κάθε εφαρμογή, αλλά και λόγω έλλειψης λεπτομερών δεδομένων, κάτι το οποίο θα οδηγούσε σε αυξημένη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Θα πρέπει ωστόσο να τονισθεί ότι για όλες τις εξεταζόμενες εφαρμογές, η αξιοποίηση των παραπροϊόντων οδηγεί σε οφέλη που αφορούν τη φάση χρήσης, τα οποία αποδίδονται στην αύξηση αντοχών και ανθεκτικότητας, κάτι το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την παράταση του ωφέλιμου χρόνου ζωής του έργου και ελάττωση των απαραίτητων εργασιών συντήρησης.

Στο στάδιο της αποτίμησης των επιπτώσεων όλες οι καταγεγραμμένες εισροές και εκροές συσχετίζονται με συγκεκριμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ο συσχετισμός επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας τις τιμές των αποτελεσμάτων της απογραφικής ανάλυσης με συντελεστές (Συντελεστές Χαρακτηρισμού), ανάλογα με τη συνεισφορά του κάθε αποτελέσματος στην κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μελετάται. Στην παρούσα εργασία η κατηγορία που επιλέχθηκε είναι οι επιπτώσεις της κατασκευαστικής δραστηριότητας στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, κάτι το οποίο αποτιμάται μέσα από το αποτύπωμα άνθρακα του κάθε εναλλακτικού σεναρίου των εφαρμογών, και τα αποτελέσματα εκφράζονται σε ισοδύναμα κιλά CO₂ (kg CO₂ equivalent) ανά m³ σκυροδέματος. Η αποτίμηση βασίζεται στους Συντελεστές Χαρακτηρισμού που προτείνονται από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) σε χρονικό ορίζοντα 100ετίας.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε εφαρμογή και κάθε σενάριο τόσο των συνθέσεων αναφοράς όσο και των εναλλακτικών μιγμάτων.

Φράγμα από Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα

Η πρώτη εφαρμογή αφορά την κατασκευή ενός φράγματος βαρύτητας, με τη μέθοδο του κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC). Το φράγμα κατασκευάστηκε στον ποταμό Νέστο, στη θέση της Πλατανόβρυσης, στην περιφερειακή ενότητα Δράμας. Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο 1995-1999 και ήταν

ένα πρωτοποριακό έργο για την εποχή, καθώς συνδύαζε την τεχνολογία του Κυλινδρούμενου Σκυροδέματος με την ευρεία αντικατάσταση στο μίγμα σκυροδέματος του τσιμέντου με επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα. Παρά τη χρονική τοποθέτηση του έργου, τα δεδομένα κόστους που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή παρουσιάζονται σε παρούσες αξίες. Η αποτίμηση γίνεται για δύο μίγματα σκυροδέματος, το ένα είναι η σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε στο έργο, η οποία περιέχει υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας σαν αντικατάσταση του τσιμέντου και το άλλο είναι μια θεωρητική σύνθεση αναφοράς η οποία περιέχει μόνο τσιμέντο σαν κονία.

Πίνακας 1. Σύνθεση, περιβαλλοντική αποτίμηση και εκτίμηση κόστους για το φράγμα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα

		Σενάριο	ΚΦ1	ΚΦ2
		μονάδες	kg/m ³	kg/m ³
Σύνθεση		Τσιμέντο Ι 42.5	275	50
		Ιπτάμενη τέφρα	-	225
		Νερό	128	128
		Ασβεστ. αδρανή (λεπτόκοκκα)	607	607
		Ασβεστ. αδρανή (χονδρόκοκκα)	1350	1350
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα		μονάδες	kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³
		Υλικά	272.39	68.32
		Μεταφορές	20.28	25.15
		Παραγωγή	2.33	2.33
		Σύνολο	295.00	95.80
Αποτίμηση κόστους		μονάδες	€/m ³	€/m ³
		Υλικά	34.90	18.00
		Μεταφορές	7.20	9.21
		Παραγωγή	0.36	0.36
		Σύνολο	42.46	27.57

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, η αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του περιβαλλοντικού φορτίου αλλά και του κόστους του μίγματος. Παρά τη μικρή αύξηση ρύπων και κόστους λόγω των μεταφορών, το συνολικό όφελος της προσθήκης της ιπτάμενης τέφρας είναι έκδηλο. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, η σύνθεση σκυροδέματος που εφαρμόστηκε προφανώς καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις του έργου.

Οδόστρωμα από Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα

Η επόμενη εφαρμογή αφορά την κατασκευή ενός τμήματος οδοστρώματος, με τη μέθοδο του κυλινδρούμενου σκυροδέματος. Η πιλοτική εφαρμογή του σκυροδέματος αυτού έγινε σε βοηθητικό τμήμα της επαρχιακής οδού Θεσσαλονίκης – Σερρών (Ε65), κοντά στη Λιτή. Το συνολικό μήκος του οδοστρώματος είναι 1000 m, από τα οποία τα 500 m κατασκευάστηκαν με

σκυρόδεμα με ασβεστολιθικά αδρανή (ΚΟ2) και τα υπόλοιπα 500 m με σκυρόδεμα με αδρανή σκωρίας (ΚΟ3). Αντί για τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε μια μεικτού τύπου υδραυλική κονία, με βάση την ιπτάμενη τέφρα, έτσι ώστε να μειωθεί η περιβαλλοντική και οικονομική επιβάρυνση του έργου. Για την παρούσα εργασία παρουσιάζεται επίσης ένα μίγμα αναφοράς (ΚΟ1), το οποίο περιέχει τσιμέντο και ασβεστολιθικά αδρανή, κάτι το οποίο αποτελεί τη συνήθη πρακτική στα δύσκαμπτα οδοστρώματα στην Ελλάδα.

Πίνακας 2. Σύνθεση, περιβαλλοντική αποτίμηση και εκτίμηση κόστους για το τμήμα οδοστρώματος από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα

	Σενάριο	ΚΟ1	ΚΟ2	ΚΟ3
	μονάδες	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Σύνθεση	Τσιμέντο Ι 42.5	280	-	-
	Υδραυλική κονία οδοστρωσίας	-	280	280
	Νερό	148.2	148.4	162.2
	Ασβεστ. αδρανή (λεπτόκοκκα)	985	985	1111
	Ασβεστ. αδρανή (χονδρόκοκκα)	985	985	-
	Αδρανή σκωρίας ηλ. κλιβάνου (χονδρόκοκκα)	-	-	1090
	Υπερευστοποιητής (% κ.β. κονίας)	0.60%	0.60%	0.60%
	μονάδες	kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	Υλικά	278.96	88.06	83.43
	Μεταφορές	0.711	0.71	5.14
	Παραγωγή	2.33	2.33	2.33
	Σύνολο	282.00	91.10	90.90
		μονάδες	€/m ³	€/m ³
Αποτίμηση κόστους	Υλικά	38.7	34.90	36.30
	Μεταφορές	0.29	0.29	2.82
	Παραγωγή	0.36	0.36	0.36
	Σύνολο	39.36	35.56	39.48

Από άποψη κόστους, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2, η σύνθεση με την υδραυλική κονία και τα ασβεστολιθικά αδρανή (ΚΟ2) φαίνεται ότι είναι η πιο συμφέρουσα. Ο λόγος είναι τα υψηλότερα μεταφορικά κόστη για τα αδρανή σκωρίας, σε σύγκριση με τα ασβεστολιθικά, τα οποία βρίσκονται πλησιέστερα

στο συγκεκριμένο εργοτάξιο. Όσον αφορά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, το σενάριο σκυροδέματος με τα αδρανή σκωρίας (ΚΟ3) είναι λίγο πιο αποτελεσματικό από το σκυροδέμα με ασβεστολιθικά αδρανή (ΚΟ2), αλλά και τα 2 σενάρια υπερέχουν σαφώς περισσότερο από τη σύνθεση αναφοράς με το τσιμέντο.

Επίχωμα από ισχύο σκυροδέμα

Η συγκεκριμένη εφαρμογή αφορά την κατασκευή ενός επιχώματος ισχύου σκυροδέματος για ταμειυτήρα, στην περιοχή της Αμφιλοχίας, του νομού Αιτωλοακαρνανίας. Το έργο έχει προγραμματιστεί να κατασκευαστεί μέσα στο 2017, και ο κύριος στόχος για τη σύνθεση του σκυροδέματος είναι να χρησιμοποιηθεί ψαμμίτης, ο οποίος υπάρχει σε μεγάλη διαθεσιμότητα στην περιοχή, σε αντικατάσταση των ασβεστολιθικών αδρανών. Για την παρούσα εργασία αξιολογούνται τέσσερις συνθέσεις σκυροδέματος, η μία με τσιμέντο και ασβεστολιθικά αδρανή, μία με τσιμέντο και συνδυασμό ασβεστολιθικών και ψαμμίτη και άλλες δύο αντίστοιχες με τις προηγούμενες αλλά μέρος του τσιμέντου αντικαθίσταται από ιπτάμενη τέφρα.

Πίνακας 3. Σύνθεση, περιβαλλοντική αποτίμηση και εκτίμηση κόστους για το επίχωμα ισχύου σκυροδέματος

		Σενάριο	IE1	IE2	IE3	IE4
		μονάδες	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Σύνθεση	Τσιμέντο Ι 42.5		100	100	60	60
	Ιπτάμενη τέφρα		-	-	60	60
	Νερό		176.5	176.5	197	197
	Ασβεστολιθικά αδρανή		1988	-	1953	-
	Ψαμμίτης		-	1988		1953
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	μονάδες		kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³
	Υλικά		101.31	101.75	66.42	67.08
	Μεταφορές		2.36	1.92	5.85	5.39
	Παραγωγή		2.33	2.33	2.33	2.33
	Σύνολο		106.00	106.00	74.60	74.80
Αποτίμηση κόστους	μονάδες		€/m ³	€/m ³	€/m ³	€/m ³
	Υλικά		19.3	9.33	16.50	6.69
	Μεταφορές		0.93	0.79	2.37	2.23
	Παραγωγή		0.36	0.36	0.36	0.36
	Σύνολο		20.59	10.48	19.23	9.28

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 φαίνεται ότι οι συνθέσεις με ιπτάμενη τέφρα (IE3, IE4) είναι αυτές με το χαμηλότερο περιβαλλοντικό ίχνος. Επίσης οι δύο συνθέσεις που περιέχουν ψαμμίτη παρουσιάζουν και το χαμηλότερο κόστος, ακριβώς για το λόγο της εγγύτητας του υλικού στο εργοτάξιο. Από τις δύο αυτές συνθέσεις, εκείνη που περιέχει τσιμέντο και ιπτάμενη τέφρα (IE4) θα περίμενε

κανείς να έχει σαφώς χαμηλότερο κόστος από εκείνη με τσιμέντο (IE2), κάτι το οποίο δεν συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης απόστασης, και άρα κόστους, μεταφοράς της τέφρας στο εργοτάξιο σε σχέση με το τσιμέντο. Από πλευράς αντοχών, τόσο η σύνθεση IE2 όσο και η IE4 πληρούν τις απαιτήσεις του έργου (θλιπτική αντοχή της τάξης των 4MPa).

Ταμιευτήρας από αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα

Η επόμενη εφαρμογή αναφέρεται στην κατασκευή ταμιευτήρα για υβριδικό ενεργειακό έργο (συνδυασμός αιολικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας) στο νησί της Ικαρίας. Η απαίτηση για πυκνό οπλισμό για την κατασκευή του ταμιευτήρα κατέστησε τη σύνθεση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σαν μια απόλυτα βιώσιμη λύση. Οι συνθέσεις που παρουσιάζονται εδώ προέρχονται από την εργαστηριακή μελέτη συνθέσεων που έγινε για το έργο και αποτελούνται από ένα σκυρόδεμα αναφοράς με τοπικά διαθέσιμα ασβεστολιθικά αδρανή και ασβεστολιθικό φίλλερ, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα, αλλά και τη σύνθεση σκυροδέματος που όντως αποφασίστηκε να εφαρμοστεί στο έργο, στην οποία το ασβεστολιθικό φίλλερ αντικαταστάθηκε από σκωρία κάδου.

Πίνακας 4. Σύνθεση, περιβαλλοντική αποτίμηση και εκτίμηση κόστους για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα

	Σενάριο	TA1	TA2
Σύνθεση	μονάδες	kg/m ³	kg/m ³
	Τσιμέντο I 42.5	350	370
	Νερό	203	214.6
	Ασβεστ. αδρανή (λεπτόκοκκα)	923.4	924.4
	Ασβεστ. αδρανή (χονδρόκοκκα)	610.9	599.6
	Ασβεστολιθικό φίλλερ	200	-
	Σκωρία κάδου	-	180
	Υπερευστοποιητής (% κ.β. κονιάς)	2.2	2
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	μονάδες	kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³
	Υλικά	298.54	312.24
	Μεταφορές	8.13	9.43
	Παραγωγή	2.33	2.33
	Σύνολο	309.00	324.00
Αποτίμηση κόστους	μονάδες	€/m ³	€/m ³
	Υλικά	56.50	57.30
	Μεταφορές	1.89	1.80
	Παραγωγή	0.36	0.36
	Σύνολο	58.75	59.46

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, η σύνθεση με τη σκωρία κάδου (TA2) έχει ελαφρώς μεγαλύτερη περιβαλλοντική και οικονομική επιβάρυνση από τη σύνθεση αναφοράς, κάτι το οποίο αποδίδεται στην μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου και τη μεταφορά της σκωρίας κάδου. Η επιβάρυνση αυτή όμως φαίνεται ασήμαντη αν ληφθεί υπ' όψη η σημαντική αύξηση των αντοχών (43% στην πρώιμη θλιπτική αντοχή και 9.5% στην θλιπτική αντοχή 28 ημερών) που προκύπτει από την προσθήκη της σκωρίας κάδου.

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για κατασκευή σήραγγας

Η τελευταία εφαρμογή αναφέρεται σε τρεις συνθέσεις για την παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την κατασκευή σήραγγας στην Εγνατία Οδό, κοντά στην πόλη των Γρεβενών. Η πρώτη σύνθεση περιέχει αποκλειστικά τσιμέντο σαν κονία, και αποτελεί τη συνήθη πρακτική του κατασκευαστή που ανέλαβε το έργο. Οι άλλες 2 περιέχουν σκωρία κάδου, σαν αντικατάσταση του 20% και 30% του τσιμέντου, αντίστοιχα. Και οι τρεις αυτές συνθέσεις εφαρμόστηκαν πιλοτικά σε διαφορετικά τμήματα της σήραγγας.

Πίνακας 5. Σύνθεση, περιβαλλοντική αποτίμηση και εκτίμηση κόστους για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

	Σενάριο	ΕΣ1	ΕΣ2	ΕΣ3
Σύνθεση	μονάδες	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
	Τσιμέντο Ι 42.5	440	352	308
	Σκωρία κάδου	-	88	132
	Νερό	250	250	250
	Ασβεστ. αδρανή (λεπτόκοκκα)	1540	1540	1540
	Υπερευστοποιητής (% κ.β. κονιάς)	1%	1.60%	1%
	Επιταχυντής (% κ.β. κονιάς)	5-6%	5-6%	5-6%
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	μονάδες	kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³	kg CO ₂ eq/m ³
	Υλικά	437.47	354.54	307.65
	Μεταφορές	32.2	32.13	32.02
	Παραγωγή	2.33	2.33	2.33
	Σύνολο	472.00	389.00	342.00
Αποτίμηση κόστους	μονάδες	€/m ³	€/m ³	€/m ³
	Υλικά	56.6	54.40	45.40
	Μεταφορές	11.50	11.80	11.90
	Παραγωγή	0.36	0.36	0.36
	Σύνολο	68.46	66.56	57.66

Από τον Πίνακα 5 φαίνεται ότι η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με τη σκωρία κάδου δίνει σαφές πλεονέκτημα στις αντίστοιχες συνθέσεις, τόσο σε περιβαλλοντικούς όσο και οικονομικούς όρους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το πλεονέκτημα αυτό παρουσιάζεται και στις φυσικο-μηχανικές ιδιότητες των δύο

εναλλακτικών συνθέσεων: κατά την εφαρμογή παρατηρήθηκε μείωση στο υλικό που ανακλάται λόγω της εκτόξευσης (και συνεπώς μείωση της τελικής καταναλισκόμενης ποσότητας υλικού), λόγω της αυξημένης συνεκτικότητας του φρέσκου μίγματος. Επίσης, οι εναλλακτικές συνθέσεις ανέπτυξαν αντοχές που έφτασαν στο 93% της αντοχής της σύνθεσης αναφοράς.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων σε έργα υποδομής από σκυρόδεμα αποτελεί μια βιώσιμη και αειφόρο επιλογή. Όπως φαίνεται από τις εφαρμογές που παρουσιάστηκαν παραπάνω, οι περισσότερες από τις οποίες βρίσκονται ήδη σε φάση χρήσης εδώ και αρκετό καιρό, τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη μπορούν να συνυπάρξουν σε μια κατασκευή μαζί με τις υψηλές επιδόσεις σε αντοχή και ανθεκτικότητα. Αν και μεταξύ των εφαρμογών υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις σχετικά με το πιο ωφέλιμο σενάριο, η συνολική εικόνα δείχνει τις δυνατότητες που προσφέρει η χρήση τέτοιων υλικών στον αειφορικό σχεδιασμό των έργων υποδομής. σύνθεσης αναφοράς.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα για την παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΤΕΦΡΟΔΟΣ 2011-2014 και του προγράμματος SLAGPROD 2011-2015, τα οποία χρηματοδοτήθηκαν από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας. Επίσης, τμήμα της έρευνας αποτελεί και το αντικείμενο διδακτορικής διατριβής με υποτροφία του ΙΚΥ η οποία χρηματοδοτείται από την Πράξη «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» από πόρους του ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση», 2014-2020 με τη συγχρηματοδότηση του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (Ε.Κ.Τ.) και του Ελληνικού Δημοσίου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Anastasiou, E. K., Liapis, A., & Papayianni, I., “Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials”. Resources, Conservation & Recycling, Vol. 101 (2015) 1-8.

Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D., “A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies”. Journal of Cleaner Production, Vol. 17, No 7 (2009) 668-675.

ISO Environmental management – life cycle assessment –principles and framework, ISO Standard 14040:2006 (2006)

ISO Environmental management – life cycle assessment –requirements and guidelines, ISO Standard 14044:2006 (2006)

ISO Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures, ISO Standard 14025:2006 (2006)

CEN Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products, EN Standard 15804:2012 (2012)

Malhotra, V. M., “Global warming, and role of supplementary cementing materials and superplasticisers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of portland cement”. *International Journal of Structural Engineering*, Vol. 1, No 2 (2010) 116-130.

Papayianni, I., & Anastasiou, E., “Concrete incorporating highcalcium fly ash and EAF slag aggregates”. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 63, No 8 (2011) 597-604.

Papayianni, I., & Anastasiou, E., “Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products”. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No 8 (2010) 1412-1417.

Papayianni, I., “Use of a high calcium fly ash in blended type cement production”. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 15 (1993) 231-235.

Zabalza, B. I., Valero, C. A., & Aranda, U. A., “Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential”. *Building and Environment*, Vol. 46, No 5 (2011) 1133-1140.