

ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΑΠΟΞΗΡΑΜΕΝΗΣ ΛΥΜΑΤΟΛΑΣΠΗΣ ΣΕ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥΣ ΟΠΤΟΠΛΙΝΘΟΥΣ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Σουζάνα Ταστάνη

PhD / MSc Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.

Βασίλης Διαμαντής

PhD Μηχανικός Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ.

Λέξεις κλειδιά: κεραμικά υλικά, λυματολάσπη, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο πειραματικός χαρακτηρισμός κεραμικών οπτόπλινθων – δοκιμίων με λυματολάσπη ως πρόσθετο σε συνάρτηση με τη σύσταση, τις φυσικές και τις μηχανικές ιδιότητες αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Το πειραματικό πρόγραμμα περιλαμβάνει την παρασκευή πηλού με κύριο συστατικό την ακατέργαστη άμμο αργίλο-πυριτικής σύστασης και συμπληρωματικό την ξηραμένη, οργανικής προέλευσης, λυματολάσπη με την περιεκτικότητα του δευτέρου υλικού να αποτελεί την βασική μεταβλητή. Τα παρασκευασθέντα πρισματικά οπτοπλινθοσώματα χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση φυσικών ιδιοτήτων όπως η διασταλτικότητα και η υδατοαπορροφητικότητα ως μέτρο πορώδους, και μηχανικών ιδιοτήτων όπως είναι η αντοχή σε εφελκυσμό.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αντικατάσταση ακατέργαστης αργίλου με ξηραμένη λυματολάσπη προερχόμενη από αστικά απόβλητα για την παρασκευή κεραμικών οπτόπλινθων μπορεί να αποτελέσει μέρος της λύσης ζητημάτων που αφορούν στην απόθεση και διαχείριση των αποβλήτων, στον περιορισμό της περιβαλλοντικής μόλυνσης και δευτερευόντως στη μείωση του κόστους παραγωγής με τη χρήση της ως υλικό πρώτης ύλης.

Η εισαγωγή αποξηραμένης λυματολάσπης, παράγωγο μονάδων βιολογικού καθαρισμού αστικών λυμάτων, στην παρασκευή δομικών υλικών αποτελεί αντικείμενο εντατικής ερευνητικής προσπάθειας των δύο τελευταίων δεκαετιών. Έχει εισαχθεί επιτυχώς στην παραγωγή οικολογικών τσιμέντων με τη μορφή τέφρας, ως συστατικό δηλαδή με ποζολανικές ιδιότητες, αφού προηγουμένως έχει υποστεί καύση ώστε να απωλέσει σημαντικό μέρος της οργανικής σύστασής της (Pan et al. 2003, Monzo et al

1996, Lin et al 2005). Οι Wang et al. (2005) μελέτησαν το πορώδες ως μεταβλητή επιρροής της θερμομονωτικής απόδοσης ελαφρών υλικών. Χρησιμοποίησαν μίγμα τέφρας λυματολάσπης με τσιμέντο. Παρατήρησαν ότι η τέφρα έχει πορώδη δομή με ακανόνιστους κόκκους με συνέπεια τη μείωση της εργασιμότητας φρέσκου κονιάματος. Για βελτίωση ιδιοτήτων όπως είναι το ειδικό βάρος (δηλαδή ελαφρύτερο υλικό) και η θλιπτική αντοχή, ελεγκτής αποτελεί ο λόγος νερού προς στερεά παρά η προσθήκη τσιμέντου.

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες στην κατεύθυνση της κεραμοποιίας, και μάλιστα στην παραγωγή οπτόπλινθων, με πιθανά οφέλη λόγω αυξημένου πορώδους στη μόνωση αλλά και λόγω χαμηλού ίδιου βάρους στο φορτίο της τοιχοποιίας. Μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό υλικό των δομικών υλικών πλήρωσης τοιχοποιίας από διογκούμενο σκυρόδεμα (π.χ. τύπου YTONG). Έρευνα των Jordan et al. (2005) έχει δείξει ότι δεν υπάρχει ξεκάθαρη σχέση μεταξύ τιμών γραμμικής συστολής και ποσοστού συμμετοχής της ύλης, ενώ η τελευταία έχει σχεδόν γραμμική σχέση με την απορρόφηση νερού. Ως προς τις μηχανικές ιδιότητες, η ύλη φαίνεται ότι επηρεάζει αρνητικά την εφελκυστική αντοχή σε κάμψη οπότε οι ερευνητές πρότειναν το ποσοστό συμμετοχής της στην παρασκευή των οπτόπλινθων να περιορισθεί βάσει ορισμένων κανονιστικών διατάξεων. Οι Cusido et al. (2003) μελέτησαν τις εκπομπές αερίων από τη διαδικασία όπτησης των κεραμικών σε εργαστηριακό επίπεδο. Συμπέραναν ότι τα επίπεδα εκπομπών σε βαρέα μέταλλα ήταν εικοσαπλάσια των συμβατικών κεραμικών χωρίς αποξηραμένη λυματολάσπη, αλλά πάντα κάτω από τα επιτρεπτά όρια των κανονισμών. Οι Lin and Weng (2001) μελέτησαν την προσθήκη τέφρας λυματολάσπης σε άργιλο για την παρασκευή κεραμικού υλικού, με παραμέτρους μελέτης το πρόσθετο, την αναλογία μίξης και την θερμοκρασία όπτησης. Συμπέραναν ότι ο δείκτης πλαστικότητας και η συστολή ξήρανσης μειώθηκαν με την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής στάχτης στο μίγμα. Οι ερευνητές όρισαν ως ιδανικούς δείκτες για ποιοτικά κεραμικά 20-40% κ.β. τέφρα, 13-15% υγρασία και όπτηση για 6 ώρες στους 1000°C.

Έρευνες έχουν δείξει ότι η προσθήκη οργανικής ύλης στην παρασκευή κεραμικών έχει τις εξής επιπτώσεις: Τα οργανικά συστατικά καίγονται, εν μέρει, με αποτέλεσμα την έκλυση θερμότητας και την ελευθέρωση αερίων υδρογονανθράκων, σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 350°C. Η διάσπαση και η καύση αυτών των οργανικών ουσιών γίνεται αργά και εξαρτάται από την ίδια τους τη φύση. Το φαινόμενο αυτό καθυστερείται από τη διάσπαση των αργλικών ορυκτών και από το χαμηλό πορώδες που έχει το κεραμικό σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μικρή περιεκτικότητα οργανικής ύλης μπορεί να θεωρηθεί θετικός παράγοντας στην όπτηση του κεραμικού προϊόντος, διότι με την οξείδωση των οργανικών, παράγεται θερμότητα. Αντίθετα, περιεκτικότητα σε οργανική ύλη μεγαλύτερη από 5%, αρχίζει να προκαλεί δυσκολίες όπως είναι η ελάττωση του ειδικού βάρους, και η αύξηση

απώλειας πύρωσης. Επισημαίνεται επίσης ότι στην παρουσία άνθρακα στην αργλική πρώτη ύλη αποδίδεται εν μέρει ο σχηματισμός *black core* στο εσωτερικό του κεραμικού σώματος, δηλαδή ενός σκουρόχρωμου πυρήνα, ο οποίος θα μπορούσε να δημιουργηθεί και λόγω ημιτελούς υαλοποίησης.

Ο πειραματικός χαρακτηρισμός κεραμικών δοκιμίων με πρόσθετο λυματολάσπης ως προς την σύσταση, τις φυσικές και τις μηχανικές ιδιότητες αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Τα αποτελέσματα της έρευνας δύνανται να συμβάλουν στην κατεύθυνση πιστοποίησης των καινοτόμων αυτών υλικών ώστε τελικώς να συγκαταλέγονται στην ευρεία γκάμα έργων πολιτικού μηχανικού.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Το πειραματικό πρόγραμμα περιλαμβάνει την παρασκευή δοκιμίων από πηλό με κύριο συστατικό την ακατέργαστη άμμο αργιλο-πυριτικής σύστασης και με προσθήκη ξηραμένης, οργανικής προέλευσης, λυματολάσπης σε ποσοστά, τα οποία και αποτελούν τη βασική μεταβλητή. Τα ποσοστά αντικατάστασης της άμμου από ιλύ ορίζονται σε 0% (δοκίμια – μάρτυρες), 2%, 4%, 6% και 8%. Η αναλογία νερού προς στερεά υλικά θεωρείται σταθερή για όλα τα μίγματα, ίση με 20%. Οι εκατοστιαίες αναλογίες των υλικών κατά βάρος περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1. Στις δύο τελευταίες στήλες του Πίνακα 1 δηλώνονται οι πραγματικές αναλογίες που τελικώς επετεύχθησαν κατά την μίξη ενώ η σύνθεση V επαναλήφθηκε διότι συνέβη υπέρβαση του νερού μίξης.

Πίνακας 1. Συνθέσεις πιλοτικού πειραματικού προγράμματος

A/A σύνθεσης	Νερό / στερεά	Άργιλος (%)	Ιλύς (%)	Ιλύς / άργιλος	Νερό / στερεά	Ιλύς / άργιλος
I		100	0	0.000	0,19	0,00
II		98	2	0.020	0,20	0,02
III	0.2	96	4	0.042	0,19	0,04
IV		94	6	0.064	0,19	0,06
V _α		92	8	0.087	0,24	0,08
V _β		92	8	0.087	0,21	0,08

Η βασική πρώτη ύλη (δηλαδή η άργιλος) παραχωρήθηκε από τις αποθέσεις του Εργοστασίου Κοθάλη Α.Ε., οι οποίες βρίσκονται στα χωριά Γέροντας, Κεχρόκαμπος και Μορσίνη των Νομών Καβάλας και Ξάνθης. Τυπική χημική ανάλυση των συστατικών του χώματος που χρησιμοποιεί το Εργοστάσιο για την παρασκευή οπτόπλινθων δίδεται στον Πίνακα 2. Η μέγιστη διάμετρος των κόκκων της άμμου είναι 1.00mm. Η κονιορτοποίηση

επιτυγχάνεται με τη διέλευση του υλικού σε αντιστρόφως περιστρεφόμενα τύμπανα που απέχουν απόσταση 1mm. Από εργαστηριακές μετρήσεις προέκυψε ότι το υλικό διέθετε φυσική υγρασία περί τα 10%, η οποία ωστόσο ελαχιστοποιήθηκε κατά την παραμονή του δείγματος στο εργαστήριο. Συνεπώς κατά την φάση των αναμιξεων δεν ελήφθη υπόψη στο απαιτούμενο νερό.

Πίνακας 2 – Τυπική χημική σύσταση αργιλικής άμμου

Συστατικό	Ποσοστό κ.β. (%)	Συστατικό	Ποσοστό κ.β. (%)
SiO ₂	29.98	K ₂ O	1.44
Al ₂ O ₃	6.99	MnO	0.05
Fe ₂ O ₃	2.14	CaCO ₃	50.00
CaO	28.00	MgCO ₃	4.18
MgO	1.99	C	0.34
Na ₂ O	1.35		

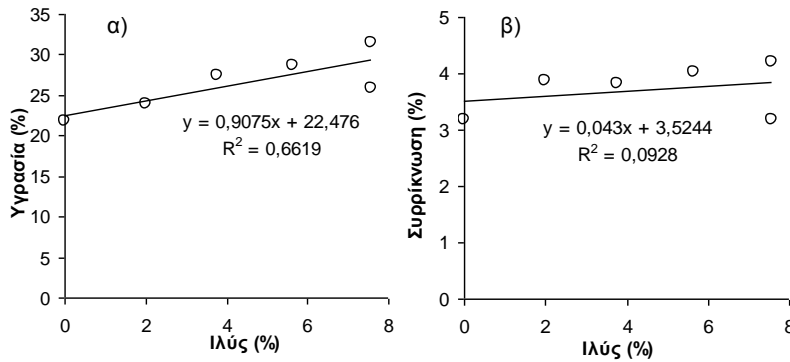
Η χρησιμοποιηθήσα λυματολάσπη ελήφθη από μονάδα βιολογικού καθαρισμού (ΔΕΥΑ Κομοτηνής). Προήλθε από διεργασίες πάχυνσης και αφυδάτωσης του πρωτογενούς υλικού αρχικής υγρασίας περίπου 85%. Η ξήρανση του υλικού πραγματοποιήθηκε σε δύο θερμοκηπιακές μονάδες συνολικού όγκου 15 m³. Ορισμένα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της ξηραμένης λυματολάσπης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 – Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ξηραμένης λυματολάσπης

Φυσικές ιδιότητες	κ.β. (%)	Βαρέα μέταλλα	mg/Kg ξηρ. μάζας
Υγρασία	6,3	Cu	216
		Mn	322
Ξηρή μάζα	93,7	Cr	29
		Ni	36
		Zn	809
Πτητικά στερεά (% ξηρής μάζας)	71,8	Fe	6509
		Cd	2

2.1 Γεωμετρία Δοκιμών

Οι διαστάσεις των πρισματικών δοκιμών ορίσθηκαν σε 20 x 20 x 152 mm (ύψος x πλάτος x μήκος) έπειτα από διάφορες δοκιμές ξήρανσης και



Εικόνα 1. Συσχέτιση α) υγρασίας και β) συρρίκνωσης με το ποσοστό συμμετοχής της ιλύος

όπτησης με ζητούμενο την ελάχιστη βλάβη στην δομή του δοκιμίου λόγω μικρορηγματώσεων. Για κάθε μία από τις πέντε συνθέσεις του Πίνακα 1 παρασκευάστηκαν δέκα πανομοιότυπα δοκίμια. Η διαδικασία ανάμειξης περιέλαβε την ομογενοποίηση των στερεών συστατικών και στη συνέχεια την προσθήκη του νερού. Η ανάμειξη έγινε με το χέρι και διήρκεσε περί τα δέκα λεπτά. Το αποτέλεσμα κάθε φορά ήταν ένα πλαστικός, αλλά όχι πολύ υδαρής πηλός. Ακολούθως τοποθετήθηκε σε μεταλλικό τελάρο για να πάρει το επιθυμητό σχήμα.

2.2 Διαδικασία Ξήρανσης

Τα δέκα πρισματικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν από κάθε σύνθεση, αφού πρωτίστως ζυγίσθηκαν, τοποθετήθηκαν σε φούρνο για 24 ώρες σε θερμοκρασία 100°C. Μετά το πέρας του σταδίου ξήρανσης, δηλαδή της εξαίτησης του φυσικά δεσμευμένου νερού, έγιναν μετρήσεις των διαστάσεων αλλά και του βάρους ώστε να εκτιμηθεί η συρρίκνωση αλλά και η πραγματική υγρασία αντιστοίχως κατά την μετάβαση από την υγρή στην ξηρή κατάσταση. Στον Πίνακα 4 δίδονται μέσες τιμές από μετρήσεις βαρών στην υγρή και ξηρή κατάσταση (W_{wet} , W_{dry} αντίστοιχα) και τελικού μήκους (L'). Δίδονται επίσης υπολογισμοί της υγρασίας (H) και της συρρίκνωσης (S) βάσει των ακόλουθων σχέσεων:

$$H = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} (\%) \quad (1)$$

$$S = \frac{L_o - L'}{L_o} (\%), \text{ όπου } L_o = 152\text{mm} \quad (2)$$

Πίνακας 4 – Μετρήσεις υγρασίας και συρρίκνωσης

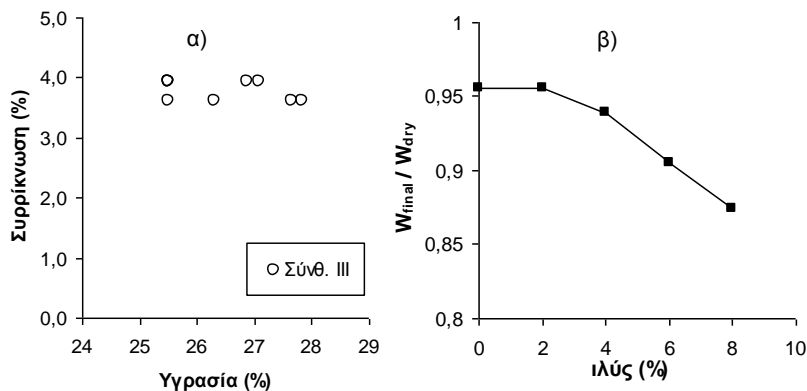
Σύνθεση	W_{wet} (gr)	W_{dry} (gr)	H (%)	L (mm)	S (%)
I	128.1	105.2	21.78	14.72	3.19
II	116.7	94.2	23.89	14.61	3.88
III	121.7	95.6	27.38	14.62	3.82
IV	119.7	93.2	28.59	14.59	4.04
V_{α}	118.2	89.9	31.43	14.56	4.19
V_{β}	119.73	95.09	25.92	14.72	3.17

Δεδομένου ότι η υγρασία δεν συμπίπτει με το νερό μίξης (Πίνακας 1, 6^η στήλη) συμπεραίνεται εύκολα ότι τα στερεά υλικά, και κυρίως η άργιλος, διαθέτουν εγγενή υγρασία κατά την μίξη. Στην Εικόνα 1 δίδεται υπό μορφή γραφήματος η σχέση μεταξύ υγρασίας – υλός και συρρίκνωσης – υλός καθώς και η μέση γραμμή που προσεγγίζει τις μετρήσεις του Πίνακα 4. Γίνεται αντιληπτό από την Εικόνα. 1(α) ότι η αύξηση της υλός στην σύνθεση απαιτεί αύξηση της υγρασίας προκειμένου ο πηλός να έχει την ίδια εργασιμότητα και πλαστικότητα. Βεβαίως αυτή η παρατήρηση πιθανόν να μην ισχύει στην περίπτωση παραγωγής τέτοιων υλικών από εργοστασιακές μονάδες, οι οποίες παράγουν οπτόπλινθους όχι χειροποίητα αλλά εφαρμόζοντας πίεση για την αφαίρεση του εγκλωβισμένου αέρα με χρήση vacuum (π.χ. extruder). Επιπλέον, η επίδραση της υλός στην συρρίκνωση για τις πέντε συνθέσεις που μελετήθηκαν είναι ελαφρώς αυξητική, από 3.2% για τα δοκίμια – μάρτυρες σε περίπου 4% για όλες τις άλλες συνθέσεις. Σημειώνεται ότι η μέτρηση της υγρασίας και της συρρίκνωσης χαρακτηρίζεται από διακύμανση τιμών ως προς τα δοκίμια της ίδιας σύνθεσης, με το φαινόμενο να είναι εντονότερο στην περίπτωση της πρώτης ιδιότητας ως αποτέλεσμα του χειροποίητου τρόπου παρασκευής των δοκιμίων (βλ. Εικόνα 2(α)).

2.3 Διαδικασία Όπτησης

Η διαδικασία παραγωγής κεραμικών δοκιμίων ολοκληρώθηκε με την όπτηση των δοκιμίων σε φούρνο ικανότητας 1000°C. Το πρωτόκολλο όπτησης που εφαρμόστηκε περιλαμβάνει τρία θερμοκρασιακά στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο η θερμοκρασία αυξάνει σταδιακά από 25°C σε 900°C σε χρονική περίοδο δέκα ωρών. Κατά το δεύτερο στάδιο η θερμοκρασία διατηρείται στους 900°C για μία ώρα οπότε και συμβαίνει υαλοποίηση του αργιλικού μείγματος. Στο τελικό στάδιο η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά στους 25°C σε χρονικό διάστημα 24 ωρών. Κατά την όπτηση τα δοκίμια απέκτησαν σκούρο κεραμιδί χρώμα, χαρακτηριστικό της υαλοποίησης του πηλού.

Τα δοκίμια μετά την εξαγωγή τους από τον φούρνο και αφού απέκτησαν θερμοκρασία δωματίου ζυγίστηκαν εκ νέου προκειμένου να μετρηθεί το



Εικόνα 2. α) Διακύμανση μετρήσεων και β) – Συσχέτιση μείωσης βάρους δοκιμίου και ποσοστού λυματολάσπης

τελικό τους βάρος (W_{final}), το οποίο είναι μικρότερο του ξηρού βάρους (W_{dry}) ως συνέπεια της καύσης της οργανικής ιλύος. Στο γράφημα της Εικόνας 2(β), ο κατακόρυφος άξονας δηλώνει τον λόγο τελικού βάρους προς ξηρό βάρος ενώ ο οριζόντιος το ποσοστό συμμετοχής της ιλύος στην σύνθεση. Οι πέντε τιμές είναι ο μέσος όρος έξι μετρήσεων ανά σύνθεση. Αυτό που προκύπτει είναι ότι όσο αυξάνει το ποσοστό της ιλύος στην σύνθεση τόσο μειώνεται το τελικό βάρος του δοκιμίου και αυτό διότι η ιλύς, ως οργανική ύλη κυρίως, στις υψηλές θερμοκρασίες καίγεται προς CO_2 αφήνοντας αντ' αυτής πόρους στην δομή. Με τον τρόπο αυτό ενώ το δοκίμιο διατηρεί τον εξωτερικό του όγκο έχει μειωμένο βάρος, ευνοώντας ιδιότητες όπως η θερμοπερατότητα και η ηχομόνωση (αυξητικά) αλλά και το ίδιο βάρος τοιχοπληρώσεων (μειωτικά), αν το υλικό αυτό εφαρμοσθεί σε συμβατικές κατασκευές για την δόμηση τοιχοπληρώσεων. Αξιοσημείωτη είναι η έντονα γραμμική μείωση του βάρους για ποσοστά συμμετοχής ιλύος από 4% και άνω κάτι που δεν διαφαίνεται για την περιοχή 0 – 2%.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν σε μέτρηση φυσικών ιδιοτήτων όπως είναι η υδατοαπορρόφηση και το πορώδες αλλά και μηχανικών ιδιοτήτων όπως είναι η εφελκυστική αντοχή, η οποία επηρεάζεται κυρίως από το πορώδες.

3.1 Φυσικές Ιδιότητες: Υδατοαπορρόφηση και Ποσοστό Κενών

Για τον προσδιορισμό της υδατοαπορρόφησης καθώς και του ποσοστού κενών, ελήφθησαν τέσσερα ψημένα δοκίμια από κάθε ομάδα, τα οποία

συντηρήθηκαν σε θερμοκρασία 100°C για ικανό χρονικό διάστημα ώστε να απωλέσουν την τυχούσα υγρασία κατά την παραμονή τους στο εργαστήριο. Μετά από δύο διαδοχικές ζυγίσεις με διαφορά μίας ώρας προέκυψε ότι έχει σταθεροποιηθεί το βάρος τους οπότε τα δοκίμια θεωρήθηκαν ξηρά. Οι μετρήσεις βάρους καταγράφηκαν ως W_{final} (οι τιμές προέκυψαν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο γράφημα της Εικόνας 2(β)). Στην συνέχεια τα δοκίμια βυθίστηκαν σε δοχείο με νερό ώστε να καλύπτονται πλήρως αλλά και να επιτρέπεται η ελεύθερη ροή του νερού στην περιφέρειά τους αλλά και στο μεταξύ τους διάστημα. Παρέμειναν στο νερό για διάστημα δύο ωρών ώστε να περιέλθουν σε κορεσμένη κατάσταση. Έπειτα, αφού αφαιρέθηκαν από το δοχείο και απομακρύνθηκε το επιφανειακό νερό με τη βοήθεια απορροφητικού χαρτιού, καταγράφηκε το κορεσμένο βάρος τους ως W_{sat} . Ακολούθως, δίδονται οι μαθηματικές εκφράσεις προσδιορισμού των ανωτέρω φυσικών ιδιοτήτων:

$$\text{Υδατοαπορρόφηση: } W = \frac{W_{sat} - W_{final}}{W_{sat}} \cdot 100\% \quad (3)$$

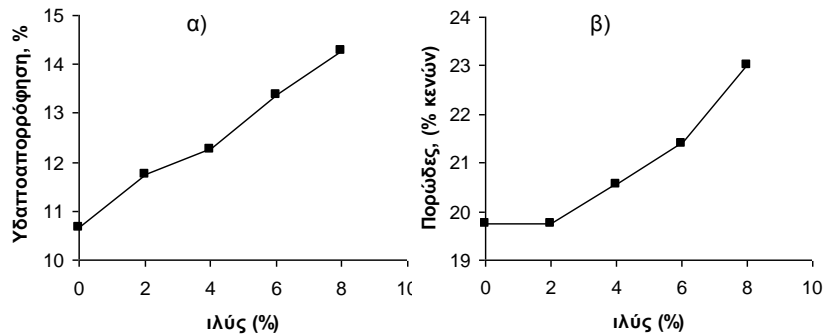
$$\text{Ποσοστό κενών: } P = \frac{W_{sat} - W_{final}}{\rho_w \cdot L \cdot h \cdot b} \cdot 100\% \quad (4)$$

όπου $\rho_w = 1 \text{ gr/cm}^3$ το ειδικό βάρος του νερού, L , h και b αντίστοιχα το μήκος, το πλάτος και το ύψος του δοκιμίου σε cm. Από την Εικόνα 3(α) προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ υδατοπορρόφησης και ποσοστού συμμετοχής λυματολάσπης είναι σχεδόν γραμμική. Η αύξηση αυτού του δείκτη σε σχέση με τα δοκίμια – μάρτυρες είναι σχεδόν διπλάσια για την σύνθεση με 8% λυματολάσπη. Βεβαίως αυτή η ιδιότητα δείχνει την ευπάθεια του υλικού σε πρόσληψη υγρασίας και κατ' επέκταση σε ενδεχόμενους κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης και ψύξης – απόψυξης. Και στις δύο περιπτώσεις αν το υλικό αυτό χρησιμοποιηθεί ως οπτόπλινθος σε τοιχοπληρώσεις είναι απαραίτητο το επίχρισμα για την μακροπρόθεσμη προστασία του.

Στην Εικόνα 3(β) απεικονίζεται η επιρροή της λυματολάσπης στο ποσοστό κενών που αποτελεί δείκτη πορώδους. Φαίνεται ότι, αν η συμμετοχή της ύλης διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα (<2%), τότε το τελικό προϊόν έχει ίδιο πορώδες με τα κοινά, αργιλικά δοκίμια. Ωστόσο η αύξηση συμμετοχής από 2% έως 8% δείχνει να έχει παραβολική συσχέτιση με το πορώδες.

3.2 Μηχανικές Ιδιότητες: Καμπτική Εφελκυστική Αντοχή

Οι μη φέρουσες τοιχοπληρώσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ευπαθείς σε διαγώνιο εφελκυσμό κατά την εκδήλωση σεισμικής φόρτισης (ή άλλου τύπου οριζόντιας φόρτισης). Ειδικότερα, κατά την διατμητική στρέβλωση η μία διαγώνιος της τοιχοπλήρωσης αναγκάζεται σε θλίψη και η άλλη σε εφελκυσμό με συνέπεια την διαγώνια χιαστί ρηγμάτωση με την ανακύκλιση της φόρτισης. Η διερεύνηση του πιλοτικού



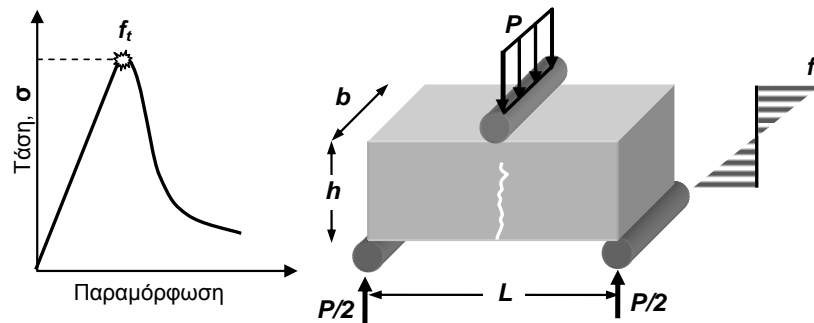
Εικόνα 3. Συσχέτιση ποσοστού ιλύος με α) υδατοαπορρόφηση και β) πορώδες

πειραματικού προγράμματος ολοκληρώνεται με την μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής των δοκιμίων μέσω δοκιμής κάμψης τριών σημείων. Θεωρώντας γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία είναι δυνατή η εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη f_t (βλ. εικόνα 4) μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$f_t = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (MPa) \quad (5)$$

όπου, P το επιβαλλόμενο φορτίο (Nt), L το μήκος μεταξύ σημειακών στηρίξεων, b και h το πλάτος και το ύψος διατομής αντίστοιχα (20mm).

Οι δοκιμές έλαβαν χώρα στο εργαστήριο Δομικών Υλικών του ΔΠΘ με την βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού (μηχανή φόρτισης Controls: Automatic Flexural Tensile Tester L15). Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4, η ροπή είναι εκείνη που οδηγεί το δοκίμιο σε αστοχία. Για δεδομένη ροπή

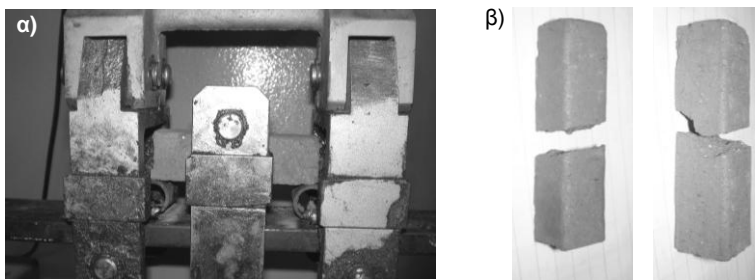


Εικόνα 4. Ορισμός καμπτικής εφελκυστικής αντοχής, γεωμετρία και διάγραμμα ελεύθερου σώματος δοκιμίου υποκείμενου σε κάμψη τριών σημείων

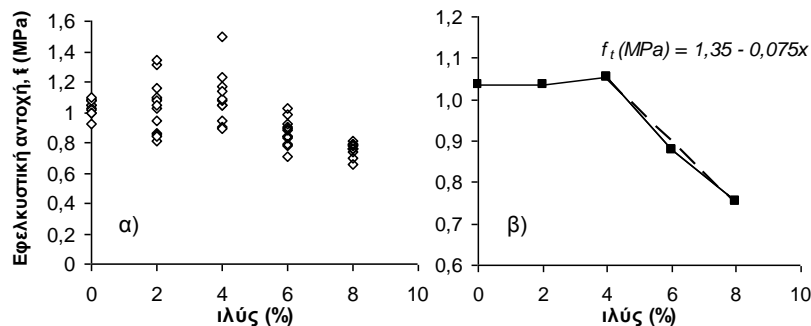
αστοχίας, όσο μεγαλύτερη η απόσταση μεταξύ στήριξης και θέσης επιβολής φόρτισης (δηλ. $L/2$) τόσο μικρότερη γίνεται η απαίτηση σε φορτίο P . Συνεπώς προκειμένου να είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις (δηλ. ικανού μεγέθους P), πέντε με επτά δοκίμια από κάθε σύνθεση χωρίστηκαν στην μέση με την βοήθεια περιστροφικού τροχού ώστε τελικώς να παραχθεί διπλάσιος αριθμός δοκιμίων. Τα δοκίμια προσαρμόστηκαν στο πλαίσιο φόρτισης έτσι ώστε το καθαρό μήκος από στήριξη σε στήριξη να είναι $L=70\text{mm}$. Φωτογραφικό υλικό από την πειραματική διάταξη και την μορφή αστοχίας των δοκιμίων παρατίθεται στην Εικόνα 5.

Η αστοχία του συνόλου των δοκιμίων προήλθε από ψαθυρό διαχωρισμό του στοιχείου σχεδόν στη μέση του ανοίγματος έπειτα από ανάπτυξη καμπτικής ρωγμής στην εφελκυσόμενη περιοχή, η οποία στην αστοχία επεκτάθηκε στην θλιβόμενη ζώνη της διατομής. Υπήρχαν περιπτώσεις όπου η ρωγμή δεν ήταν πλήρως κάθετη στον άξονα του στοιχείου, όπως απαιτεί η θεωρία ελαστικότητας και επιπεδότητας διατομών. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το υλικό ως ανομοιογενές εκδηλώνει την αστοχία στην πιο αδύναμη περιοχή του, εκεί δηλαδή που υπάρχει ασυνέχεια υλικού λόγω πόρων ή / και τριχοειδών ρωγμών.

Από κάθε σύνθεση δοκιμάστηκαν σε καμπτικό εφελκυσμό κατά μέσο όρο 12 δοκίμια. Τα αποτελέσματα δίδονται στο γράφημα της Εικόνας 6. Δεδομένου ότι τα κεραμικά υλικά χαρακτηρίζονται από ψαθυρότητα και η συνοχή της δομής τους καθορίζεται κυρίως από το πορώδες ως συνέπεια είτε της εξάτμισης του νερού μείξης είτε της καύσης της οργανικής ιλύος, είναι επόμενο η εφελκυστική αντοχή, ως ιδιότητα πολύ ευαίσθητη στον ανωτέρω παράγοντα, να παρουσιάζει σημαντική διασπορά στη μέτρησή της. Αυτό φαίνεται στις τιμές της f_t ανά σύνθεση, όπου η μέγιστη μέτρηση μπορεί να είναι έως και διπλάσια της αντίστοιχης ελάχιστης (Εικ. 6(α)). Η μέση εφελκυστική αντοχή, της τάξης του 1 MPa, παραμένει ανεπηρέαστη από την προσθήκη ιλύος για ποσοστά έως και 4%. Ωστόσο, η περαιτέρω αύξηση της ιλύος στην σύνθεση οδηγεί σαφώς σε επιδείνωση της ιδιότητας (πχ. 0.7 MPa για ποσοστό αντικατάστασης της τάξης 8% κατά βάρος).



Εικόνα 5. α) Πρόσθια λήψη πειραματικής διάταξης και β) δοκίμια μετά από ψαθυρή αστοχία: πάντα αναπτύσσεται ρωγμή στο μεσοδιάστημα



Εικόνα 6. α) Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής και β) κατανομή μέσω των τιμών

Λαμβάνοντας τις μέσες τιμές εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη από κάθε σύνθεση κατασκευάζεται το γράφημα της Εικόνας 6(β), όπου για ποσοστά αντικατάστασης ιλύος > 4% δίδεται εξίσωση εκτίμησης εφελκυστικής αντοχής συναρτήσεως της ιλύος για τον δεδομένο τύπο δοκιμίων. Η εξαγόμενη εξίσωση είναι μια πρώτη εκτίμηση, η οποία βασίζεται σε περιορισμένο αριθμό δοκιμών και συνθέσεων. Για την χρήση της ως εργαλείο σχεδιασμού σκοπεύεται η περαιτέρω βαθμονόμησή της με δεύτερο κύκλο πειραμάτων από την ερευνητική ομάδα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικότερα συμπεράσματα μελέτης προσθήκης ιλύος από ξηραμένη λυματολάσπη ως δευτερεύον συστατικό στην παραγωγή κεραμικών δοκιμίων, είναι:

- Η διακύμανση της συρρίκνωσης, που υπολογίζεται ως η μεταβολή του μήκους έκαστου δοκιμίου, είναι περιορισμένη. Τα δοκίμια – μάρτυρες έδωσαν συρρίκνωση της τάξης του 3% ενώ στις λοιπές συνθέσεις η συρρίκνωση έλαβε τιμές σε ένα εύρος από 3.2% έως 4.3%.
- Όσο αυξάνει το ποσοστό ιλύος στην σύνθεση τόσο μειώνεται το τελικό βάρος του δοκιμίου επειδή η οργανική ιλύς, στις υψηλές θερμοκρασίες, καίγεται αφήνοντας πόρους στην δομή. Έτσι, ενώ το δοκίμιο διατηρεί τον εξωτερικό του όγκο έχει μειωμένο βάρος, ευνοώντας ιδιότητες όπως η θερμοπερατότητα και η ηχομόνωση αλλά και το ίδιο βάρος των τοιχοπληρώσεων. Έντονα γραμμική είναι η μείωση βάρους για ποσοστά συμμετοχής > 4% κάτι που δεν διαφαίνεται για το εύρος 0 – 4%.
- Η σχέση υδατοπορρόφησης και ποσοστού συμμετοχής ιλύος είναι σχεδόν γραμμική. Η αύξηση αυτού του δείκτη σε σχέση με τα δοκίμια – μάρτυρες (0%) είναι σχεδόν διπλάσια για την σύνθεση με 8%. Η ιδιότητα δείχνει την ευπάθεια του υλικού σε πρόσληψη υγρασίας και κατ' επέκταση σε ενδεχόμενους κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης και ψύξης – απόψυξης.

- Ως προς το πορώδες, αν η συμμετοχή της ιλύος διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα (<2%) τότε το τελικό προϊόν έχει παρόμοιο πορώδες με τα κοινά αργιλικά δοκίμια. Ωστόσο για εύρος τιμών από 2% έως 8% παρατηρείται παραβολικά αυξητική συσχέτιση με το πορώδες.
- Η εφελκυστική αντοχή, ως ιδιότητα πολύ ευαίσθητη στο πορώδες του λιθώματος, παρουσιάζει σημαντική διασπορά στην μέτρησή της. Η μέση εφελκυστική αντοχή (≈ 1 MPa), φαίνεται να είναι ανεπηρεάστη από την προσθήκη ιλύος για ποσοστά συμμετοχής έως και 4%, ωστόσο η περαιτέρω αύξηση οδηγεί σαφώς σε επιδείνωση της ιδιότητας, έως και σε 0.7 MPa για ποσοστό συμμετοχής 8% κ.β.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα έλαβε χώρα στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος ΑΜΘ 8 «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Ιλύος Εγκαταστάσεων Αστικών Λυμάτων και Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων με Φυσικά Συστήματα», με επιστημονικά υπεύθυνο τον Καθ. του Τμ. Μηχ. Περιβάλλοντος ΔΠΘ Β.Α. Τσιχριντζή και χρηματοδότηση από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ). Εταίροι στο έργο ήταν η ΔΕΥΑ Κομοτηνής και η Αναπτυξιακή Ροδόπης. Οι εργασίες πραγματοποιήθηκαν στα Εργαστήρια Διαχείρισης και Τεχνολογίας Υγρών Αποβλήτων και Δομικών Υλικών του ΔΠΘ. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται στην Επίκουρη Καθηγήτρια του ΔΠΘ κα. Σάββα Αθηνά.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Shih-Cheng Pan, Dyi-Hwa Tseng, Chih-Chiang Lee, Chau Lee. "Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties". Cement and Concrete Research, Vol. 33, (2003) 1749-1754.
- Monzo J., Paya J., Borrachelo M.V. and Corcoles A. "Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars". Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 9, (1996) 1389-1398.
- K.L. Lin, K.Y. Chiang, C.Y. Linc. "Hydration characteristics of waste sludge ash that is reused in eco-cement clinkers". Cement and Concrete Research, Vol. 35, (2005)1074-1081.
- Wang K.S., Chiou I.J., Chen C.H., Wang D. "Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash". Elsevier Construction and Building Materials, Vol 19, (2005) 627-633
- Jordan M.M., Almendro-Candel M.B., Romero M., Rincon J. Ma. "Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tile bodies". Applied Clay Science, Vol. 30, (2005) 219-224.
- Cusido J.A., Cremades L.V., Gonzalez M. "Gaseous emissions from ceramics manufactured with urban sewage sludge during firing processes". Waste Management, Vol. 23, (2003) 273-280.
- Lin Deng-Fong and Weng Chih-Huang. "Use of sewage sludge ash as brick material". ASCE Journal of Environmental Engineering, V. 127, No. 10, (2001) 922-927.

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Formatted: Greek