

Μελέτη παραμέτρων ανθεκτικότητας ελαφροσκυροδέματος

Study on the durability parameters of lightweight concrete

Μαρία ΣΤΡΑΤΟΥΡΑ ¹, Ευστράτιος ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ ², Ευάγγελος
ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ³

Λέξεις κλειδιά: Ελαφροσκυρόδεμα, Κίσηρης, Περλίτης, Ανθεκτικότητα, Θλιπτική Αντοχή, Πορώδες, Τριχοειδής Απορρόφηση, Διείσδυση Χλωριόντων
Keywords: Lightweight Concrete, Pumice, Perlite, Durability, Compressive Strength, Porosity, Sorptivity, Chloride Migration

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο κύριος στόχος της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι η μελέτη παραμέτρων ανθεκτικότητας ελαφροσκυροδέματος. Διαφορετικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος με ελαφρά αδρανή, κίσηρη και περλίτη συγκρίνονται ως προς την ανθεκτικότητά τους. Μελετώνται παράμετροι ανθεκτικότητας, όπως η υδατοαπορροφητικότητα λόγω τριχοειδούς απορρόφησης, το ανοικτό πορώδες και η διαπερατότητα σε χλωριόντα μέσω του υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης κατά το πρότυπο NT BUILD 492. Συνοψίζοντας τα πειραματικά αποτελέσματα, η χρήση ελαφρών αδρανών, κίσηρης και περλίτη, δίνει ικανοποιητικές αντοχές για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος. Η μείωση της πυκνότητας του ελαφροσκυροδέματος συντελεί στην αύξηση του πορώδους ως προς το δείγμα αναφοράς. Ο συνδυασμός κίσηρης και περλίτη οδηγεί σε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Τέλος, η προσθήκη ελαφρών αδρανών, κίσηρης και περλίτη, βελτιώνει σημαντικά το συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων.

ABSTRACT: The main aim of this study is to investigate the durability parameters of lightweight concrete (LWC). Different mixtures of lightweight concrete produced by lightweight aggregates, volcanic Pumice (Pu) and Perlite (Pe), are compared by their durability. The durability characteristics were investigated by water absorption, due to capillary absorption, porosity and chloride penetration, estimating non-state chloride migration coefficient NT BUILD 492. The analysis of the test results leads to the conclusion, that the use of lightweight aggregates, such as pumice and perlite, gives satisfactory strengths. Reducing the density of lightweight concrete increases porosity, compared to the reference sample. The

¹ Υποψήφια Διδάκτωρ, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: mariastrat@gmail.com

² Επικ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: badstrat@central.ntua.gr

³ Καθηγητής, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: vgpapadakis@upatras.gr

combination of pumice and perlite leads to the reduction of the capillary absorption coefficient. Finally, the addition of lightweight aggregates, such as pumice and perlite improves significantly the chloride migration coefficient.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την παρασκευή ελαφροσκυροδέματος, χρησιμοποιούνται ελαφρά αδρανή, όπως η κίσηρης, ο περλίτης, κ.α. Η κίσηρης αποτελεί το κυριότερο φυσικό ελαφροβαρές αδρανές στη χώρα μας. Συναντάται στα Δωδεκάνησα (Γυαλί και Νίσυρο) και στις Κυκλάδες (Θήρα και Μήλο). Ο διογκωμένος περλίτης αποτελεί ένα τεχνητό ελαφροβαρές αδρανές. Τα κοιτάσματα περλίτη, επίσης αφθονούν στη χώρα μας, η οποία είναι μια από τις έξι κύριες χώρες που αντιπροσωπεύουν το 97% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής περλίτη (Kimball, 2016). Επιπλέον, ο περλίτης, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του σε SiO_2 και Al_2O_3 διαθέτει επαρκή ποζολανικά χαρακτηριστικά, τόσο για τη χρήση του στη παραγωγή τσιμέντου, όσο και του σκυροδέματος (Erdem et al, 2007, Yu et al, 2003).

Το βάρος του ελαφροσκυροδέματος (ΕΣ) είναι κατά κανόνα 25 – 35% χαμηλότερο από το συμβατικό σκυρόδεμα, παρ' όλα αυτά οι αντοχές τους είναι συγκρίσιμες (Bumanis et al, 2013, Müller et al, 2004, Τορζι, 2010). Διερευνάται εδώ και χρόνια η δομοστατική χρήση του στο φέροντα οργανισμό κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς έτσι επιτυγχάνεται μικρότερο συνολικό βάρος της κατασκευής (Chen and Liu, 2008). Συνεπώς, το σεισμικό φορτίο που αναλαμβάνουν οι κατασκευές μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται αντίστοιχα ο κίνδυνος αστοχίας. Χαμηλότερο βάρος κατασκευής οδηγεί, επίσης σε οικονομικότερες διατομές, καθώς οι ανάγκες όπλισης μειώνονται.

Ταυτόχρονα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ενισχύσει τις θεσμικές ρυθμίσεις που αφορούν στην υποχρεωτική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των νέων κτιρίων. Η εφαρμογή και χρήση θερμομονωτικών υλικών, όπως το ελαφροσκυρόδεμα σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος, μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες ενέργειας δια μέσου του φέροντος οργανισμού ταυτόχρονα με την πλήρη προστασία του οπλισμού της κατασκευής.

Επιπλέον, η ανθεκτικότητα είναι γνωστό ότι αποτελεί επιστημονικό και πρακτικό πρόβλημα του σκυροδέματος, καθώς καθορίζει τη διάρκεια ζωής όλων των κατασκευών του. Ειδικότερα, η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος που ενεργοποιείται, κυρίως λόγω ενανθράκωσης ή/και λόγω της διείσδυσης των χλωριόντων, αποτελεί το σημαντικότερο πρόβλημα ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος (Papadakis, 2000, Badogiannis et al, 2015). Δεδομένου ότι οι πηγές χλωριόντων που περιβάλλουν τις συνήθεις κατασκευές είναι αρκετές (παραθαλάσσιο περιβάλλον, αντιπαγωτικά άλατα κ.λπ.), η ικανότητα του σκυροδέματος να ανθίσταται στη διείσδυση χλωριόντων στο εσωτερικό του, αποτελεί μια ιδιαίτερα ουσιαστική παράμετρο για την ανθεκτικότητά του.

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των παραμέτρων ανθεκτικότητας του ΕΣ, όπως η υδατοαπορροφητικότητα, η τριχοειδής απορρόφηση και η διείδυση χλωριόντων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Υλικά και σύνθεση ελαφροσκυροδέματος

Παράχθηκαν πέντε (5) διαφορετικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος και μία (1) σύνθεση αναφοράς συμβατικού σκυροδέματος (REF). Σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο (C) τύπου CEM I 52.5N, με τη χημική ανάλυση που δίνεται στον **Πίνακα 1**. Η ποσότητα του τσιμέντου και ο λόγος νερού προς τσιμέντο (w/c) διατηρήθηκαν σταθερά για κάθε σύνθεση, ήτοι 400 kg/m^3 και 0.40, αντίστοιχα (με εξαίρεση τη σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος). Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος ήταν κίσηρης, με μέγεθος κόκκων 0 – 4 mm (Pu-1) και 8 – 12 mm (Pu-2), αντίστοιχα και δύο κλάσματα ακατέργαστου περλίτη, με μέγεθος 0 – 2 mm (Pe-1) και 0 – 4 mm (Pe-2). Χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, ασβεστολιθικά αδρανή, συγκεκριμένα άμμος 0 - 4 mm, ριζάκι 4 – 8 mm και γαρμπίλι 8 - 16 mm. Στον **Πίνακα 1**, δίνεται η χημική ανάλυσή των αδρανών (κίσηρης και περλίτης). Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής, (SP) Sika Viscocrete, η ποσότητα του οποίου μεταβαλλόταν ανάλογα, έτσι ώστε να επιτευχθεί κατηγορία κάθισης S2. Πριν την ανάμιξη τα αδρανή είχαν έρθει με κατάλληλη τεχνική, σε κατάσταση κορεσμού, προκειμένου να διευκολυνθεί η εργασιμότητα του μείγματος κατά την παρασκευή του ελαφροσκυροδέματος. Στον **Πίνακα 2**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν, ενώ στο **Σχήμα 1** φαίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του μείγματος αδρανών, όπως προκύπτει από τη μελέτη σύνθεσης.

Από κάθε σύνθεση σκυροδέματος λήφθηκαν κυβικά δοκίμια, ακμής 100 mm, για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη και κυλινδρικά δοκίμια, $\text{Ø}100 \times 200 \text{ mm}$, με σκοπό την εκτέλεση των δοκιμών, που αφορούσαν στις ιδιότητες ανθεκτικότητας. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

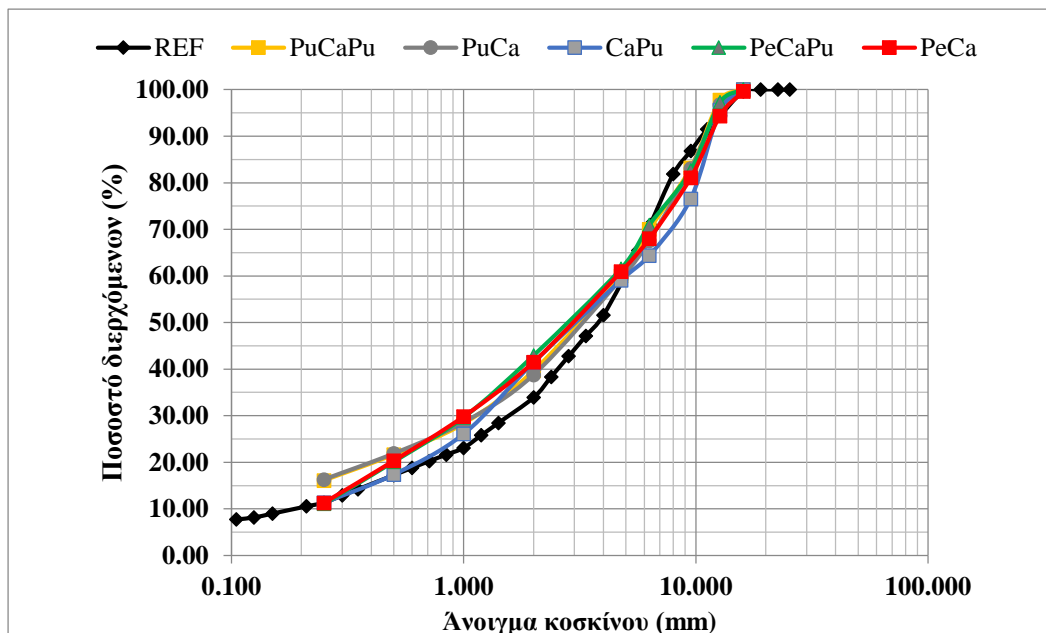
Η παρασκευή των μειγμάτων και η πειραματική διερεύνηση έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.).

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση συστατικών σκυροδέματος (% κ.β.).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I.
Τσιμέντο	20.00	4.90	3.50	62.00	3.10	2.70	0.50	0.20	-	-	2.80
Κίσηρης	68.58	11.89	1.16	4.11	0.44	-	4.02	2.77	0.12	0.03	7.41
Περλίτης	74.00	13.00	1.00	1.40	0.25	-	3.50	4.50	-	-	2.60

Πίνακας 2. Περιεκτικότητα συστατικών των συνθέσεων σκυροδέματος (kg/m^3).

Συστατικό	Κωδικός Σύνθεσης					
	REF	PuCaPu	PuCa	CaPu	PeCaPu	PeCa
C	400	400	400	400	400	400
Pu-1	-	721	854	434	-	-
Pu-2	-	166	-	-	264	-
Pe-1	-	-	-	-	132	162
Pe-2	-	-	-	-	776	891
Άμμος	950	-	-	682	-	-
Ριζάκι	570	222	328	124	198	243
Γαρμπίλι	380	-	131	-	-	324
SP	0.050	0.050	0.025	0.014	0.040	0.037
w/c	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40



Σχήμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση μείγματος αδρανών των συνθέσεων σκυροδέματος.

Πειραματικές Μέθοδοι

Συνολικά 7 κυβικά δοκίμια ελαφροσκυροδέματος παρασκευάστηκαν και μετά τη μίξη, υπολογίστηκε η θλιπτική αντοχή τους στις 2, 7 και 28 ημέρες. Εξετάστηκαν δύο δοκίμια ανά μέτρηση στις 2 και 7 ημέρες και τρία στις 28, με αποτέλεσμα να προκύψουν οι μέσες τιμές των θλιπτικών αντοχών. Η ανθεκτικότητα των μιγμάτων ελαφροσκυροδέματος αξιολογήθηκε με βάση την υδατοαπορροφητικότητα και την

ανθεκτικότητα διείσδυσης χλωριόντων σε δείγματα, που συντηρήθηκαν για 28 ημέρες στο νερό. Το ανοιχτό πορώδες (open porosity) OP (%) του σκυροδέματος ελέγχθηκε σε κυλινδρικό δοκίμιο, Ø100 x 50 mm (ASTM C 642, 1997). Με τη χρήση ομοίου κυλινδρικού δοκιμίου πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός της τριχοειδούς απορρόφησης, με σκοπό την εκτίμηση της απορροφητικότητας (sorptivity) μέσω τριχοειδών πόρων S (mm/min^{0.5}) του σκυροδέματος (RILEM TC 116 PCD, 1999). Για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς των χλωριόντων (chloride migration coefficient) επιλέχθηκε η επιταχυνόμενη δοκιμή NordTest Build 492 (1999), η οποία βασίζεται σε μέθοδο που είχαν αναπτύξει προγενέστερα οι Tang and Nilsson (1992). Για τον προσδιορισμό του βάθους διείσδυσης χλωριόντων εφαρμόζεται χρωματογραφική μέθοδος (Kim et al, 2013).

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στον **Πίνακα 3**, παρουσιάζονται οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (κάθιση, πυκνότητα και η περιεκτικότητα σε αέρα, %) και του σκληρυμένου σκυροδέματος (θλιπτική αντοχή) για όλες τις συνθέσεις, όπως προέκυψαν πειραματικά. Ο **Πίνακας 4**, συνοψίζει τις τιμές όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας (ανοιχτό πορώδες, τριχοειδής απορρόφηση και συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων), που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 3. Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

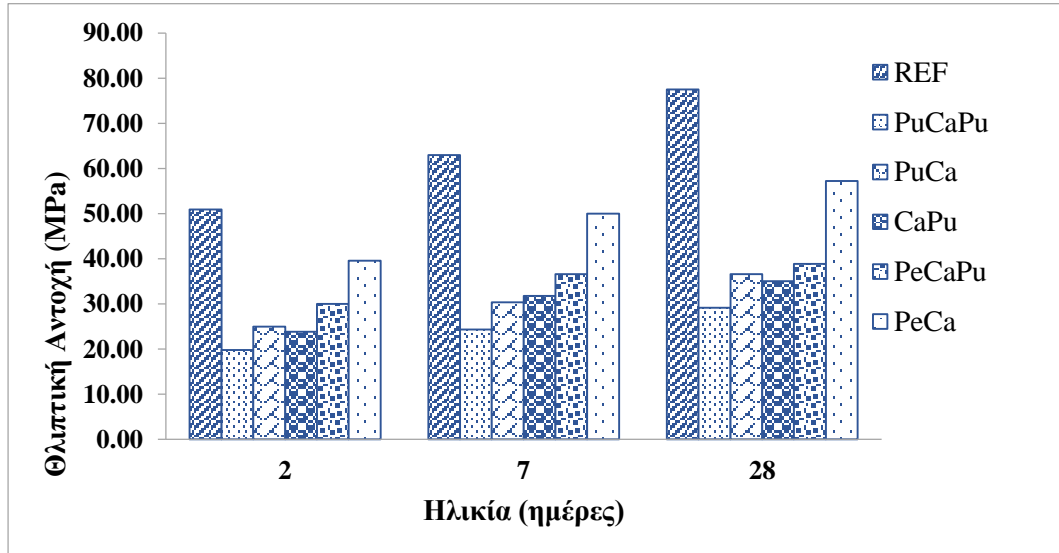
Κωδικός Σύνθεσης	Κάθιση (mm)	Περιεκτικότητα σε αέρα (%)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)		
				2d	7d	28d
PEF	80	0.9	2.44	50.94	62.94	77.50
PuCaPu	90	5.0	1.67	18.42	23.42	27.44
PuCa	30	7.0	1.78	24.09	29.25	34.89
CaPu	200	6.0	1.87	22.73	29.91	31.98
PeCaPu	55	4.0	1.87	28.86	33.58	34.78
PeCa	40	2.8	2.16	38.68	49.37	56.13

Όπως φαίνεται, τόσο στον **Πίνακα 3**, όσο και στο διάγραμμα του **Σχήματος 2**, η προσθήκη ελαφρών αδρανών επηρεάζει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή, καθώς παρατηρείται μείωση της, εν συγκρίσει με αυτήν του συμβατικού σκυροδέματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί από τους Litva and Serenda (1978). Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής στις συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος εξαρτάται από τον τύπο των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν και το ποσοστό τους στο μείγμα. Αρκετοί ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι η θλιπτική αντοχή μειώνεται με τη μείωση της πυκνότητας, καθώς αυξάνεται το ποσοστό των ελαφρών αδρανών στο

σκυρόδεμα (Demirboga and Gul, 2004, Turkmen and Kantarci, 2006, Turkmen et al, 2007).

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2**, η χρήση περλίτη στις συνθέσεις αυξάνει τη θλιπτική αντοχή σε σχέση με τις άλλες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος. Έτσι στη σύνθεση PeCa η θλιπτική αντοχή αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό συγκριτικά με τις άλλες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην ποζολανικότητα του περλίτη που συντελεί στη βελτίωση της δομής της διεπιφάνειας της μεταβατικής ζώνης (Lura et al, 2004).

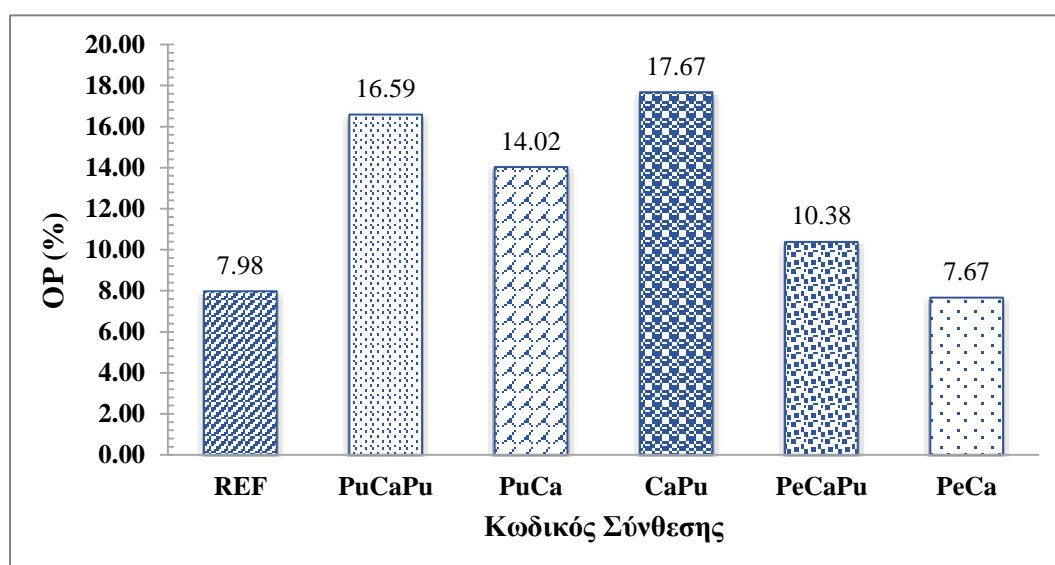
Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε κίσηρης ως ελαφροβαρές αδρανές, παρατηρήθηκε μείωση της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με τη REF. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αλλαγή της μικροδομής του ελαφροσκυροδέματος, καθώς στο ελαφροσκυρόδεμα κυριαρχεί η ποσότητα άδειων πόρων των ελαφρών αδρανών έναντι των τριχοειδών πόρων της πάστας (Karacos et al, 2011). Επίσης, η μορφολογία της θραύσης μεταβάλλεται, όπως παρατήρησαν σε προηγούμενη έρευνα τους οι Vargas et al (2017), σύμφωνα με την οποία, οι ρωγμές που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε θλίψη διασχίζουν τα ελαφρά αδρανή της κίσηρης, ενώ στο σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή οι ρωγμές ακολουθούν τη διεπιφάνεια της πάστας και των αδρανών. Το γεγονός αυτό, επιτρέπει στο σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή να παρουσιάζει τιμές θλιπτικής αντοχής πολύ κοντά σε εκείνες της πάστας, ενώ οι τιμές της αντοχής σε θλίψη του ΕΣ προσεγγίζουν αυτές του αδρανούς (Hossain, 2004).



Σχήμα 2: Εξέλιξη θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων σκυροδέματος.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα από τις δοκιμές ανθεκτικότητας.

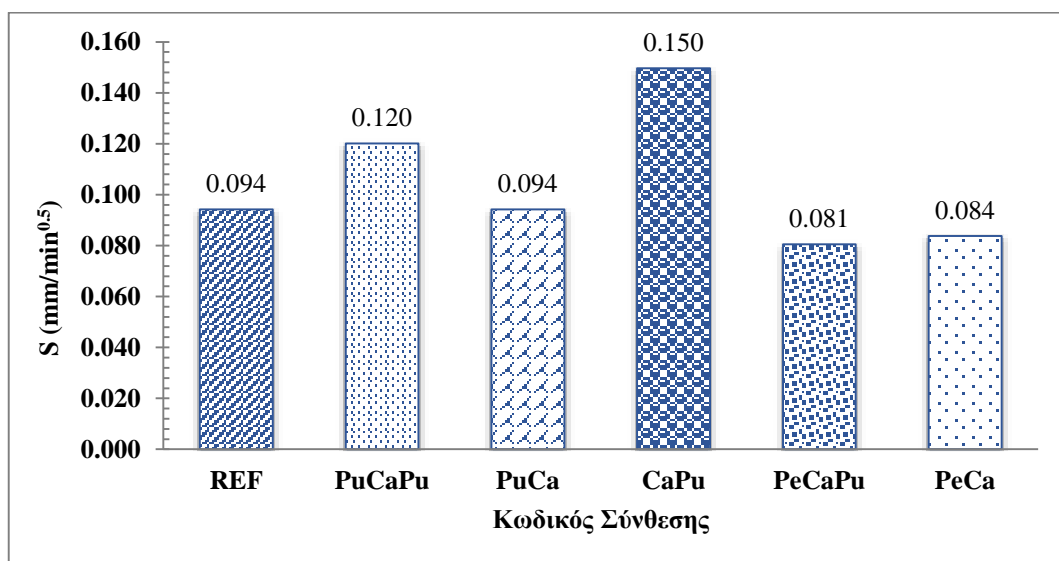
Κωδικός Σύνθεσης	Ανοικτό Πορώδες	Συντ. τριχοειδούς απορρόφησης		Συντελεστής διείσδυσης
	<i>OP (%)</i>	<i>S (mm/min^{0.5})</i>	<i>R²</i>	<i>D_{nssm} · 10⁻¹² (m²/s)</i>
REF	7.98	0.094	0.99	9.97
PuCaPu	16.59	0.120	0.99	1.95
PuCa	14.02	0.094	0.99	1.37
CaPu	17.67	0.150	0.99	8.07
PeCaPu	10.38	0.081	0.99	1.73
PeCa	7.67	0.084	0.99	2.37



Σχήμα 3: Αποτελέσματα ανοικτού πορώδους (OP, %), για κάθε σύνθεση.

Οι τιμές του ανοικτού πορώδους (OP), που λαμβάνουν οι συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3** και στον **Πίνακα 4**, παρουσιάζονται αυξημένες σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Αυτό θεωρείται αναμενόμενο, σύμφωνα και με τους Lo et al (1999), που αναφέρουν ότι καθώς τα ελαφρά αδρανή έχουν μεγαλύτερη απορρόφηση νερού από τα συμβατικά, επηρεάζεται τόσο η μικροδομή της πάστας του τσιμέντου, όσο και η διεπιφάνεια της πάστας με τα αδρανή. Ταυτόχρονα, παρατηρείται μείωση του ανοικτού πορώδους, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των μιγμάτων του ελαφροσκυροδέματος. Συνεπώς, η πυκνότητα μπορεί να αποτελέσει βασική ένδειξη της

υδατοαπορροφητικότητας του ελαφροσκυροδέματος (Lo et al, 2008). Εξαιρέση αποτελεί η σύνθεση CaPu, με τιμή πορώδους 17.67%, η αύξηση της οποίας ίσως οφείλεται στην αυξημένη ποσότητα ρευστοποιητή, η οποία φαίνεται να διατάραξε τη συνεκτικότητα του μείγματος. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η χρήση περλίτη φαίνεται να έχει θετική επίδραση στο πορώδες. Για παράδειγμα στη σύνθεση PeCa καταγράφεται μικρή μείωση του πορώδους σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Το γεγονός αυτό, μπορεί να αποδοθεί, είτε στη δράση του περλίτη ως φυσικό πληρωτικό, είτε στην ποζολανική του δραστηριότητα. Λόγω της ποζολανικής δράσης του περλίτη εννοείται ο περαιτέρω σχηματισμός C-S-H, με αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας του σκυροδέματος (John et al, 2012).



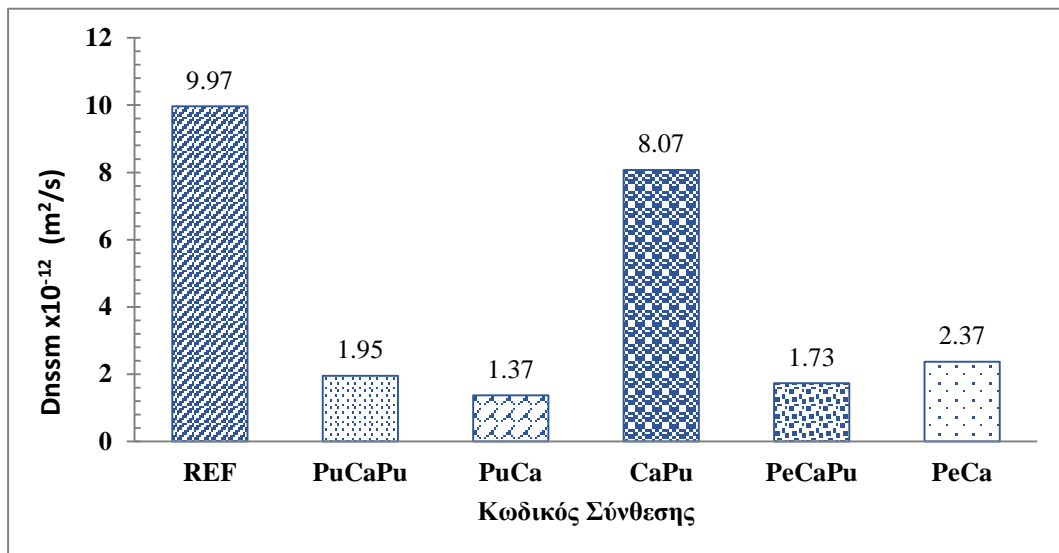
Σχήμα 4: Αποτελέσματα συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης (S , $mm/min^{0.5}$), για κάθε σύνθεση.

Τα αποτελέσματα της τριχοειδούς απορρόφησης δίνονται στον **Πίνακα 4** και στο **Σχήμα 4**. Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης κυμαίνονται από $0.081 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$ έως $0.150 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$. Παρατηρείται, επίσης, ότι όλες οι συνθέσεις έχουν υψηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (R^2) της τάξης του 0.99, γεγονός που καθιστά αξιόπιστες τις μετρήσεις.

Στις συνθέσεις με ελαφρά αδρανή κίσηρης παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς, μόνο για τη σύνθεση PuCa. Αντίθετα, ο μεγαλύτερος συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης καταγράφεται για τη σύνθεση CaPu. Συνεπώς, φαίνεται ότι η χρήση χονδρόκοκκης

κίσσηρης (Pu-2) επηρεάζει αρνητικά τον συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Αξίζει να σημειωθεί, πως αρχικά η απορρόφηση της σύνθεσης PuCa ήταν αυξημένη σε σχέση με το REF, ωστόσο με την πάροδο του χρόνου ο ρυθμός απορρόφησης μειώθηκε.

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί, πως με τη χρήση περλίτη στο ελαφροσκυρόδεμα, παρατηρείται σημαντική μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Στην περίπτωση της PeCaPu, η απορρόφηση ήταν η μικρότερη συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις. Επομένως, ο συνδυασμός περλίτη και κίσσηρης (Pu-2) προσέδωσαν στο μείγμα καλύτερη συμπεριφορά και μειωμένο συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Αυτό μπορεί να αποδοθεί, είτε στην επίδραση φυσικής πληρώσεως των μικροσωματιδίων του περλίτη, είτε στην ποζολανική του δραστηριότητα. Ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης και στις δυο περιπτώσεις (PeCaPu και PeCa) ήταν μειωμένος σε σύγκριση με εκείνον του REF.



Σχήμα 5: Αποτελέσματα συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων ($D_{nssm} \times 10^{-12}, \text{m}^2/\text{s}$), για κάθε σύνθεση.

Όπως φαίνεται, τόσο στον Πίνακα 4, όσο και στο διάγραμμα του Σχήματος 5, οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων για το ελαφροσκυρόδεμα κυμαίνονται από $1.37 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ως $8.07 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, όταν για το συμβατικό σκυρόδεμα μετράται τιμή ίση με $9.97 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Σύμφωνα με την ταξινόμηση που δίδεται από τους Nilsson et al (1998), οι τιμές $D_{nssm} (\times 10^{-12})$ που ελήφθησαν οδηγούν σε χαρακτηρισμό της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων τους σκυροδέματος από «υψηλή» έως «εξαιρετικά υψηλή» για το

ελαφροσκυρόδεμα και «υψηλή» για το REF. Συνεπώς, με τη χρήση ελαφρών αδρανών κίσηρης και περλίτη μειώνεται η διείδυση των χλωριόντων έναντι του συμβατικού σκυροδέματος. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη άμορφου SiO₂ στην κίσηρη και στον περλίτη το οποίο, προσδίδει στο μείγμα ποζολανικές ιδιότητες υψηλής δραστηριότητας που συντελούν στο σχηματισμό πληρωτικών υλικών και αυξάνουν τη συνοχή της πάστας (Aly et al, 2011, Gao et al, 2013). Έτσι, το παραγόμενο Ca(OH)₂ καταναλώνεται από το άμορφο πυρίτιο των αδρανών. Επιπλέον, το Ca(OH)₂ έχει μικρότερη χημική συγγένεια με τα ελαφρά αδρανή από ότι με τα ασβεστολιθικά. Συνεπώς, η δομή της μεταβατικής ζώνης αναμένεται βελτιωμένη γεγονός που, εφόσον, διαπιστωθεί πειραματικά (π.χ. μέσω παρατηρήσεων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας) μπορεί να αιτιολογήσει σε μεγάλο βαθμό τη βελτιωμένη αντίσταση του ελαφροσκυροδέματος στη διείδυση Cl⁻.

Τέλος, από τα **Σχήματα 3-4-5**, δεν φαίνεται να προκύπτει κάποια σαφής σχέση μεταξύ του πορώδους και του συντελεστή διείδυσης χλωριόντων. Όπως αναφέρουν οι Real et al (2015), στην πραγματικότητα η διείδυση χλωριόντων δεν εξαρτάται μόνο από το ανοικτό πορώδες, αλλά επηρεάζεται από άλλες παραμέτρους, όπως π.χ. η πυκνότητα του εξωτερικού κελύφους, που στα ελαφρά αδρανή, είναι χαμηλότερη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά από μελέτη και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, για την παρασκευή ελαφροσκυροδέματος με τη χρήση κίσηρης και περλίτη, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Το σκυρόδεμα με κίσηρη και περλίτη αναπτύσσει ικανοποιητικές αντοχές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δομοστατικές εφαρμογές. Ιδιαίτερα η προσθήκη φυσικού περλίτη στο σκυροδέμα δεν υποβαθμίζει καθόλου την αντοχή του.
- Οι τιμές του ανοικτού πορώδους του ελαφροσκυροδέματος, γενικά, εκτιμώνται αυξημένες. Ωστόσο, με ρύθμιση της πυκνότητας του ελαφροσκυροδέματος ρυθμίζεται, αντίστοιχα, το πορώδες, καθώς φαίνεται και πειραματικά η άμεση συσχέτιση πυκνότητας - πορώδους. Η χρήση αδρανών από περλίτη επηρεάζει θετικά το πορώδες του ελαφροσκυροδέματος.
- Ο συνδυασμός κίσηρης και περλίτη οδηγεί σε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, εν συγκρίσει με το συμβατικό, που φτάνει στο 14.54%.
- Η προσθήκη ελαφρών αδρανών κίσηρης και περλίτη επηρέασε θετικά την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείδυση χλωριόντων, η οποία καταγράφεται έως και 8 φορές χαμηλότερη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέρμες ευχαριστίες προς τον Οργανισμό Νεολαίας Κύπρου (ONEK) για τη χορηγία στα πλαίσια του προγράμματος Φοιτητές σε δράση - Επιχειρηματικότητα. Επίσης οι συγγραφείς ευχαριστούν την εταιρία IMERYS INDUSTRIAL MINERALS GREECE S.A, για τη χορηγία του περλίτη, όπως και τη μετ. φοιτήτρια Ντάσκα Α., για τη συνδρομή της στις πειραματικές μετρήσεις.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Aly, M., Hashmi, M.S.J., Ahmad, Z.A., & Maslehud, M., “Effect of nano clay particles on mechanical, thermal and physical behaviours of waste-glass cement mortars”. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No 27, (2011) 7991-7998.

ASTM C 642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International (1997).

Badogiannis, E., Aggeli, E., Papadakis, V.G., & Tsivilis, S., “Evaluation of chloride-penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion Binding model and of the k-value concept”. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 63 (2015) 1-7.

Bumanis, G., Bajare, D., & Korjakins, A., “Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concrete Made from Expanded Glass”. *Sustainable architecture and civil engineering*, Vol 2 (2013) 26-32.

Demirboga, R., & Gül, R., “Durability of mineral admixed lightweight aggregate concrete”. *Indian Journal of Engineering and Materials Science*, Vol. 11 (2004) 201-206.

Erdem, T.K., Meral, C., Tokyay, M., & Ergogan, T.Y., “Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements”. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29 (2007) 13-21.

Gao, K., Lin, K.L., Wanga, D.Y., Hwang, C.L., Tuan, B.L.A., Shiu, H.S., & Cheng, T.W., “Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers”. *Construction and Building Materials*, Vol. 48, (2013) 441-447.

Hossain, A.M.K., “Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No 2 (2004) 283-291.

John, J., Maya, T.M., & Meennambal, T., “Mathematical modeling for durability characteristics of fly ash concrete”. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol.4, No 1 (2012) 353-361.

Karacos, B.M., Demirboga, R., Türkmen, I., & Can, I., “Modeling with ANN and effect of pumice aggregate and air entrainment on the freeze - thaw durabilities of HSC”. *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (2011) 4241-4249.

Kim, M.Y., Yang, E.I., & Yi, S.T., “Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures”. *Construction and Building Materials*, Vol. 41 (2013) 239-245.

Kimball, M.S., “Mineral Commodity Summaries”, USGS, Virginia (2016).

- Lo, T.Y., Gui, H.Z., Tang, W.C., & Leung, W.M., "The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No 4 (2008) 623-628.
- Lo, Y., Gao, X.F., & Jeary, A.P., "Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete". *Building Environment*, Vol. 34, No 6 (1999) 759-764.
- Lura, P., Bentz, P.D., Lange, D.A., Kovler, K., & Bentur, A., "Pumice Aggregates for internal water curing", in *Proceedings international RILEM symposium* (Evanston, IL March 22-24, 2004), Evanston, IL (2004) 137-151.
- Müller, S.H., & Haist, M., "Self Compacting Lightweight concrete". *Betonwerk and Fertigeil - Technik*, (2004) 8-17.
- Nilsson, L., Ngo, M.H., & Gjörv, O.E., "High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg". in "Proceedings of the Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions - Environment and Loading", ed. Gjörv, O.E., Sakai, K. & Banthia, N. E & FN Spon, London and New York (1998) 1193-1198.
- NT Build 492 Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiment, Nordtest (1999).
- Papadakis, V.G., "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress". *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No 2 (2000) 291-299.
- Real, S., Bogas, A., & Pontes, J., "Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders". *Construction and Building Materials*, Vol. 98 (2015) 425-436.
- RILEM TC 116-PCD, "RILEM Technical Recommendation: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete". *Materials and Structures*, Vol. 32, No 217 (1999) 178-179.
- Tang, L., & Nilsson, L.O., "Chloride Diffusivity in High Strength Concrete". *Nordic Concrete Research*, Vol. 1, No 1 (1992) 162-171.
- Topçu, I.B., & Uygunoğlu, T., "Effect of aggregate type on properties of hardened self consolidating lightweight concrete (SCLC)". *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No 7 (2010) 1286-1295.
- Turkmen, I., & Kantarcı, A., "Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the drying shrinkage of self-compacting concretes". *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 13 (2006) 253-258.
- Turkmen, I., Demirboğa, R., & Gul, R., "The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the freezing and thawing of concrete". *Computers and Concrete*, Vol. 3, No 2-3 (2007) 163-175.
- Vargas, P., Restrepo-Baena, O., & Tobón, I.J., "Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes". *Construction and Building Materials*, Vol. 137 (2017) 381-389.
- Yu, L.H., Ou, H., & Lee, L.L., "Investigation on pozzolanic effect of perlite". *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No 1 (2003) 73-76.