

Βιώσιμη Διαχείριση Κατασκευών με Μειωμένο Κόστος

Sustainable Construction Management with Reduced Costs

Κοσμάς ΣΙΑΔΕΡΗΣ¹, Δημήτριος ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ², Μαργαρίτα ΜΠΕΛΛΑΛΗ³, Ιάσων ΤΖΑΝΑΚΑΚΗΣ⁴, Αλέξανδρος ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ⁵, Χρήστος ΤΑΣΣΟΣ⁶

Λέξεις Κλειδιά: Διαχείριση Κατασκευών, Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, Σκωρία κάδου, Πρόγραμμα Επισκευών

Keywords: Construction Management, Self-Compacting Concrete, Ladle Furnace Slag, Repair Schedule

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα στρατηγικό πλάνο διαχείρισης μίας κατασκευής με διάρκεια ζωής 100 ετών με στόχο την οικονομία και τις μειωμένες εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂). Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν εργαστηριακά διαφορετικές συνθέσεις σκυροδεμάτων προσθέτοντας βιομηχανικά παραπροϊόντα. Παράλληλα, σχεδιάστηκαν διαφορετικά σενάρια επισκευών και προστασίας της κατασκευής βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων και χρήσης λογισμικού (Life 365). Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι εκπεμπόμενες ποσότητες CO₂ και το κόστος για τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν καθώς και για τις προτεινόμενες μεθόδους επισκευών. Εξετάζοντας τις παραπάνω επιλογές σε όρους οικονομίας και οικολογίας επιλέχθηκε ο αποτελεσματικότερος συνδυασμός σύνθεσης σκυροδέματος και μεθόδου συντήρησης/επισκευής της κατασκευής.

¹Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: kksider@civil.duth.gr

²Φοιτητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: d.anagnostopoulos94@gmail.com

³Πολιτικός Μηχανικός Τ.Ε., email: belalimargarita@gmail.com

⁴Φοιτητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: iasontzan@hotmail.com

⁵Διδάκτωρας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: achatzip@civil.duth.gr

⁶Διδάκτωρας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: ctassos@civil.duth.gr

ABSTRACT: This paper proposes a strategic plan of a 100-year-long construction that aims to reduced costs and Carbon Dioxide (CO₂) emissions. In particular, different concrete compositions have been developed in laboratory by adding industrial by-products. At the same time, different repair and protection scenarios were designed based on experimental results and software use (Life 365). Subsequently, the CO₂ emissions and costs for the produced concrete and the proposed repair methods were calculated. Examining the above options in terms of economy and ecology, the most efficient combination of concrete composition and method of maintenance / repair of the construction was chosen.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανία του τσιμέντου αποτελεί έναν από τους βασικότερους ρυπαντές της ατμόσφαιρας εκπέμποντας σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα CO₂, εντείνοντας έτσι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) δεν σταματούν μετά την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος (Γιοβανοπούλου I., 2016). Η φθορά μιας κατασκευής είναι αναπόφευκτη. Συνεπώς, απαιτούνται επισκευές καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της (Σισμάνης Β., 2016). Επομένως, είναι επιτακτική η ανάγκη εξέλιξης της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού και των Υλικών με στόχο την ανάπτυξη εναλλακτικών σκυροδεμάτων και αποτελεσματικών μεθόδων προστασίας και επισκευής των κατασκευών. Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μία ορθολογικότερη και βιωσιμότερη διαχείρισή τους.

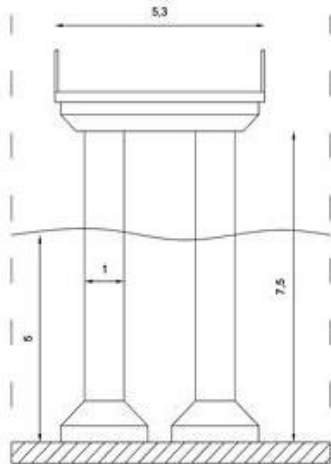
ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Με σκοπό την ανάπτυξη και την βιώσιμη διαχείριση μιας κατασκευής με μειωμένο κόστος και οικολογική προσέγγιση, επιλέχθηκε ως μελέτη περίπτωσης μια γέφυρα πεζών που εκτίθεται σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον. Στην προκειμένη περίπτωση, προτείνεται μια σύνθεση σκυροδέματος βασισμένη σε βιομηχανικά παραπροϊόντα σε συνδυασμό με ένα αποτελεσματικό και οικολογικό πρόγραμμα επισκευών. Εξετάστηκε η περίπτωση ΑΣΣ ενός ειδικού σκυροδέματος που είναι γνωστό για την αυξημένη ανθεκτικότητά του και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σκυροδέτησης επί τόπου του έργου (Sideris K.K., 2009). Για την Παρασκευή των εναλλακτικών μειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν αδρανή σκωρίας κάδου, ενός βιομηχανικού παραπροϊόντος που συμβάλλει την επίτευξη υψηλών αντοχών και βελτιώνει τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας των μειγμάτων (Papayianni I., Anastasiou E., 2010). Η υπό μελέτη γέφυρα παρουσιάζεται σχεδιαστικά στο **Σχήμα 1** και **Σχήμα 2**.

Στοιχεία Γέφυρας

- Γέφυρα πεζών που διασχίζει κανάλι πλάτους 20 μέτρων
- Υποστηρίζεται από 6 πυλώνες (3 ζεύγη)

- Ο κάθε πυλώνας έχει τις εξής διαστάσεις: Ύψος: 7,5m και Διάμετρος: 1m



Σχήμα 1. Τομή Γέφυρας



Σχήμα 2. Τρισδιάστατη Απεικόνιση της Γέφυρας

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης όσον αφορά το σκυρόδεμα της Μελέτης Περίπτωσής, παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών (Πολυτεχνική Σχολή Εάθνης, Δ.Π.Θ) διαφορετικές συνθέσεις Αυτοσυμπυκνούμενων Σκυροδεμάτων (ΑΣΣ) με διαφοροποίηση στα χρησιμοποιούμενα υλικά και στην ποσότητά τους. Τα μείγματα επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EN 206-1 για τις κατηγορίες έκθεσης XS3 και XC4. Ο σχεδιασμός και ο έλεγχος των νωπών ιδιοτήτων των παρασκευασθέντων ΑΣΣ έγινε με βάση τις απαιτήσεις του (EFNARC, 2005). Ανάλογα με τα υλικά που προστέθηκαν στα μείγματα, διαφέρουν και οι υπολογιζόμενες εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα CO₂.

Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των σκυροδεμάτων είναι τα εξής:

- Τσιμέντο CEM II / A-M (P-LL) 42.5
- Γαρμπίλι Φυσικό 2-16mm
- Γαρμπίλι Σκωρίας Κάδου (LF Slag) 2-16mm
- Άμμος 0-4mm
- Filler 0-0.150mm
- Filler Σκωρίας Κάδου (LF Slag) 0-0.095mm

- Νερό Βρύσης

Διαδικασία Παρασκευής των Σκυροδεμάτων

Παρασκευάστηκαν συνολικά τρία (3) διαφορετικά ως προς της σύνθεσή τους σκυροδέματα ποσότητας 60lt το καθένα ενώ ελήφθησαν:

- 10 Κυβικά Δοκίμια 15x15cm για τον έλεγχο των αντοχών
- 1 Κυλινδρικό Δοκίμιο Ø10 x 20cm για το πείραμα της Διείσδυσης Χλωριόντων
- 6 Κυλινδρικά Δοκίμια για τη Μέτρηση του Βάθους Ενανθράκωσης

Μελέτες Σύνθεσης Σκυροδεμάτων

Παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο τα ακόλουθα τρία (3) διαφορετικά Αυτοσυμπκνούμενα Σκυροδέματα:

- Σκυρόδεμα Αναφοράς (Ref. Con.)
- Ανακυκλωμένο Σκυρόδεμα με χρήση Σκωρίας σαν πρόσθετη ποσότητα (RA1)
- Ανακυκλωμένο Σκυρόδεμα με χρήση Σκωρίας αντικαθιστώντας ποσότητα τσιμέντου (RA2)

Στον **Πίνακα 1**, παρουσιάζονται οι συνθέσεις των σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν.

Πίνακας 1. Μελέτες Σύνθεσης Σκυροδεμάτων για 1m³

Υλικά	Ref. Con. (kg)	RA1 (kg)	RA2 (kg)
Τσιμέντο II/42.5	370	370	333
Νερό	170.17	170.17	153.18
Γαρμπίλι Φυσικό	800	400	400
Γαρμπίλι Σκωρίας	-	483	483
Άμμος	901.33	851.67	902.83
Filler	50	-	-
Filler Σκωρίας	-	92.50	83.33
Ρευστοποιητής	6.39	7.10	6.70
Επιβραδυντής	0.56	0.56	0.56
Λόγος w/c	0.46	0.46	0.46

Εκπεμπόμενο Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂) ανά Σκυρόδεμα

Με βάση τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και τη ποσότητά τους, υπολογίστηκε όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2**, το συνολικό εκπεμπόμενο Διοξείδιο του Άνθρακα για κάθε σκυρόδεμα που παρασκευάστηκε.

Πίνακας 2. Εκπεμπόμενο CO₂ ανά Σκυρόδεμα (kg CO₂/m³) για 1m³

Υλικά	CO ₂ ανά 1 kg Υλικού (kg)	Ref. Con. (kg)	RA1 (kg)	RA2 (kg)
Τσιμέντο Π/42.5	0.75	277.5	277.5	249.75
Γαρμπίλι Φυσικό	0.005	4	2	2
Γαρμπίλι Σκωρίας	0.00175	-	0.85	0.85
Άμμος	0.005	4.5	4.3	4.5
Filler	0.005	0.25	-	0
Filler Σκωρίας	0.00175	-	0.16	0.15
Σύνολο (kg CO ₂ /m ³)		286.3	284.8	257.3

Κόστος Παραγωγής ανά Σκυρόδεμα

Γνωρίζοντας το κόστος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, υπολογίστηκε όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3**, το συνολικό κόστος € των σκυροδεμάτων.

Πίνακας 3. Κόστος Παρασκευής Σκυροδεμάτων για 1m³

Υλικά	Τιμή ανά 1 kg Υλικού (€)	Ref. Con. (€)	RA1 (€)	RA2 (€)
Τσιμέντο Π/42.5	0.103	38.11	38.11	34.30
Γαρμπίλι Φυσικό	0.025	20	10	10
Γαρμπίλι Σκωρίας	0.009	-	4.35	4.35
Άμμος	0.012	10.80	10.2	10.8
Filler	0.04	2	-	-
Filler Σκωρίας	0.04	-	3.7	3.3
Σύνολο (€/m ³)		70.90	66.40	62.80

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την αξιολόγηση των σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν, εκτελέστηκαν μετρήσεις Αντοχής και Ανθεκτικότητας. Σκοπός, να βρεθεί το οικονομικότερο σκυρόδεμα με κριτήρια α) το εκπεμπόμενο Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂) κατά την παρασκευή του και β) τον ωφέλιμο χρόνο ζωής με βάση την ανθεκτικότητά του.

Μέτρηση Θλιπτικής Αντοχής

Μετρήθηκαν οι Θλιπτικές Αντοχές για τα τρία (3) σκυροδέματα (Ref. Con, RA1, RA2) σε ηλικίες 2, 7, 28 ημερών όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4**.

Πίνακας 4. Αντοχές 2, 7, 28 ημερών

Ηλικία (ημέρες)	Ref. Con. (MPa)	RA1 (MPa)	RA2 (MPa)
2	33.0	31.4	29.9
7	44.3	59.5	54.0
28	54.1	66.9	64.9

Υπολογισμός Συντελεστή Διάχυσης Χλωριόντων

Οι μετρήσεις διαπερατότητας χλωριόντων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο NT Build 492 σε κυλινδρικούς δίσκους πάχους 5cm και διαμέτρου Ø10. Οι μετρήσεις έγιναν μετά την συμπλήρωση της ηλικίας των 28 ημερών. Στο **Πίνακα 5** παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων Dnssm υπολογισμένος κατά NT Build 492 (NT Build, 1999).

Πίνακας 5. Συντελεστής Dnssm (m²/sec) x (10⁻¹²)

Ref. Con.	RA1	RA2
10.77	8.79	10.14

Μέτρηση Βάθους Ενανθράκωσης

Η μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικές περιόδους έκθεσης (28, 56, 310 μέρες) σε δοκίμια που συντηρήθηκαν με δύο διαφορετικούς τρόπους δηλαδή α) έκθεση σε θάλαμο ενανθράκωσης και β) έκθεση στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Πιο συγκεκριμένα:

α) Για τον 1^ο τρόπο έκθεσης, 3 δοκίμια από κάθε σκυρόδεμα συντηρήθηκαν για 25 ημέρες εντός του χώρου του εργαστηρίου και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ενανθράκωσης. Με τη συμπλήρωση 28 και 56 ημερών στο θάλαμο, μετρήθηκε το βάθος ενανθράκωσης για 1 και 2 δοκίμια αντίστοιχα.

β) Για τον 2^ο τρόπο έκθεσης, ένα δοκίμιο από κάθε σκυρόδεμα συντηρήθηκε για 310 μέρες σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος και μετρήθηκε το βάθος ενανθράκωσης τους.

Σε κάθε περίπτωση ο προσδιορισμός του βάθους ενανθράκωσης έγινε σύμφωνα με το (EN 14630, 2006).

Στον **Πίνακα 6** διακρίνονται τα βάθη ενανθράκωσης για κάθε σκυρόδεμα.

Πίνακας 6. Βάθη Ενανθράκωσης (mm)

Ηλικία (ημέρες)	Ref. Con. (mm)	RA1 (mm)	RA2 (mm)
--------------------	-------------------	-------------	-------------

28	1.8	0.5	0.8
56	2.2	0.9	1.1
310	1.2	0.3	0.7

Είναι φανερό με βάση τις μετρήσεις του βάθους ενανθράκωσης, πως η χρήση σκωρίας μειώνει αποτελεσματικά τη διαπερατότητα των σκυροδεμάτων με αποτέλεσμα τη μικρότερη διείσδυση του CO₂.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΣΚΕΥΩΝ

Όταν η ηλικία της κατασκευής ξεπεράσει την υπολογισμένη διάρκεια ζωής, ξεκινά η διάβρωση του οπλισμού και συνεπώς απαιτούνται επισκευές. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται δύο διαφορετικές μέθοδοι επισκευής και συντήρησης της γέφυρας. Οι δύο αυτές μέθοδοι εξετάστηκαν ως προς δύο βασικά κριτήρια: το κόστος και τους ρύπους Διοξειδίου του Άνθρακα CO₂ που εκλύονται κατά την εφαρμογή τους.

Σενάριο Επισκευών 1 – Συμβατική Μέθοδος Επισκευής

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί επισκευή μεγάλης έκτασης (Patch – Repair), στο 25% της επιφάνειας του σκυροδέματος και χρήση υδροφοβικού εμποτισμού σε όλη την επιφάνεια του σκυροδέματος. Κατά την μέθοδο αυτή, αποκαλύπτεται ο οπλισμός με αμμοβολή και απομάκρυνση όλων των διαβρωμένων – σαθρών τμημάτων υλικού ώστε να παραμείνει ένα υγιές υπόστρωμα σκυροδέματος. Στη συνέχεια διαβρέχεται η επιφάνεια και πραγματοποιείται επάλειψη γέφυρας πρόσφυσης (αστάρι) και αντιδιαβρωτικής προστασίας. Έπειτα, εφαρμόζεται επισκευαστικό κονίαμα και τέλος γίνεται χρήση υδροφοβικού εμποτισμού. Εκτιμάται ότι ο χρόνος υλοποίησης της παραπάνω διαδικασίας είναι 11 ημέρες. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η παραπάνω μέθοδος επισκευής να επαναλαμβάνεται κάθε 20 χρόνια, μετά την πρώτη απαίτηση για επισκευή.

Το κόστος των υλικών της επισκευής καθώς και οι ρύποι CO₂ που εκλύονται κατά την εφαρμογή της (Γιοβανοπούλου Ι., 2016) παρουσιάζονται στους **Πίνακες 7** και **8** αντίστοιχα.

Πίνακας 7. Κόστος Υλικών Επισκευής

Υλικά	Κόστος (€/m ²)
Αστάρι	25.00
Κονίαμα	70.82
Επιφανειακή Προστασία	8.64
Υδροφοβικός Εμποτισμός	6.00

Πίνακας 8. Εκπεμπόμενο Διοξείδιο του Άνθρακα

Τύπος Επισκευής	CO ₂ (kg/m ²)
Patch Repair	122
Υδροφοβικός Εμποτισμός	2.6

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 7**, το κόστος επισκευής του συνόλου της γέφυρας κάθε φορά που εκτελείται η παραπάνω μέθοδος, προκύπτει:

$$(Κόστος patch repair) * E_{σκυρtot} * 25\% + (Κόστος υδρ. εμπ.) * E_{σκυρtot} \quad (1)$$
$$\Rightarrow 105 * 141 * 0.25 + 6 * 141 = 4548.00 \text{ €/επισκευή}$$

Με ανάλογο τρόπο, σύμφωνα με τον **Πίνακα 8**, προκύπτουν οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά την εφαρμογή των επισκευών:

$$ECO_{2_{patch-repair}} = kgCO_2 * E_{σκυρtot} * 25\% \quad (2)$$
$$\Rightarrow 122 * 141 * 0.2 = 4.30 \text{ tnCO}_2$$

$$ECO_{2_{υδρ}} = kgCO_2 * E_{σκυρtot} = 2.60 * 141 = 0.37 \text{ tnCO}_2 \quad (3)$$

$$ECO_{2_{tot}} = 4.3 + 0.37 = 4.67 \text{ tnCO}_2/\text{επισκευή} \quad (4)$$

Σενάριο Επισκευών 2 – Αειφόρος και Ανθεκτική Μέθοδος Επισκευής

Η εναλλακτική αυτή μέθοδος επισκευής είναι προληπτική και πραγματοποιείται με απλή επάλειψη υδροφοβικού εμποτισμού πριν την έναρξη της διάβρωσης. Ο υδροφοβικός εμποτισμός εφαρμόζεται πριν την εμφάνιση ρωγμών στο σκυρόδεμα επομένως δεν απαιτούνται μελλοντικές επισκευές με επισκευαστικά κονιάματα. Εκτιμάται ότι ο χρόνος υλοποίησης της παραπάνω επισκευής είναι περίπου 4 ημέρες.

Σημειώνεται ότι, ο χρόνος που συνιστά ο κατασκευαστής να επαναλαμβάνεται η εφαρμογή του υδροφοβικού εμποτισμού ώστε να παραμένει αποτελεσματικός, είναι 15 χρόνια.

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 7** και **8**, το κόστος εφαρμογής του υδροφοβικού εμποτισμού είναι 6.00 €/m² ενώ οι εκπομπές CO₂ είναι 2.60 kg CO₂/m², αντίστοιχα. Συνεπώς, το κόστος εφαρμογής του υδροφοβικού εμποτισμού στο σύνολο της γέφυρας προκύπτει 846 €. Αντίστοιχα, οι συνολικές εκπομπές CO₂ προκύπτουν 0.37 tn CO₂ / επισκευή.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με την εκτέλεση πειραμάτων σχετικών με την ανθεκτικότητα για τα σκυροδέματα (Ref. Con., RA1, RA2) υπολογίστηκε ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_{nssm} κατά NT Build ο οποίος εισήχθη στο λογισμικό «LIFE 365». Για κάθε σενάριο επισκευής υπολογίστηκε η διάρκεια ζωής της κατασκευής, συνεπώς και ο αριθμός απαιτούμενων επισκευών σε διάρκεια 100 ετών. Στη συνέχεια, έγινε υπολογισμός του συνολικού κόστους και των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για την παρασκευή των σκυροδεμάτων αλλά και των απαιτούμενων επισκευών.

Υπολογισμός Διάρκειας Ζωής Κατασκευής

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε ένα από τα κυκλικά υποστυλώματα της γέφυρας με διάμετρο $D=100$ cm, ύψος $H=7$ m και επικάλυψη $c=5$ cm. Αρχικά, έγινε εισαγωγή των διαστάσεων και της επικάλυψης του υπό μελέτη υποστυλώματος και στη συνέχεια εισήχθησαν οι τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας της περιοχής μελέτης (Ξάνθη). Έπειτα, προστέθηκαν στο πρόγραμμα τα τρία σκυροδέματα (Ref. Con., RA1, RA2), οι τιμές του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων (D_{nssm}) και του δείκτη διάχυσης m για κάθε μείγμα. Η απαιτούμενη συγκέντρωση χλωριόντων ικανή να ξεκινήσει τη διάβρωση του χάλυβα θεωρήθηκε ίση με $C_t=4.70$ kg/m³. Η περίοδος μεταξύ της αρχικής διάβρωσης και της στιγμής που το στοιχείο χρειάζεται επισκευή θεωρήθηκε ίση με 6 έτη.

Η εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων αλλά και τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής της κατασκευής από το πρόγραμμα «LIFE 365» παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9**.

Πίνακας 9. Διάρκεια Ζωής Κατασκευής (Service Life)

Μείγμα	D_{nssm} (m ² /sec) (x10 ⁻²)	m	C_t (kg/m ³)	Init. (yrs)	Prop. (yrs)	Service Life (yrs)
Ref. Con.	10.77	0.50	4.70	33.2	6	39.2
RA1	8.7932	0.56	4.70	54.6	6	60.6
RA2	10.137	0.56	4.70	47.4	6	53.4

Υπολογισμός Απαιτούμενων Επισκευών

Δεδομένου ότι στο Σενάριο Επισκευών 1 η επισκευή επαναλαμβάνεται κάθε 20 έτη, ο συνολικός αριθμός απαιτούμενων επισκευών για κάθε μείγμα παρουσιάζεται στον **Πίνακα 10**.

Σύμφωνα με το Σενάριο Επισκευών 2 η εφαρμογή της προστασίας (Υδροφοβικός Εμποτισμός) επαναλαμβάνεται κάθε 15 χρόνια με τη πρώτη εφαρμογή να πραγματοποιείται αμέσως μετά την κατασκευή του έργου. Συνεπώς, σε αυτό το

σενάριο, η προληπτική προστασία θα επαναληφθεί συνολικά 7 φορές στη διάρκεια των 100 ετών.

Πίνακας 10. Αριθμός Απαιτούμενων Επισκευών για κάθε Σενάριο

Μείγμα	Σενάριο Επισκευών 1	Σενάριο Επισκευών 2
Ref. Con.	3	7
RA1	2	7
RA2	3	7

Υπολογισμός Συνολικών Εκπομπών Διοξειδίου του Άνθρακα και Συνολικού Κόστους

Οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε διάρκεια 100 ετών προκύπτουν από το άθροισμα των εκπομπών κατά την παραγωγή του κάθε μείγματος και των εκπομπών που δημιουργούνται από το σύνολο των απαιτούμενων επισκευών.

Το συνολικό κόστος της υπό μελέτη κατασκευής σε διάρκεια 100 ετών προκύπτει από το άθροισμα του κόστους παραγωγής του κάθε μείγματος και του κόστους του συνόλου των απαιτούμενων επισκευών.

Οι τιμές εκπομπών και κόστους που προκύπτουν σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζονται στους **Πίνακες 11** και **12** αντίστοιχα.

Πίνακας 11. Συνολικές Εκπομπές CO₂ -Συνολικό Κόστος - Σενάριο Επισκευών 1

Μείγμα	Εκπομπές CO ₂ (tn)			Κόστος (€)		
	Παρασκευή	Σενάριο Επισκευών 1	Συνολικές Εκπομπές	Παρασκευή	Σενάριο Επισκευών 1	Συνολικό Κόστος
Ref. Con.	10.1	14.0	24.1	2505	13644	16149
RA1	10.1	9.3	19.4	2346	9096	11442
RA2	9.1	14.0	23.1	2219	13644	15863

Πίνακας 12. Συνολικές Εκπομπές CO₂ -Συνολικό Κόστος - Σενάριο Επισκευών 2

Μείγμα	Εκπομπές CO ₂ (tn)			Κόστος (€)		
	Παρασκευή	Σενάριο Επισκευών 2	Συνολικές Εκπομπές	Παρασκευή	Σενάριο Επισκευών 2	Συνολικό Κόστος
Ref. Con.	10.1	2.6	12.7	2505	5922	8424
RA1	10.1	2.6	12.7	2346	5922	8268
RA2	9.1	2.6	11.7	2219	5922	8141

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκρίνοντας τις συνολικές εκπομπές CO₂ και το συνολικό κόστος των μειγμάτων για την παρασκευή τους καθώς και ανά σενάριο επισκευών, παρατηρούμε πως η χρήση του μείγματος RA2 σε συνδυασμό με το Σενάριο Επισκευής 2 (εφαρμογή προληπτικής επισκευής με απλή επάλειψη υδροφοβικού εμποτισμού κάθε 15 χρόνια) εμφανίζει τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και το συνολικό κόστος.

Αναφορικά με τη σύνθεση του σκυροδέματος συμπεραίνουμε πως η χρήση σκωρίας κάδου αντισταθμίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τη μείωση του τσιμέντου τόσο σε θέματα αντοχών, όσο και ανθεκτικότητας. Πιο συγκεκριμένα, το RA1 αλλά και το RA2 με μειωμένο τσιμέντο παρουσιάζουν υψηλότερες αντοχές σε σχέση με το Con. Ref. Επιπλέον, ο συντελεστής διείδυσης χλωριόντων, λόγω της μείωσης του τσιμέντου, εμφανίζεται αυξημένος σε σχέση με το μείγμα RA1, αλλά παραμένει σε επίπεδο που δεν επηρεάζει σημαντικά της διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Στο κομμάτι των επισκευών, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η χρήση υδροφοβικού εμποτισμού ανά 15 χρόνια, να μην απαιτεί περισσότερες εφαρμογές σε διάρκεια 100 ετών από το Σενάριο Επισκευής 1, αλλά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το συνολικό κόστος εμφανίζονται αισθητά μειωμένα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, ότι η συγκεκριμένη μέθοδος επισκευής είναι δυνατόν να υλοποιηθεί σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι προσφορά των εταιριών ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ και Sika Hellas ΑΕΒΕ. Εκφράζονται ευχαριστίες για την υποστήριξη της συγκεκριμένης έρευνας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Papayianni, I., Anastasiou, E., "Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products", Construction & Building Materials", Vol.24, No.8, pp1412-1417 (2010)

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια (δημοσιευμένα σε πρακτικά)

Sideris K.K., “Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα στην ελληνική πραγματικότητα: Παρούσα κατάσταση και προοπτικές εξέλιξης.”, στα Πρακτικά του 16ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, (Πάφος Κύπρος Οκτώβριος 21-23,2009)

Διδακτορικές διατριβές και διπλωματικές / μεταπτυχιακές εργασίες

Γιοβανοπούλου, Ι., «Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα Σκυροδέματος», Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη (2016)

Σισμάνης, Β., «Η Επίδραση του Περιβάλλοντος και των Συνθηκών Έκθεσης στις Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος Κατηγορίας Αντοχής C25/30», Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη (2016)

Πρότυπα (standards)

Comite Européenne de Normalisation Concrete - Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity, EN 206-1 (2000)

EFNARC European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. downloadable from www.efnarc.org (2005)

EN 14630 Comité Européenne de Normalisation Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods —Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. (2006)

NT Built 492 Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady Migration Experiments, NT Build (1999)