

Αποτίμηση Κύκλου Ζωής προϊόντων σκυροδέματος με τη χρήση σκυριών χαλυβουργίας

Ιωάννα Παπαγιάννη

Καθηγήτρια Α.Π.Θ., papayian@civil.auth.gr

Ελευθέριος Αναστασίου

Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ., elan@civil.auth.gr

Αλέξανδρος Λιάπης

Υποψήφιος Διδάκτωρ ΑΠΘ, aliapisk@civil.auth.gr

Μιχαήλ Παπαχριστοφόρου

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, papchr@civil.auth.gr

Εισαγωγή

Η κατασκευαστική δραστηριότητα σαν σύνολο, αλλά και ειδικότερα οι εφαρμογές σκυροδέματος, παρά τον αναπτυξιακό τους χαρακτήρα στην οικονομία μιας χώρας, εμπεριέχουν και πολλαπλά περιβαλλοντικά ζητήματα. Η υπερκατανάλωση φυσικών πόρων (Zabalza et al., 2011), οι εκτενείς χρήσεις γης αλλά και η συνεχώς αυξανόμενη έκλυση ρύπων (Flower & Sanjayan, 2007, Malhotra, 2010) είναι κάποια από τα ζητήματα αυτά, τα οποία αναφέρονται τόσο σε επίπεδο παραγωγής και επεξεργασίας πρώτων υλών (τσιμέντο, αδρανή) όσο και παραγωγής σκυροδέματος. Οι έννοιες της βιώσιμης και αειφόρου ανάπτυξης αντιπροσωπεύουν την προσπάθεια να καλυφθεί αυτό ακριβώς το χάσμα, ανάμεσα στην οικονομική ανάπτυξη και την προστασία του περιβάλλοντος. Οι κατασκευές είναι ένα μόνο τμήμα της γενικότερης κινητοποίησης σε παγκόσμιο επίπεδο (από τις σύγχρονες οδηγίες, κανονιστικά πλαίσια και νομοθετήματα, αλλά και από την κοινή λογική) για την υιοθέτηση ενός μοντέλου το οποίο θα επιτρέπει την οικονομική ευημερία, χωρίς όμως να πραγματοποιείται εις βάρος του περιβάλλοντος και του κοινωνικού συνόλου.

Ενώ οι έννοιες της βιωσιμότητας και αειφορίας συναντώνται συχνά σαν θεωρητικές αναφορές, πιο σπάνιες είναι οι περιπτώσεις που επιδιώκεται η ποσοτικοποίησή τους. Παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή βιομηχανικών παραπροϊόντων ως εναλλακτικών υλικών στη δόμηση, με σκοπό την αντικατάσταση συμβατικών υλικών και συνεπώς τη μείωση της κατανάλωσης φυσικών και ενεργειακών πόρων. Ενώ σαν πρακτική είναι αρκετά διαδεδομένη (ειδικά τα τελευταία χρόνια), άποψη των συγγραφέων είναι ότι δεν δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην ακριβή μέτρηση του οφέλους για το οποίο εφαρμόζεται. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να καλύψει όσο το δυνατόν αυτό το κενό, δίνοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της περιβαλλοντικής ταυτότητας διαφορετικών εφαρμογών σκυροδέματος και κονιαμάτων, όπου γίνεται αντικατάσταση κάποιων συμβατικών υλικών με παραπροϊόντα της βιομηχανίας του χάλυβα. Τα παραπροϊόντα αυτά, ευρέως γνωστά σαν σκυρίες χαλυβουργίας, βρίσκονται σε μεγάλη διαθεσιμότητα στην Ελλάδα (η ετήσια παραγωγή ανέρχεται στους 250,000 τόνους) επομένως κρίνεται σκόπιμη η βιώσιμη αξιοποίησή τους. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η αξιοποίηση της σκυρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (Electric Arc Furnace - EAF slag) σε διάφορες διαβαθμίσεις σαν εναλλακτικό αδρανές και της σκυρίας κάδου (Ladle Furnace Slag – LFS) σαν εναλλακτική κονία. Οι εφαρμογές αφορούν την κατασκευή βιομηχανικού δαπέδου, κατασκευή οδοστρώματος από διαπερατούς κυβόλιθους, παραγωγή βαρέως σκυροδέματος, παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τέλος την παραγωγή επισκευαστικού κονιάματος. Η εργασία αυτή βασίζεται στα αποτελέσματα του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος συνεργασίας “SLAGPROD”.

Μεθοδολογία

Το αποτύπωμα που αφήνει μια κατασκευή στο περιβάλλον μπορεί να εκτιμηθεί και ποσοτικοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, τα τελευταία χρόνια όμως μία έχει επικρατήσει σχεδόν καθολικά, η μέθοδος της Αποτίμησης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) (Curran, 1996, Guinee, 2002). Η μέθοδος ουσιαστικά εδραιώθηκε τη δεκαετία του '90 όταν ο Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης (ISO) σαν μέρος της σειράς προτύπων 14000, εξέδωσε την οικογένεια κανονισμών 14040-14044 (ISO, 2006). Οι κανονισμοί αυτοί θέτουν ένα πλαίσιο για την εφαρμογή της μεθόδου σε οποιοδήποτε προϊόν ή δραστηριότητα, έτσι ώστε τα αποτελέσματά της να είναι συγκρίσιμα και κοινώς αποδεκτά. Η πιο συνηθισμένη χρήση της μεθόδου στις κατασκευές αφορά την αποτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κτιρίων (Sharma et.al, 2011) αλλά και επιμέρους δομικών υλικών (Zabalza et al., 2011, Huntzinger & Eatmon, 2009).

Η μέθοδος της Αποτίμησης Κύκλου Ζωής συνοψίζεται στα εξής 4 στάδια, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς: καθορισμός σκοπού και πεδίου δράσης, απογραφική ανάλυση δεδομένων, αποτίμηση επιπτώσεων, ερμηνεία αποτελεσμάτων. Παρακάτω γίνεται συνοπτική αναφορά σε κάθε ένα από τα στάδια αυτά σε συνάρτηση με τις προς μελέτη εφαρμογές.

Σκοπός και πεδίο δράσης

Ο σκοπός της μελέτης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού οφέλους που μπορεί να προκύψει από την αντικατάσταση τσιμέντου και αδρανών με σκωρίες χαλυβουργίας. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η προσθήκη σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου σαν αδρανές, σε αντικατάσταση τόσο των ασβεστολιθικών αδρανών, όσο και άλλων πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται σαν αδρανή (όπως ο βαρύτης στην περίπτωση παραγωγής βαρέως σκυροδέματος), αλλά και η προσθήκη σκωρίας κάδου σε αντικατάσταση μέρους της συνδετικής κονιάς (τσιμέντο). Οι συνθέσεις (αναφοράς/μάρτυρας και εναλλακτική) για κάθε μια από τις προς μελέτη εφαρμογές φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 1. Συνθέσεις βιομηχανικού δαπέδου (όπου ΒΔ1 η σύνθεση αναφοράς και ΒΔ2 η εναλλακτική)

Σύνθεση	ΒΔ1	ΒΔ2
Μον. μέτρησης	kg /m ³	kg /m ³
Τσιμέντο CEM I 42,5	370	370
Νερό	185	185
Ασβεστολιθικά αδρανή (8-16 mm)	542	-
Ασβεστολιθικά αδρανή (4-8 mm)	452	-
Ασβεστολιθικά αδρανή (0-4 mm)	813	829
Αδρανή σκωρίας (4-8 mm)	-	635
Αδρανή σκωρίας (8-16 mm)	-	612
Ίνες χάλυβα 30 mm	55	55
Ρευστοποιητής	1.85	2.96

Πίνακας 2. Συνθέσεις διαπερατών κυβολίθων (όπου ΔΚ1 η σύνθεση αναφοράς και ΔΚ2 η εναλλακτική)

Σύνθεση	ΔΚ1	ΔΚ2
Μον. μέτρησης	kg /m ³	kg /m ³
Τσιμέντο CEM I 42,5	300,75	300,75
Νερό	105,26	90,2
Ασβεστολιθικά αδρανή	392,54	-

(8-16 mm)		
Ασβεστολιθικά αδρανή (4-8 mm)	1177,61	-
Ασβεστολιθικά αδρανή (0-4 mm)	0	-
Αδρανή σκωρίας (5-12 mm)		1329
Αδρανή σκωρίας (0-5 mm)		332,31
Ρευστοποιητής	1,333	0,9

Πίνακας 3. Συνθέσεις βαρέως σκυροδέματος (όπου ΒΣ1 η σύνθεση αναφοράς και ΒΣ2 η εναλλακτική)

Σύνθεση	ΒΣ1	ΒΣ2
Μον. μέτρησης	kg /m ³	kg /m ³
Τσιμέντο CEM I 42,5	400	300
Νερό	160	120
Βαρύτης (χονδρόκοκκα)	1510	-
Βαρύτης (λεπτόκοκκα)	1236	-
Αδρανή σκωρίας (0-7 mm)	-	1245
Αδρανή σκωρίας (0-2 mm)	-	1245
Ίνες γάλυβα	-	118
Ρευστοποιητής	1,8	7,5

Πίνακας 4. Συνθέσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (όπου ΕΣ1 η σύνθεση αναφοράς και ΕΣ2 η εναλλακτική)

Σύνθεση	ΕΣ1	ΕΣ2
Μον. μέτρησης	kg /m ³	kg /m ³
CEM II 42,5	450	301,3
STABILAG*	-	135
Νερό	225	225
Ασβ. Άμμος (0-4 mm)	1610	1610

*Το STABILAG είναι η εμπορική ονομασία της σκωρίας κάδου

Πίνακας 5. Συνθέσεις επισκευαστικού κονιάματος (όπου ΕΚ1 η σύνθεση αναφοράς και ΕΚ2 η εναλλακτική)

Σύνθεση	ΕΚ1	ΕΚ2
Μον. μέτρησης	kg /m ³	kg /m ³
CEM I 42,5	450	360
Νερό	225	225
Άμμος ποταμού	1350	1350
STABILAG 75	-	90
Μετακαολίνης	-	72

Στο στάδιο αυτό, εκτός από τον σκοπό για τον οποίο γίνεται η μελέτη, καθορίζονται τα χρονικά και χωρικά όρια αυτής. Όσον αφορά τα χρονικά όρια, επιλέχθηκε η μορφή “cradle to gate” στην οποία περιλαμβάνονται τα στάδια από την λήψη των πρώτων υλών μέχρι και την παράδοση του τελικού προϊόντος. Αυτό έγινε καθώς πρόκειται για υποθετικές κατασκευές/προϊόντα για τα οποία δεν υπάρχουν στοιχεία για τα επόμενα στάδια του κύκλου ζωής τους (δηλαδή χρήση, απόθεση/ανακύκλωση). Όσον αφορά τα χωρικά όρια, όλες οι συνθέσεις/κατασκευές θεωρήθηκε πως παρήχθησαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του ΑΠΘ, ώστε να υπάρχει ένα κοινό σημείο

αναφοράς. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται στην πλειοψηφία τους από βιομηχανίες της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης. Με αυτόν τον τρόπο προωθείται η αξιοποίηση του δυναμικού και των πόρων κάθε περιοχής, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους μεταφορών και άρα του γενικότερου κόστους της εφαρμογής.

Απογραφική ανάλυση δεδομένων

Στο στάδιο αυτό γίνεται καταγραφή όλων των υλικών (τσιμέντο, αδρανή, πρόσμικτα) και εργασιών (μεταφορά, ανάμειξη, διάστρωση, συμπύκνωση) που αφορούν τις προς μελέτη εφαρμογές. Στη συνέχεια για κάθε ένα από αυτά τα υλικά θα γίνει επιπλέον ανάλυση και καταγραφή των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελείται μέχρι το επίπεδο των πρώτων υλών (φυσικοί πόροι). Μαζί με την καταγραφή των εισροών θα γίνει και αντίστοιχη καταγραφή των εκροών, στις οποίες περιλαμβάνονται τα παραγόμενα προϊόντα, κάποια παραπροϊόντα, καθώς και παραγόμενοι ρύποι, αλλά και δεδομένων όπως οι χρήσεις γης. Τα δεδομένα για την καταγραφή αυτή προέρχονται όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην πλειοψηφία τους από Ελληνικές επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στην παραγωγή δομικών υλικών αλλά και στον κατασκευαστικό κλάδο γενικότερα. Όπου δεν ήταν δυνατή η εύρεση στοιχείων, έγινε χρήση βιβλιογραφίας αλλά και των βιβλιοθηκών του λογισμικού Simapro.

Αποτίμηση επιπτώσεων

Για τη φάση της αποτίμησης των επιπτώσεων, τα παραπάνω δεδομένα συσχετίζονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια συντελεστών οι οποίοι πολλαπλασιάζονται με τα επιμέρους αποτελέσματα της προηγούμενης φάσης, κάνοντας αναγωγή αυτών σε μία συγκεκριμένη κάθε φορά περιβαλλοντική επίπτωση (π.χ. φαινόμενο του θερμοκηπίου, εξάντληση πόρων, τοξικότητα στο οικοσύστημα). Οι συντελεστές είναι ουσιαστικά τα ποσοστά με τα οποία συμβάλουν οι διάφορες ουσίες στην υπό εξέταση περιβαλλοντική επίπτωση, και εκδίδονται σε πίνακες από πιστοποιημένες επιτροπές και οργανισμούς, σαν πακέτα ή αλλιώς δείκτες (indicators). Ο δείκτης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη εκδόθηκε από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) με την ονομασία IPCC 2007 GWP, ο οποίος ανάγει τα διάφορα δεδομένα σε ισοδύναμες εκπομπές CO₂.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι το τελικό στάδιο της ΑΚΖ, στο οποίο γίνεται η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού προφίλ της μελετώμενης εφαρμογής, σύμφωνα με τον δείκτη που επιλέχθηκε για την ανάλυση. Συνήθης πρακτική, η οποία εφαρμόζεται και στην παρούσα εργασία, είναι να γίνεται σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ εναλλακτικών λύσεων, ώστε να υπάρχει κάποιο σημείο αναφοράς και επομένως τα αποτελέσματα να γίνουν πιο εύκολα κατανοητά και από κοινό μη εξοικειωμένο με τη μέθοδο. Παρ' ότι το στάδιο της ερμηνείας των αποτελεσμάτων αναφέρεται σαν τελευταίο, στην πραγματικότητα είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται συνεχώς, παράλληλα με τα υπόλοιπα, και λειτουργεί σαν μηχανισμός ελέγχου των επιμέρους αποτελεσμάτων κάθε σταδίου.

Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 6 φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του περιβαλλοντικού ίχνους για όλες τις εφαρμογές. Η μονάδα μέτρησης είναι τα kg ισοδύναμου CO₂ ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος. Για το βιομηχανικό δάπεδο και τους διαπερατούς κυβόλιθους η μονάδα αυτή είναι το m² διαστρωμένου δαπέδου, που σημαίνει ότι στα όρια του κύκλου ζωής έχουν περιληφθεί και οι φάσεις της διάστρωσης και (ενδεχομένως) συμπύκνωσης. Για τις υπόλοιπες 3 εφαρμογές η μονάδα του προϊόντος είναι το m³, άρα εδώ ο κύκλος ζωής που μελετάται σταματάει στη φάση της ανάμειξης. Στον Πίνακα 6 επίσης φαίνεται για κάθε εφαρμογή η κατανομή του τελικού περιβαλλοντικού ίχνους στα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής. Τα στάδια αυτά έχουν ομαδοποιηθεί σε 3 κατηγορίες:

Υλικά, όπου περιέχονται όλες οι πρώτες ύλες (κατανάλωση φυσικών πόρων) αλλά και δευτερογενή υλικά (προϊόντα) που χρησιμοποιήθηκαν,

Μεταφορές, όπου αποτυπώνεται το περιβαλλοντικό ίχνος διεργασιών όπως η κατανάλωση καυσίμου για μεταφορά υλικών, η φθορά των οχημάτων, οι χρήσεις γης από την ύπαρξη και χρήση των δρόμων μέσω των οποίων γίνονται οι μεταφορές, και τέλος

Παραγωγή/Κατασκευή, όπου περιέχονται διαδικασίες όπως η κατανάλωση ενέργειας για την ανάμιξη των υλικών για την παραγωγή των μιγμάτων, την παραγωγή των προϊόντων (όπως στην περίπτωση των κυβόλιθων) αλλά και τη διάστρωση/συμπύκνωση για την περίπτωση των δαπέδων.

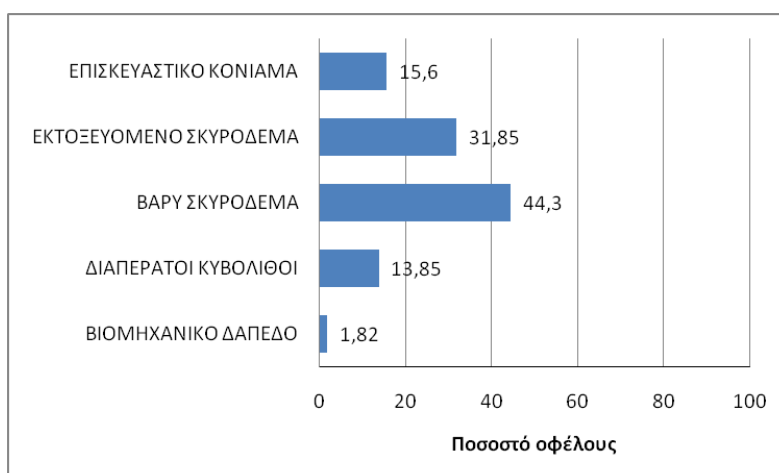
Τελικά στην τελευταία γραμμή του Πίνακα φαίνεται το ποσοστό του οφέλους του εναλλακτικού σεναρίου (εφαρμογή με προσθήκη σκωρίας) έναντι του σεναρίου αναφοράς.

Πίνακας 6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μελέτης για κάθε εφαρμογή και κάθε στάδιο του μελετώμενου κύκλου ζωής

	ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΔΑΠΕΔΟ		ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΚΥΒΟΛΙΘΟΙ		ΒΑΡΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ		ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ		ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΚΟΝΙΑΜΑ	
	ΒΔ1	ΒΔ2	ΔΚ1	ΔΚ2	ΒΣ1	ΒΣ2	ΕΣ1	ΕΣ2	ΕΠ1	ΕΠ2
Μονάδα μέτρησης	kg CO ₂ eq /m ²	kg CO ₂ eq /m ²	kg CO ₂ eq /m ²	kg CO ₂ eq /m ²	kg CO ₂ eq /m ³	kg CO ₂ eq /m ³	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	92,51	90,57	18,94	16,35	886,07	494,59	440,40	297,40	448,05	377,20
Μεταφορές	1,22	1,16	0,32	0,22	14,6	6,085	5,36	5,37	4,62	4,47
Παραγωγή/Κατασκευή	16,27	16,27	0,25	0,23	2,33	2,33	3,24	3,24	2,33	2,33
Σύνολο	110,00	108,00	19,50	16,80	903,00	503,00	449,00	306,00	455,00	384,00
Συνολικό όφελος (%)	1,82		13,85		44,30		31,85		15,60	

Συμπεράσματα

Στο Σχήμα 1 φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του προηγούμενου Πίνακα 6, δηλαδή το ποσοστό του οφέλους των εναλλακτικών σεναρίων έναντι των σεναρίων αναφοράς.

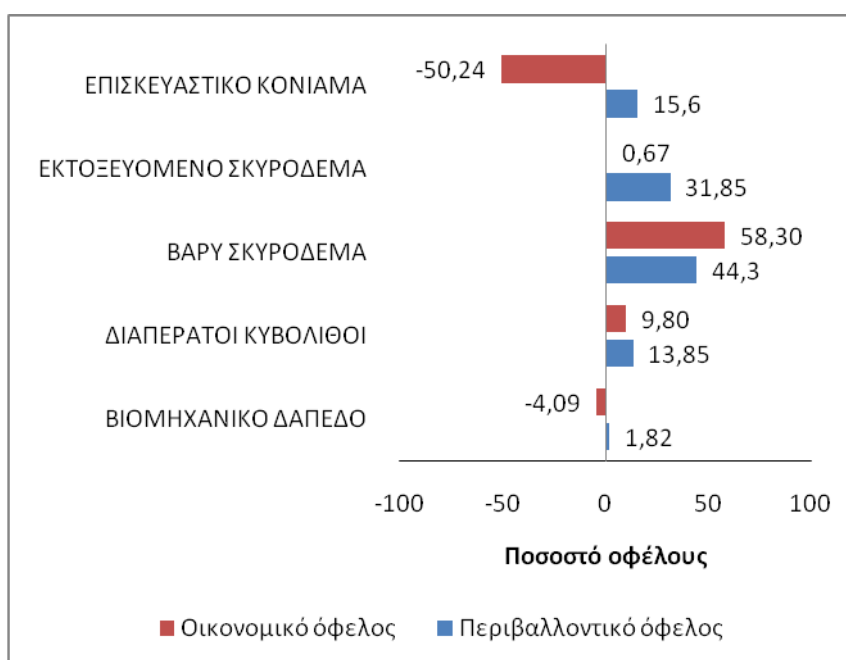


Σχ. 1 Συνολικό όφελος κάθε εφαρμογής σαν ποσοστό του εναλλακτικού σεναρίου επί του σεναρίου αναφοράς

Από τα αποτελέσματα γίνεται κατανοητό ότι η χρήση των συγκεκριμένων παραπροϊόντων αποδίδει όφελος σε όλες τις εφαρμογές. Το μεγαλύτερο όφελος βρίσκεται στην παραγωγή βαρέως σκυροδέματος. Εν μέρει αυτό οφείλεται στην αντικατάσταση του βαρύτη με αδρανή σκωρίας. Ο βαρύτης επιλέχθηκε καθώς αποτελεί συνήθη εναλλακτική για παραγωγή βαρέως σκυροδέματος,

αντίστοιχου ειδικού βάρους με αυτό του σκυροδέματος με σκωρία ($>3 \text{ tn/m}^3$), παρ' όλα αυτά είναι περιορισμένη η διαθεσιμότητά του στη χώρα και πρέπει να μεταφερθεί με φορτηγό πλοίο, εξ' ου και το αυξημένο περιβαλλοντικό ίχνος (τόσο στη μεταφορά, όσο και στην κατανάλωση πολύτιμων φυσικών πόρων).

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η έννοια της βιώσιμης και αειφόρου ανάπτυξης δεν περιλαμβάνει μόνο τον τομέα του περιβάλλοντος, αλλά και τους τομείς της οικονομικής και κοινωνικής ευημερίας. Δεν μπορούμε να μιλάμε για μια κατασκευαστική λύση η οποία είναι φιλική προς το περιβάλλον αλλά μη εφαρμόσιμη για λόγους κόστους. Επομένως είναι εύλογο η παραπάνω περιβαλλοντική αξιολόγηση των εφαρμογών να συνοδεύεται και από μια οικονομική αξιολόγησή τους σε σχέση με τις εφαρμογές αναφοράς, έτσι ώστε τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε να είναι πιο ολοκληρωμένα. Το Σχήμα 2 είναι μια επέκταση του Σχήματος 1, καθώς περιλαμβάνει μαζί με τα περιβαλλοντικά και κάποια στοιχεία κόστους για τις μελετώμενες εφαρμογές. Τα δεδομένα κόστους των δομικών υλικών και προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ληφθεί από τις αντίστοιχες βιομηχανίες παραγωγής τους και αφορούν την ελληνική αγορά κατά το δεύτερο εξάμηνο του 2014 και το πρώτο εξάμηνο του 2015. Τα κόστη των εργασιών έχουν ληφθεί και αυτά από αντίστοιχες ελληνικές κατασκευαστικές εταιρίες.



Σχ. 2 Συνολικό περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος κάθε εφαρμογής σαν ποσοστό του εναλλακτικού σεναρίου επί του σεναρίου αναφοράς

Όπως φαίνεται στο σχήμα, για κάποιες εφαρμογές (βαρύ και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, διαπερατοί κυβόλιθοι) εκτός από το περιβαλλοντικό υπάρχει και οικονομικό όφελος, ενώ στις άλλες (βιομηχανικό δάπεδο, επισκευαστικό κονίαμα) το περιβαλλοντικό όφελος δεν συνοδεύεται και από μείωση του κόστους. Σε αυτή την περίπτωση επαφίεται στον μελετητή να λάβει υπ' όψιν όλα τα δεδομένα και ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση να πάρει την κατάλληλη απόφαση σε σχέση με την λύση που θα εφαρμόσει.

Βιβλιογραφία

- Curran, M. A. (1996). Environmental life-cycle assessment. New York: McGraw-Hill.
Flower, David J. M., & Sanjayan, Jay G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. Springer.
Guinee, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards.

Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17, 7, 668-675.

ISO 14040:2006. Environmental management ? life cycle assessment ? principles and framework. CEN (European Committee for Standardisation), Brussels.

ISO 14044:2006. Environmental management ? life cycle assessment ? requirements and guidelines. CEN (European Committee for Standardisation), Brussels.

Malhotra, V. M. (2010). 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*, 1, 2, 116-130.

Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V., & Varun, . (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1, 871-875.

Zabalza, B. I., Valero, C. A., & Aranda, U. A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46, 5, 1133-1140.