

**Παραγωγή και εργαστηριακός έλεγχος δομικών
στοιχείων με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών υλικών
από απόβλητα εκσκαφών - κατεδαφίσεων -
κατασκευών (ΑΕΚΚ)**

Production and testing of structural elements using recycled
aggregates from construction and demolition waste (CDW)

**Μιχαήλ ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ¹, Αθανασία ΣΟΥΛΤΑΝΑ², Χριστίνα ΠΙΠΕΡΙΔΗ³,
Ανθή ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ⁴, Γεώργιος ΑΛΕΒΙΖΟΣ⁵**

Λέξεις Κλειδιά: ανακυκλωμένα αδρανή, δομικά στοιχεία, δοκιμές ανθεκτικότητας
Key words: recycled aggregates, structural elements, durability tests

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Τα απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) εκτιμάται ότι αποτελούν το 25% της συνολικής ποσότητας των στερεών αποβλήτων που παράγονται σήμερα. Περίπου το 75% οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων παρόλο που τα περισσότερα από αυτά είναι ανακυκλώσιμα υλικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες στον κατασκευαστικό τομέα. Στην παρούσα εργασία διερευνάται σε εργαστηριακή κλίμακα η δυνατότητα χρήσης των ΑΕΚΚ για παραγωγή δομικών στοιχείων με βασική συνδετική κονία το τσιμέντο. Ως διαδικασίες παραγωγής των δοκιμίων επιλέχθηκαν η ανάμιξη των υλικών και η χύτευση σε μήτρες, λόγω της απλότητας και της μικρής απαίτησης σε ενέργεια και πρόσθετο εξοπλισμό. Μετά την παραγωγή και την ωρίμανση των δοκιμίων, έγινε έλεγχος (κατά EN) της αντοχής των σκληρυμένων δοκιμίων σε κάμψη και μονοαξονική θλίψη και μετρήθηκε η πυκνότητα και η υδαταπορρόφησή τους. Επιπλέον, προσδιορίστηκε η

¹Καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, email: galetaki@mred.tuc.gr

²Υποψήφια διδάκτωρ, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, email: athanasiasoultana@gmail.com

³Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, email: piperidi@windowslive.com

⁴Υποψήφια διδάκτωρ, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, email: avasil@mred.tuc.gr

⁵Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, email: alevizos@mred.tuc.gr

ανθεκτικότητα των δοκιμίων σε κύκλους ψύξης - απόψυξης, σε θερμικό πλήγμα και σε προσβολή με θειικό μαγνήσιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλες οι συνθέσεις που διερευνήθηκαν πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις για απλά φέροντα δομικά στοιχεία τύπου «τεχνητού λίθου».

ABSTRACT : Excavation, construction and demolition waste (CDW) represent 25% of the total amount of solid waste. Approximately 75% of produced CDW is landfilled, although most of them can be used as raw materials in the construction sector. This paper investigates in laboratory scale the possibility to produce building elements using recycled aggregates from CDW and cement as binder. Mixing of the materials and casting into molds, were chosen as production procedures due to their simplicity, low energy consumption and additional equipment requirements. After the production and curing processes, specimens were tested (according to EN) for their strength in bending and uniaxial compression, while specific gravity, water absorption, resistance to freeze-thaw cycles, thermal shock and magnesium sulfate attack were also measured. Results indicated that all studied compositions meet the minimum requirements for simple load-bearing structural elements such as "artificial stone".

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα απόβλητα από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ) περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα υλικών, κυρίως αδρανών, όπως είναι το σκυρόδεμα, τα τούβλα και τα πλακάκια. Αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα σε όγκο ρεύματα αποβλήτων και η ανεξέλεγκτη διάθεσή τους προκαλεί αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ο ετήσιος όγκος των ΑΕΚΚ υπερβαίνει τους 450 εκ. τόνους ετησίως. Τα απόβλητα από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις εκτιμάται ότι αποτελούν το 25% της συνολικής ποσότητας των στερεών αποβλήτων. Περίπου το 75% οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), παρόλο που τα περισσότερα από αυτά είναι ανακυκλώσιμα υλικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες στον κατασκευαστικό τομέα. Στην Ελλάδα η παραγωγή ΑΕΚΚ ανέρχεται σε περισσότερους από 4 εκ. τόνους ετησίως (EC, 2007), (EC DG ENV, 2011), (López et al., 2011).

Τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, το νομικό πλαίσιο σχετικά με τη διαχείριση των ΑΕΚΚ στοχεύει κυρίως στην επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωσή τους μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Για την αξιοποίηση των ΑΕΚΚ έχουν καθοριστεί ποσοτικοί στόχοι σε συμφωνία με την απόφαση 2011/753/ΕΕ περί θεσπίσεως κανόνων και μεθόδων υπολογισμού για τον έλεγχο της συμμόρφωσης προς τους στόχους του άρθρου 11 παράγραφος 2 της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου. Έτσι, μέχρι την 1^η Ιανουαρίου 2020, η επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση άλλων υλικών και αξιοποίηση των μη επικίνδυνων αποβλήτων από κατασκευές και κατεδαφίσεις πρέπει να ανέλθει κατ' ελάχιστο στο 70% του συνολικού βάρους των παραγόμενων ΑΕΚΚ. Η εναλλακτική διαχείριση και η επαναχρησιμοποίηση

των ΑΕΚΚ μπορεί να συμβάλλει στον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων και στη δημιουργία νέων προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (Galetakis et al., 2014).

Ακόμη ένα βιομηχανικό απόρριμμα που συνιστά σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα για τον κατασκευαστικό κλάδο είναι η λατομική παιπάλη. Είναι ένα υπερλεπτομερές παραπροϊόν (<65μm) που προέρχεται από την παραγωγή αδρανών υλικών και μπορεί να αντιπροσωπεύει έως και το 10-15% της συνολικής παραγωγής των αδρανών υλικών. Η απομάκρυνση σημαντικού μέρους του λεπτόκοκκου αυτού υλικού από τα αδρανή που προορίζονται για σκυρόδεμα, ασφαλτομίγματα και έτοιμα κονιάματα είναι επιβεβλημένη από τους σχετικούς κανονισμούς και τις προδιαγραφές ποιότητας που καθορίζουν το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό παιπάλης ανάλογα με τη χρήση των αδρανών υλικών. Έχουν προταθεί πολλοί διαφορετικοί τρόποι για την αξιοποίηση της παιπάλης, όμως σε ένα μεγάλο ποσοστό παραμένει αναξιοποίητη παρότι θα μπορούσε να είναι σημαντική πηγή πρώτης ύλης για τον κατασκευαστικό τομέα. Η αξιοποίηση της είτε ως έχει υπό τη μορφή πληρωτικού, είτε μετά από επεξεργασία για την παρασκευή νέων προϊόντων, μπορεί να συμβάλλει στην ορθολογικότερη χρήση των αποθεμάτων ασβεστόλιθου και κατά συνέπεια στη βιωσιμότητα των λατομείων (Galetakis et al., 2012).

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

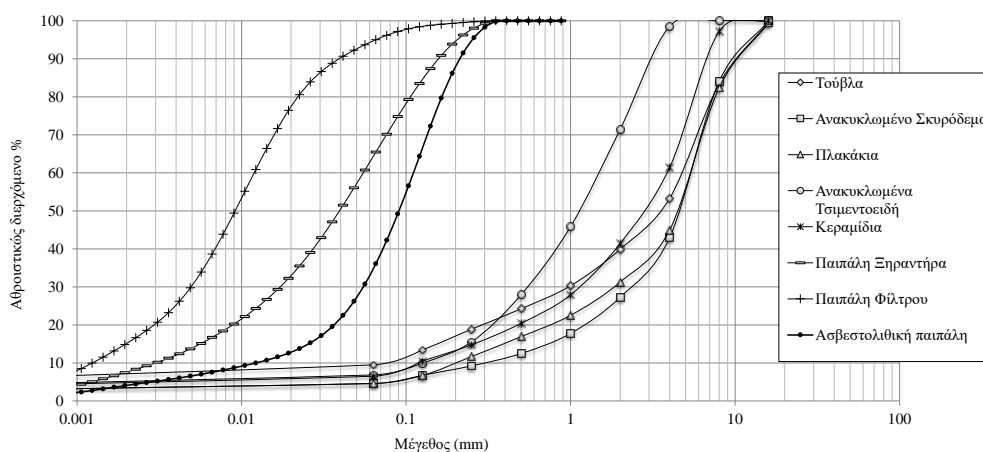
Χαρακτηρισμός υλικών

Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν ως αδρανή υλικά ανακυκλωμένα αδρανή από ΑΕΚΚ και λατομική παιπάλη. Τα δείγματα των ανακυκλωμένων αδρανών προέρχονται από διαφορετικά σημεία απόθεσης οικοδομικών αποβλήτων των νομών της Κρήτης και της ευρύτερης περιοχής του νομού Κοζάνης. Ειδικότερα, τα δείγματα των ΑΕΚΚ προέρχονται από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, προϊόντα τσιμέντου (κυρίως κυβόλιθοι και πλάκες) υπολείμματα έτοιμου σκυροδέματος, τούβλα και κονιάματα από κατεδάφιση τοιχοποιιών, κεραμικά πλακάκια, κεραμίδια, λεκάνες, κεραμικές μπανιέρες κλπ, από κατεδάφιση κτιρίων. Για τη δειγματοληψία και την προετοιμασία των δειγμάτων ακολουθήθηκε το πρότυπο EN 932-1.

Η ασβεστολιθική παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από συγκρότημα παραγωγής ασβεστολιθικών αδρανών, ενώ η παιπάλη μαρμάρου από μονάδα παραγωγής έτοιμων ξηρών κονιαμάτων. Συγκεκριμένα, η παιπάλη μαρμάρου συλλέγεται από το σύστημα ξήρανσης (παιπάλη μαρμάρου ξηραντήρα) και αποκονίωσης (παιπάλη μαρμάρου φίλτρου) της μαρμαρόσκονης, που αποτελεί το βασικό αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται σε έτοιμα κονιάματα. Το υπερλεπτομερές κλάσμα της μαρμαρόσκονης απομακρύνεται με τη χρήση ρεύματος αέρα και μέσω συστήματος σακκόφιλτρων συλλέγεται και συγκεντρώνεται σε σιλό. Η απομάκρυνση της παιπάλης από τη μαρμαρόσκονη επιβάλλεται από τις προδιαγραφές κοκκομετρίας των αδρανών των ετοιμών κονιαμάτων. Η παιπάλη που απομακρύνεται αποτελεί σημαντικό ποσοστό της

χρησιμοποιούμενης μαρμαρόσκονης (~25%). Η παιπάλη που προέρχεται από τα φίλτρα αποκονίωσης είναι το πιο λεπτόκοκκη σε σχέση με εκείνη που προέρχεται από το σύστημα ξήρανσης της μαρμαρόσκονης.

Η ορυκτολογική ανάλυση των υλικών έδειξε ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή από σκυρόδεμα αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη με μικρές ποσότητες χαλαζία και ίχνη περίκλαστου. Τα κύρια συστατικά των αδρανών που προέρχονται από υλικά τοιχοποιίας (τούβλα και θραύσματα κονιάματος) είναι ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης, ο αιματίτης, ο διοψίδιος και ο αλβίτης, ενώ ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης, η γύψος και το ορθόκλαστο αποτελούν τα κυριότερα ορυκτολογικά συστατικά των αδρανών που προέρχονται από πλακάκια. Το βασικό ορυκτολογικό συστατικό της παιπάλης είναι ο ασβεστίτης σε ποσοστό 97%, ενώ σε μικρή ποσότητα (3%) εμφανίζεται δολομίτης (Γαλετάκης κ.α., 2015). Η κοκκομετρική ανάλυση των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών πραγματοποιήθηκε με συμβατική κοσκίνηση για το χονδρότερο κλάσμα, σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1 και με περίθλαση ακτίνων laser για το λεπτότερο κλάσμα τους και για την παιπάλη. Οι κοκκομετρικές αναλύσεις των ανακυκλωμένων αδρανών και της παιπάλης δίνονται στο **Σχήμα 1**.



Σχήμα 1. Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών και παιπάλης (Γαλετάκης κ.α., 2015).

Παρασκευή και εργαστηριακός έλεγχος δοκιμών

Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τα ανακυκλωμένα αδρανή από υλικά κατεδαφίσεων, παιπάλη ξήρανσης και παιπάλη αποκονίωσης (φίλτρου), τσιμέντο τύπου CEM I 52.5N ως συνδετική κονία και υπερευστοποιητής πολυκαρβοξυλικής βάσης ως βελτιωτικό πρόσθετο σκυροδέματος. Ο υπερευστοποιητής χρησιμοποιήθηκε για να βελτιώσει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των νωπών μιγμάτων αλλά και τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των τελικών σκληρυμένων δοκιμών, καθώς προσδίδει

πλαστικότητα και αυξημένη ρευστότητα στο μίγμα χωρίς να απαιτείται προσθήκη επιπλέον νερού, διατηρώντας ή και αυξάνοντας τη μηχανική αντοχή του τελικού σκληρυμένου υλικού. Η αναλογία κ.β. στην οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.008 σε σχέση με τα συνολικά στερεά.

Η διαδικασία παρασκευής των μιγμάτων περιλαμβάνει την ανάμιξη των υλικών σε εργαστηριακό αναμικτήρα και χύτευση του μίγματος σε μεταλλικές πρισματικές μήτρες διαστάσεων 40x40x160 mm³ με ταυτόχρονη δόνηση σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Ακολουθεί η ωρίμανση των δοκιμίων σε θάλαμο ωρίμανσης σε θερμοκρασία 20±1°C και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 27 ημέρες σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος. Έπειτα, τα δοκίμια παραμένουν σε συνθήκες περιβάλλοντος για 1 ημέρα, προ της διεξαγωγής των εργαστηριακών δοκιμών.

Ο εργαστηριακός έλεγχος των σκληρυμένων πρισματικών δοκιμίων περιλαμβάνει:

- Μέτρηση της αντοχής σε κάμψη (Fs) και μονοαξονική θλίψη (Cs) σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1.
- Μέτρηση της πυκνότητας και της υδαταπορρόφησης σύμφωνα με το πρότυπο EN 99.
- Δοκιμές για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας σε σειρά κύκλων ψύξης - απόψυξης σύμφωνα με το EN 12371 και στη γήρανση με θερμικό πλήγμα σύμφωνα με το EN 14066.
- Δοκιμή της αντοχής των δοκιμίων σε θεϊκό μαγνήσιο.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι αναλογίες των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν καθώς και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων των σκληρυμένων δοκιμίων μετά την ωρίμανση δίνονται στον “Πίνακα 1” και στον “Πίνακα 2”. Ο σχεδιασμός των συνθέσεων του “Πίνακα 1” έγινε με χρήση του λογισμικού EMMA (Elkem Material Mixture Analyzer) και λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς σχετικούς με το κόστος του τσιμέντου και του υπερευστοποιητή. Από τον “Πίνακα 1” φαίνεται ότι ο λόγος τσιμέντο προς σύνολο αδρανών είναι 0.18, ενώ ο λόγος νερό προς τσιμέντο που απαιτήθηκε για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ρευστότητας στο μίγμα κυμάνθηκε από 0.59 έως 0.86. Η χρήση του λογισμικού EMMA επιτρέπει την βελτιστοποίηση των συνθέσεων με χρήση μοντέλων στοίβαξης κόκκων και είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συνθέσεις που περιέχουν μεγάλο ποσοστό λεπτομερών αδρανών (Γαλετάκης κ.α, 2015).

Οι τιμές για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και την υδαταπορρόφηση των σκληρυμένων δοκιμίων στις 28 ημέρες κυμαίνονται από 34.73-60.52 MPa και από 5.05-8.30% αντίστοιχα. Με βάση τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 196-1 και EN

13755 που ορίζουν τις απαιτήσεις όσον αφορά τις φυσικομηχανικές ιδιότητες για εμφανή φέροντα δομικά στοιχεία τύπου τεχνητού δομικού λίθου, οι συνθέσεις πληρούν τις απαιτήσεις για την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ($C_s > 12\text{MPa}$) και την υδατοαπορρόφηση ($< 10\%$). Σύμφωνα με το πρότυπο BS 3921:1965, που καθορίζει τις απαιτήσεις για τις διάφορες κατηγορίες δομικών λίθων (Πίνακας 3), όλες οι συνθέσεις πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις του προτύπου για τις κατηγορίες 1 έως 5, ενώ η σύνθεση C35 πληροί τις προδιαγραφές της απαιτητικής κατηγορίας 7. Η κατανομή των δοκιμών των συνθέσεων, με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, στις διάφορες κατηγορίες φερόντων δομικών στοιχείων του προτύπου BS 3921:1965 παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2**.

Πίνακας 1. Συνθέσεις δοκιμών.

Σύνθεση	Παιπάλη		Αδρανή		Κωδικός	Ποσοστό %	Νερό/ Τσιμέντο	Τσιμέντο/ Παιπάλη	Τσιμέντο/ Σύνολο αδρανών
	Είδος	Ποσοστό %	Είδος	Ποσοστό %					
C31	QC 11	20	QC 29	55	CEM I	15	0.86	0.50	0.18
	QC 24	10							
C33	QC 11	20	QC 30	55	CEM I	15	0.78	0.50	0.18
	QC 24	10							
C34	QC 11	10	QC 28	55	CEM I	15	0.80	0.50	0.18
	QC 9	20							
C35	QC 11	10	QC 21	65	CEM I	15	0.59	0.75	0.18
	QC 24	10							

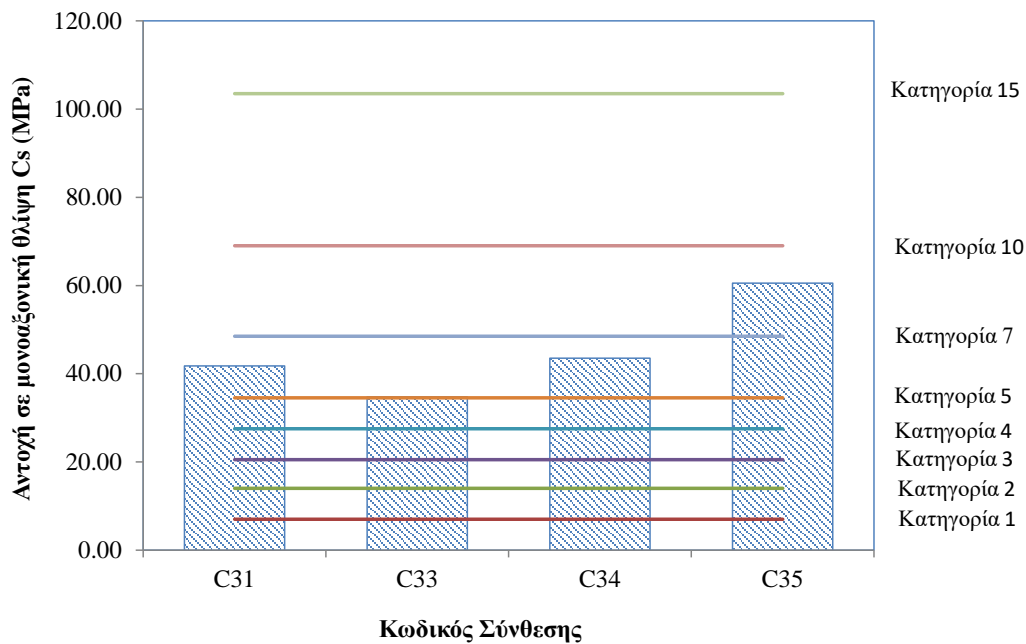
QC21: Ανακυκλωμένα προϊόντα τσιμέντου, **QC28:** Ανακυκλωμένα πλακάκια, **QC9:** Λατομική ασβεστολιθική παιπάλη, **QC29:** Ανακυκλωμένα κεραμίδια, **QC11:** Παιπάλη μαρμάρου ξηραντήρα, **QC30:** Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, **QC24:** Παιπάλη μαρμάρου φίλτρου, **Τσιμέντο:** Τύπου CEM I 52.5N

Πίνακας 2. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.

Σύνθεση	Ποκνότητα d (g/cm^3)	Υδατοαπορρόφηση %	Μέση τιμή F_s	Μέση τιμή C_s
C31	2.08	7.26	6.84	41.79
C33	2.06	8.30	4.73	34.73
C34	2.06	6.12	6.01	43.54
C35	2.25	5.05	6.17	60.52

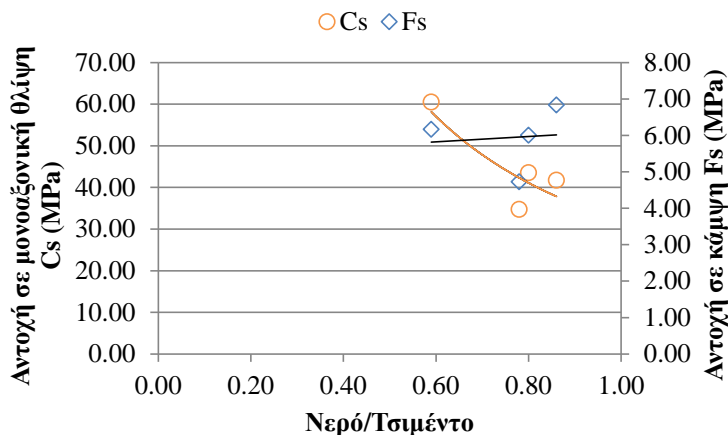
Πίνακας 3. Ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής σε μονοαξονική θλίψη φέροντων δομικών στοιχείων και κατηγορίες κατάταξής τους (BS 3921:1965).

Κατηγορίες φέροντων δομικών στοιχείων	1	2	3	4	5	7	10	15
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	7.0	14.0	20.5	27.5	34.5	48.5	69.0	103.5

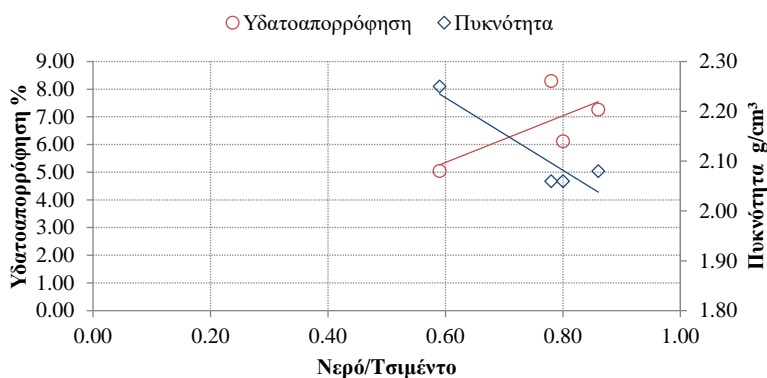


Σχήμα 2. Σύγκριση των τιμών της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των συνθέσεων με εκείνες των κατηγοριών του προτύπου BS 3921:1965 για φέροντα δομικά στοιχεία.

Η συσχέτιση των τιμών της αντοχής σε κάμψη και θλίψη, της υδατοαπορρόφησης και της πυκνότητας με τις παραμέτρους των συνθέσεων έδειξε ότι ο λόγος νερό προς τσιμέντο κατά κύριο λόγο επηρεάζει τις επιτυγχανόμενες τιμές. Η μείωση του λόγου νερού προς τσιμέντο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της C_s και σε μικρότερο βαθμό και της F_s . Όσον αφορά στην υδατοαπορρόφηση και στην πυκνότητα, αύξηση του λόγου νερού προς τσιμέντο οδηγεί σε σημαντική αύξηση της υδατοαπορρόφησης και μείωση της πυκνότητας (**Σχήμα 4**).



Σχήμα 3. Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη σε σχέση με το λόγο νερό προς τσιμέντο.



Σχήμα 4. Μεταβολή της υδατοαπορρόφησης και της πυκνότητας σε σχέση με το λόγο νερό προς τσιμέντο.

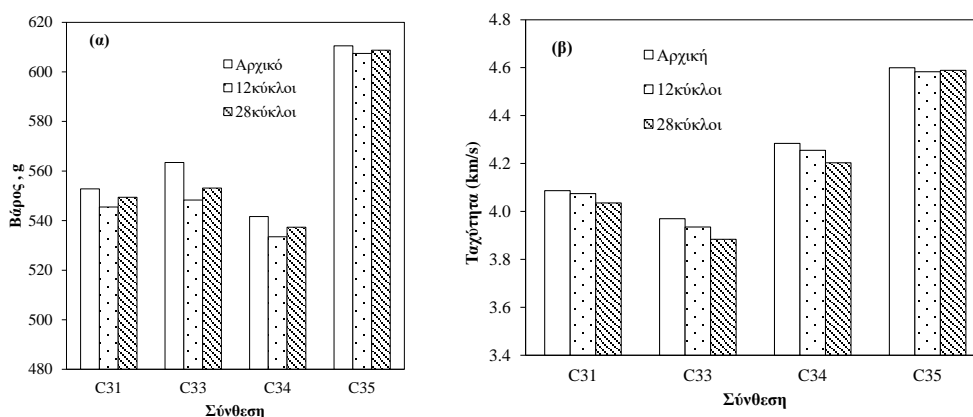
Όσον αφορά στις δοκιμές ανθεκτικότητας, τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν υποβλήθηκαν σε σειρά κύκλων ψύξης-απόψυξης σύμφωνα με το EN 12371 (28 κύκλοι) και σε καταπόνηση με θερμικό πλήγμα σύμφωνα με το EN 14066. Ο αριθμός των κύκλων επιλέχθηκε με βάση τις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας. Ως δείκτες μεταβολής των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων κατά τη διάρκεια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν η ταχύτητα διάδοσης του ήχου (μέτρηση σύμφωνα με το πρότυπο EN 14579) και η απώλεια μάζας.

Ειδικότερα, η δοκιμή ανθεκτικότητας σε κύκλους ψύξης-απόψυξης περιλαμβάνει ψύξη των πρισματικών δοκιμίων στους $-17,5^{\circ}\text{C}$ σε ειδικό κλιματικό θάλαμο και στη συνέχεια απόψυξη σε δοχείο με απιονισμένο νερό στους 20°C . Κάθε κύκλος ψύξης-απόψυξης ολοκληρώνεται σε χρονικό διάστημα 24 h. Στο **Σχήμα 5α**

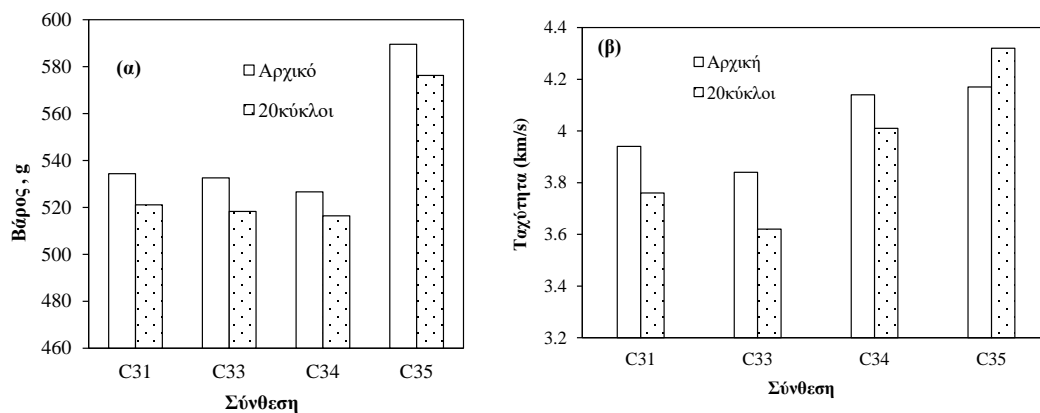
φαίνεται η απώλεια μάζας των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε κύκλους ψύξης-απόψυξης, ενώ στο **Σχήμα 5β** φαίνεται η μεταβολή στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Οι μετρήσεις πριν και μετά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης έδειξαν μια μικρή μείωση της ταχύτητας που κυμάνθηκε από 0.01-1.3%, ενώ η απώλεια μάζας των δοκιμίων ήταν 0.28-1.83%.

Για τη δοκιμή ανθεκτικότητας σε θερμικό πλήγμα πραγματοποιήθηκαν 20 κύκλοι. Αρχικά έγινε ξήρανση των δοκιμίων στους $40\pm 5^{\circ}\text{C}$ για μια εβδομάδα πριν τους κύκλους. Στη συνέχεια στον κάθε κύκλο γινόταν ξήρανση των δοκιμίων στους $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ για 18 ± 1 h και απευθείας εμβάπτιση σε νερό στους $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ για 6 ± 0.5 h. Στο **Σχήμα 6α** φαίνεται η απώλεια μάζας των δοκιμίων κατά την καταπόνηση σε θερμικό πλήγμα, ενώ στο **Σχήμα 6β** φαίνεται η μεταβολή στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου των δοκιμίων που υποβλήθηκαν στη δοκιμή. Η καταπόνηση των δοκιμίων σε θερμικό πλήγμα έδειξε μικρή μείωση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου που κυμάνθηκε από 3.3-5.6% και απώλεια μάζας από 1.92-2.6%.

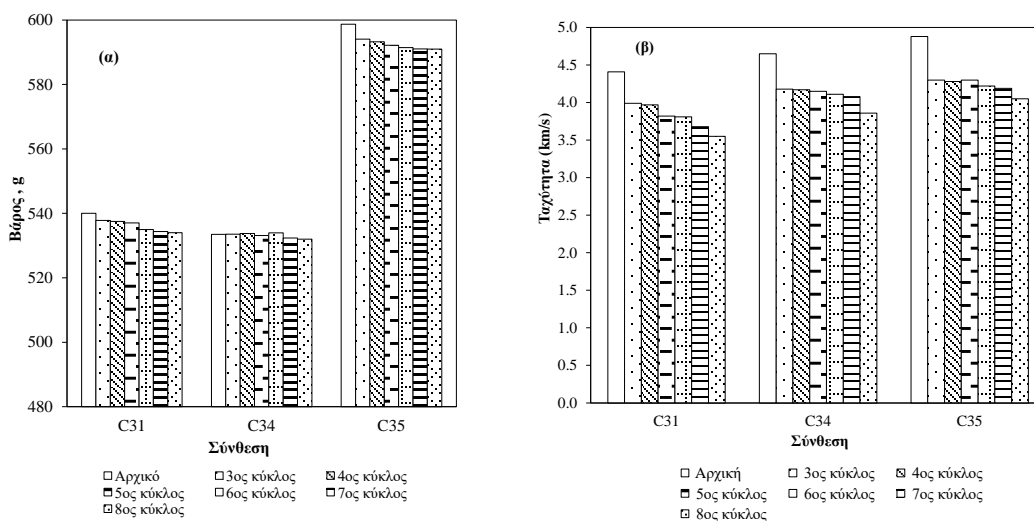
Για τις συνθέσεις C31, C34 και C35 έγινε δοκιμή αντοχής σε θειικό μαγνήσιο (8 κύκλοι). Για τη δοκιμή αντοχής σε θειικό μαγνήσιο χρησιμοποιήθηκε διάλυμα περιεκτικότητας 1500g/L MgSO_4 πυκνότητας $1.292\pm 0.008\text{g/ml}$. Για τη δοκιμή πραγματοποιήθηκαν 8 κύκλοι. Ο κάθε κύκλος αποτελούνταν από τέσσερα βήματα. Στο πρώτο βήμα γινόταν εμβαπτισμός των πρισματικών δοκιμίων για χρονικό διάστημα 24 h στο διάλυμα του θειικού μαγνησίου σε θερμοκρασία 20°C . Στο δεύτερο βήμα γινόταν ξήρανση των δοκιμίων στους 65°C για 24 h. Στο τρίτο βήμα τα δοκίμια εμβαπτιζόνταν σε νερό για 24 h και τέλος στο τέταρτο βήμα γινόταν ξήρανση των δοκιμίων στους 65°C για 24 h. Ο κάθε κύκλος κρατούσε τέσσερις μέρες και έγιναν μετρήσεις μετά από 3, 4, 5, 6, 7 και 8 κύκλους. Η απώλεια μάζας των δοκιμίων κατά τη δοκιμή αντοχής σε θειικό μαγνήσιο κυμάνθηκε από 0.28-1.29% μετά το τέλος του 8^{ου} κύκλου (**Σχήμα 7α**), ενώ η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μειώθηκε κατά 0.85-1% (**Σχήμα 7β**).



Σχήμα 5. (α) Απώλεια βάρους δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε κύκλους ψύξης-απόψυξης. (β) Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε κύκλους ψύξης-απόψυξης.



Σχήμα 6. (α) Απώλεια μάζας δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε καταπόνηση σε θερμικό πλήγμα. (β) Ταχύτητα διάδοσης του ήχου δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε καταπόνηση σε θερμικό πλήγμα.



Σχήμα 7. (α) Απώλεια μάζας δοκιμίων κατά τη δοκιμή αντοχής σε θεικό μαγνήσιο. (β) Ταχύτητα διάδοσης του ήχου κατά τη δοκιμή αντοχής σε θεικό μαγνήσιο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά στις φυσικομηχανικές ιδιότητες για δομικά στοιχεία τύπου «τεχνητού» δομικού λίθου, οι συνθέσεις που εξετάστηκαν πληρούν τις απαιτήσεις για αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (>12MPa) και υδατοαπορρόφηση (<10%). Όλες οι συνθέσεις πληρούν τις γενικές απαιτήσεις για αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για φέροντα δομικά στοιχεία κατηγορίας 1 έως 5, ενώ η σύνθεση C35 πληροί τις προδιαγραφές της απαιτητικής κατηγορίας 7 (BS 3921:1965). Η

συσχέτιση των τιμών της αντοχής σε κάμψη και θλίψη, της υδατοαπορρόφησης και της πυκνότητας με τις παραμέτρους των συνθέσεων έδειξε ότι ο λόγος νερό προς τσιμέντο κατά κύριο λόγο επηρεάζει τις επιτυγχανόμενες τιμές. Η συμπεριφορά των συνθέσεων στις δοκιμές ανθεκτικότητας σε θερμοκρασιακές μεταβολές και στη δοκιμή αντοχής σε θειικό μαγνήσιο κρίθηκε ικανοποιητική με βάση τις μετρήσεις μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης του ήχου και της απώλειας μάζας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μέρος των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Πράξης «Συνεργασία 2011» του έργου DURECOBEL - Ανακύκλωση λατομικής παιπάλης, οικοδομικών απορριμμάτων και υλικών κατεδαφίσεων για την παραγωγή καινοτόμων οικολογικών δομικών στοιχείων (11_SYN_8_584), που χρηματοδοτήθηκε από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα "Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα".

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

López - Gayarre, F., López - Colina, C., Serrano - López, M.A., García - Taengua, E. & López - Martínez, A., “Assessment of properties of recycled concrete by means of a highly fractioned factorial design of experiment”, *Construction and Building Materials* Vol. 25, No 10 (2011), 3802 - 3809.

EC DG ENV (European Commission Directorate - General for the Environment), “A project under the Framework contract ENV.G.4/FRA/2008/0112”, Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste - SR1, Final Report Task 2 (2011).

European Commission (EC), “End of Waste - Aggregates Case Study”, Directorate - General, Joint Research Centre, (2007).

Galetakis M., Alevizos G. & Leventakis K., “Evaluation of fine limestone quarry by-products for the production of building elements - An experimental approach”, *Construction and Building Materials* Vol. 26, No 10 (2012), 122 - 130.

Galetakis M., Komnitsas K., Leventakis K., Vasiliou A., Piperidi C., Zaharaki D., Stavroulakis N. & Ginos M., “Assessment of Construction and Demolition Wastes as raw material for the building industry”, 4th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, (Chania Greece September 2 - 5, 2014).

Γαλετάκης Μ., Βασιλείου Α., Πιπερίδη Χ., Σουλτανά Α., Κομνίτσας Κ., Στειακάκης Ε. & Γκίνος Μ., “Διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής δομικών στοιχείων από λατομική παιπάλη και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από απόβλητα εκσκαφών - κατεδαφίσεων - κατασκευών”, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΒΙΠΑΡ, (Θεσσαλονίκη Ελλάδα 11 - 12 Ιουνίου, 2015), 304 - 317.