

# Συσχέτιση της αντοχής του κισηροδέματος με τον λόγο ενεργού νερού προς τσιμέντο

## A correlation of pumice concrete strength with water to cement ratio

Βασίλης ΚΑΛΟΪΔΑΣ<sup>1</sup>

*Λέξεις κλειδιά: κισηρόδεμα, αντοχή, ενεργό νερό, pumice concrete, strength, effective water*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Σε αντίθεση με τα αδρανή κανονικού βάρους, η κίσηρη (ελαφρόπετρα) είναι ελαφροβαρές αδρανές με ανοικτό πορώδες και μεγάλη τιμή απορροφητικότητας. Κατά την ανάμιξη των συστατικών του κισηροδέματος (τσιμέντο, κίσηρη, νερό) με μη προ-κεκορεσμένη κίσηρη το νερό δεν απορροφάται έως κορεσμού στην πορώδη δομή της κίσηρης με αποτέλεσμα ο υπολογισμός της περιεκτικότητας του νωπού κισηροδέματος σε ενεργό νερό να μην είναι άμεσος. Στην παρούσα εργασία γίνεται έμμεση εκτίμηση του λόγου του ενεργού νερού προς τσιμέντο σε συσχέτιση με την αντοχή του σκληρυμένου κισηροδέματος σε εργαστηριακά και βιομηχανικά αναμίγματα.

**ABSTRACT:** When mixing cement and water with unsaturated pumice a portion of water in the paste (water and cement) is absorbed into the pumice grains without reaching saturation. In this work, the ratio of effective water to cement is estimated indirectly in wet pumice concrete mixtures (laboratory and industrial) using a correlation with the strength of hardened pumice concrete.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος ένα μέρος της μάζας του νερού, που προστίθεται, απορροφάται στους πόρους των αδρανών όταν αυτά δεν είναι ήδη κορεσμένα. Έτσι ισχύει το ισοζύγιο μάζας που περιγράφεται από την Εξίσωση 1:

$$w_{eff} = w_{add} + w_m - w_f \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> Προϊστάμενος ποιότητας αδρανών και σκυροδέματος, ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ, e-mail: vasilis.kaloidas@lafargeholcim.com

όπου:

$w_{eff}$ : μάζα του ενεργού νερού, δηλ. νερού που παραμένει στην φάση της τσιμεντόπαστας μετά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος, ανηγμένη σε  $1 \text{ m}^3$  νωπού σκυροδέματος,  $\text{kg/m}^3$

$w_{add}$ : μάζα νερού που προστίθεται στο ανάμιγμα, ανηγμένη σε  $1 \text{ m}^3$  νωπού σκυροδέματος,  $\text{kg/m}^3$

$w_m$ : μάζα του νερού που περιέχεται ως υγρασία στα αδρανή πριν την ανάμιξη, ανηγμένη σε  $1 \text{ m}^3$  νωπού σκυροδέματος,  $\text{kg/m}^3$

$w_f$ : η συνολική μάζα του νερού που περιέχεται στα αδρανή μετά την ανάμιξη, ανηγμένη σε  $1 \text{ m}^3$  νωπού σκυροδέματος,  $\text{kg/m}^3$

Στην περίπτωση των αδρανών κανονικού βάρους θεωρείται ότι κατά την ανάμιξη απορροφάται μέχρι κορεσμού μέρος από το προστιθέμενο στο ανάμιγμα νερό. Έτσι ισχύει:

$$w_f = w_{sat} \quad (\text{συνήθη αδρανή κανονικού βάρους}) \quad (2)$$

όπου:

$w_{sat}$ : μάζα του νερού που περιέχεται στα κεκορεσμένα αδρανή, ανηγμένη σε  $1 \text{ m}^3$  νωπού σκυροδέματος,  $\text{kg/m}^3$

Στην περίπτωση συνήθων αδρανών κανονικού βάρους, τα μεγέθη  $w_{add}$ ,  $w_m$  και  $w_{sat}$  είναι γνωστά εκ σχεδιασμού ή από εργαστηριακές μετρήσεις και υπολογίζεται το  $w_{eff}$  από τις Εξισώσεις 1 και 2.

Σε αντίθεση με τα αδρανή κανονικού βάρους, η κίσηρη (ελαφρόπετρα) είναι ελαφροβαρές αδρανές με ανοικτό πορώδες και μεγάλη τιμή απορροφητικότητας. Στην περίπτωση χονδρόκοκκου υλικού η απορροφητικότητα με την εφαρμογή κενού φθάνει έως 50% m/m σε ξηρή βάση (= 33% m/m σε υγρή βάση). Δηλ. 100 kg ξηρής χονδρόκοκκης κίσηρης απορροφούν έως και 50 kg νερό. Κατά την ανάμιξη των συστατικών του κίσηροδέματος η κίσηρη δεν απορροφά νερό μέχρι κορεσμού επειδή:

- Μέρος του αέρα που περιέχεται στην κίσηρη δεν απομακρύνεται αμέσως, αλλά εγκλωβίζεται στους πόρους από το ήδη απορροφημένο νερό

εμποδίζοντας την περαιτέρω απορρόφηση ή μειώνοντας σημαντικά τον ρυθμό απορρόφησης.

- Υπάρχει κατανομή μεταξύ των περιεκτικοτήτων του νερού που τελικά απορροφάται από την κίσηρη και του νερού που περιέχεται στην τσιμεντόπαστα (ανάμιγμα νερού και τσιμέντου)

Επειδή το νερό κατά την ανάμιξη του κισηροδέματος δεν απορροφάται μέχρι κορεσμού της κίσηρης ισχύει:

$$w_f < w_{sat} \quad (\text{κίσηρη}) \quad (3)$$

Το μέγεθος  $w_f$  δεν είναι μετρήσιμο εκ των προτέρων με αποτέλεσμα ο υπολογισμός της περιεκτικότητας του νερού κισηροδέματος σε ενεργό νερό να μην είναι άμεσος.

Ο λόγος ενεργού νερού προς τσιμέντο έχει σημαντική επίδραση στην εργασιμότητα, στην αντοχή και στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Η αντοχή και ο λόγος ενεργού νερού προς τσιμέντο συσχετίζονται μεταξύ τους με τις «παραδοσιακές» ή τροποποιημένες σχέσεις Abrams, Feret ή Bolomey (Li 2011, Mehta 2006, Neville 1995, Popovics 1998, Soroka 1979).

Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται έμμεσα ο λόγος του ενεργού νερού προς τσιμέντο σε συσχέτιση με την αντοχή του σκληρυμένου κισηροδέματος με την χρήση της σχέσης Bolomey.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι συνθέσεις των 11 αναμιγμάτων δομικού κισηροδέματος και οι ιδιότητές τους που αφορούν στην παρούσα εργασία. Τα αναμίγματα 6137 και 6700 είναι εργαστηριακά (όγκου 50 Lt) και τα υπόλοιπα εννέα (όγκου 2 έως 3,25 m<sup>3</sup>) παρασκευάστηκαν σε μονάδα ετοιμού σκυροδέματος της Lafarge Beton στα πλαίσια του ερευνητικού έργου 716-BET-2013 «Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη» (Καλοϊδάς, 2016). Χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω πρώτες ύλες:

- Τσιμέντο: CEM II /B-M (P-W-L) 42,5 ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ
- Κίσηρη 0/8: ΛΑΒΑ ΑΕ. Χρησιμοποιήθηκε η εξορυσσόμενη στην Ελλάδα κίσηρη από ΛΑΒΑ ΑΕ με την φυσική της υγρασία. Δεν πραγματοποιήθηκε

προ-κορεσμός με νερό. Κοκκομετρική κατανομή (EN 933-1): P 8 mm 99,4%, P 4 mm 80,2%, P 2 mm 56,9%, P 1 mm 40,4%, P 0,25 mm 22,8%, P 0,075 mm 15,0%.

- Πρόσθετα σκυροδέματος: Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια πρόσθετα με εκείνα της παραγωγής σκυροδέματος κανονικού βάρους. Επιβραδυντής – ρευστοποιητής EN 934-2 T.10, Υπερρευστοποιητής EN 934-2 T.3.1 & T.3.2, T.11.1 & T.11.2
- Μεταλλικές ίνες: Τα αναμίγματα 15517 f65, 15488 f40 και NTUA 15613 f40 περιείχαν χαλύβδινες ίνες (EN 14889-1/2006) μήκους 60 mm και διαμέτρου 1 mm με κεκαμμένα άκρα.

Από τα αναμίγματα δειγματίστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, τα οποία συντηρήθηκαν σε υγρό θάλαμο θερμοκρασίας 19-21 °C και σχετικής υγρασίας μεγαλύτερης από 95%.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται διαδοχικά, στις σειρές 3 έως 12, τα πειραματικά δεδομένα των αναμιγμάτων: η περιεκτικότητα του κισηροδέματος σε τσιμέντο, σε ξηρή κίσηρη και σε μεταλλικές ίνες, η υγρασία της κίσηρης σε ξηρή βάση (από 11,1 έως 40,8%), η περιεκτικότητα του κισηροδέματος σε νερό το οποίο προέρχεται από την υγρασία της κίσηρης, η περιεκτικότητα σε νερό που προστέθηκε για την παρασκευή του αναμιγματος, η περιεκτικότητα σε ολικό νερό, οι αντίστοιχοι λόγοι προστιθέμενου νερού προς τσιμέντο και ολικού νερού προς τσιμέντο και η μέση τιμή της αντοχής 2 έως 5 δοκιμίων από κάθε ανάμιγμα στην ηλικία των 28 ημερών.

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

Στα επόμενα περιγράφεται συνοπτικά η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση του λόγου  $w_{eff}/c$ .

Όπου:

$c$  : μάζα του τσιμέντου που περιέχεται σε 1 m<sup>3</sup> νωπού σκυροδέματος, kg/m<sup>3</sup>

Θεωρούμε ότι η περιεκτικότητα του νερού στην κίσηρη μετά την ανάμιξη των συστατικών του κισηροδέματος εξαρτάται γραμμικά από δύο μεγέθη:

- από την ήδη περιεχόμενη υγρασία στην κίσηρη, η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μικρότερο είναι το δυναμικό απορρόφησης

Πίνακας 1 Αναμίγματα κισηροδέματος και αποτελέσματα

	σύμ- βολο		Αναμίγματα										
			6137	6700	14046 p	14047 p	14048 p	15151 p	15517 f65	15428 p	NTUA 15538 p	15488 f40	NTUA 15613 f40
CEM II42,5	<i>c</i>	kg/m <sup>3</sup>	375	375	387	394	400	390	414	406	443	423	430
κίσηρη 0-8 ως ξηρή	<i>p</i>	kg/m <sup>3</sup>	861	861	813	913	893	803	858	854	876	856	901
μεταλλικές ίνες		kg/m <sup>3</sup>							65			42	42
υγρασία κίσηρης σε ξηρή βάση	<i>p<sub>m</sub></i>	%	29,7	19,9	11,1	11,1	11,1	40,8	28,2	31,8	25,5	35,3	22,2
νερό από την υγρασία της κίσηρης		kg/m <sup>3</sup>	256	171	90	101	99	328	242	271	223	302	200
προστιθέμενο νερό	<i>w<sub>add</sub></i>	kg/m <sup>3</sup>	144	158	296	227	266	142	125	120	147	124	156
ολικό νερό	<i>w<sub>tot</sub></i>	kg/m <sup>3</sup>	400	329	386	329	365	470	367	391	371	426	356
<i>w<sub>add</sub>/c</i>		kg/m <sup>3</sup>	0,38	0,42	0,77	0,58	0,67	0,36	0,30	0,30	0,33	0,29	0,36
<i>w<sub>tot</sub>/c</i>		kg/m <sup>3</sup>	1,06	0,88	1,00	0,83	0,91	1,21	0,89	0,96	0,84	1,01	0,83
μετρούμενη θλιπτική αντοχή 28 ημ.	<i>S<sub>con meas</sub></i>	MPa	30,4	38,9	22,0	30,5	26,5	29,8	37,9	33,5	37,7	34,7	34,4
τελική περιεκτικότητα νερού στην κίσηρη σε ξηρή βάση	<i>P<sub>f</sub></i>	%	32,6	25,6	26,4	22,1	24,1	41,2	29,6	32,3	28,1	35,1	26,2
<i>w<sub>eff</sub>/c</i>		kg/m <sup>3</sup>	0,32	0,29	0,44	0,32	0,38	0,36	0,27	0,28	0,28	0,30	0,28
υπολογιζόμενη θλιπτική αντοχή 28 ημ.	<i>S<sub>con calc</sub></i>	MPa	32,1	35,2	22,3	31,5	26,7	28,1	37,4	35,9	36,4	34,3	36,5
<i>c/w<sub>eff</sub> – 0,5</i>			2,66	2,95	1,75	2,60	2,16	2,29	3,15	3,02	3,06	2,86	3,07

- την ποσότητα του προστιθέμενου νερού, η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό απορρόφησης στην κίσηρη

Ετσι διατυπώνεται μια γραμμική σχέση:

$$p_f = p_m + a * p_m + b * w_{add} / c \quad (4)$$

όπου:

$p_f$  : περιεκτικότητα του νερού στην κίσηρη μετά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος, % m/m σε ξηρή βάση

$p_m$  : αρχική υγρασία της κίσηρης, % m/m σε ξηρή βάση

$a, b$  : παράμετροι γραμμικής σχέσης

Το  $w_f$  υπολογίζεται από την Εξίσωση 5:

$$w_f = (p_f / 100) * \rho \quad (5)$$

όπου:

$\rho$  : μάζα ξηρής κίσηρης που περιέχεται σε 1 m<sup>3</sup> νωπού σκυροδέματος, kg/m<sup>3</sup>

Για σκυρόδεμα με αδρανή κανονικού βάρους, η αντοχή του σκυροδέματος και ο λόγος ενεργού νερού προς τσιμέντο συσχετίζονται πολύ καλά με την σχέση Bolomey (Lafarge, Popovics 1998):

$$S_{con} = S_{cem} * A * [c / w_{eff} - 0,5] \quad (6)$$

όπου:

$S_{con}$ : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, MPa

$S_{cem}$ : θλιπτική αντοχή τσιμέντου στην ίδια ηλικία, MPa

$A$ : συντελεστής σχετιζόμενος με την ποιότητα των αδρανών όπως στον Πίνακα 2

Θεωρούμε ότι ισχύει ο νόμος Bolomey για τα κισηροδέματα τροποποιημένος κατά την σταθερά  $M$ :

$$S_{con} = S_{cem} * A * [c / w_{eff} - 0,5] + M \quad (7)$$

Πίνακας 2 Ενδεικτικές τιμές συντελεστή  $A$

Ποιότητα αδρανών	Μέγεθος αδρανών, mm		
	$D < 16$	$25 < D < 40$	$D > 63$ mm
Εξαιρετή	0,55	0,60	0,65
Καλή	0,45	0,50	0,55
Αποδεκτή	0,35	0,40	0,45

Από τις Εξισώσεις 1, 4, 5 και 7 έχουμε:

$$S_{con} = S_{cem} * A * \{c/[w_{add} - (a * p_m + b * w_{add}/c) / 100 * p] - 0,5\} + M \quad (8)$$

Σε κάθε ανάμιγμα κισηροδέματος είναι γνωστές πειραματικά οι μεταβλητές  $S_{con}$ ,  $S_{cem}$ ,  $c$ ,  $w_{add}$ ,  $p_m$ , και  $p$ . Η αντοχή του τσιμέντου  $S_{cem}$  που χρησιμοποιήθηκε στα αναμίγματα μετρήθηκε κατά EN 196-1 ίση με 53,0 MPa στην ηλικία των 28 ημερών. Οι παράμετροι  $A$ ,  $M$ ,  $a$  και  $b$  μπορούν να προσδιορισθούν από την Εξίσωση 8 και τα πειραματικά δεδομένα με την χρήση μεθόδου ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών  $SSQ$ :

$$SSQ = \sum (S_{con\ meas} - S_{con\ calc})^2 \quad (9)$$

όπου:

$S_{con\ meas}$ : μετρούμενη αντοχή δοκιμίων αναμιγμάτων, MPa

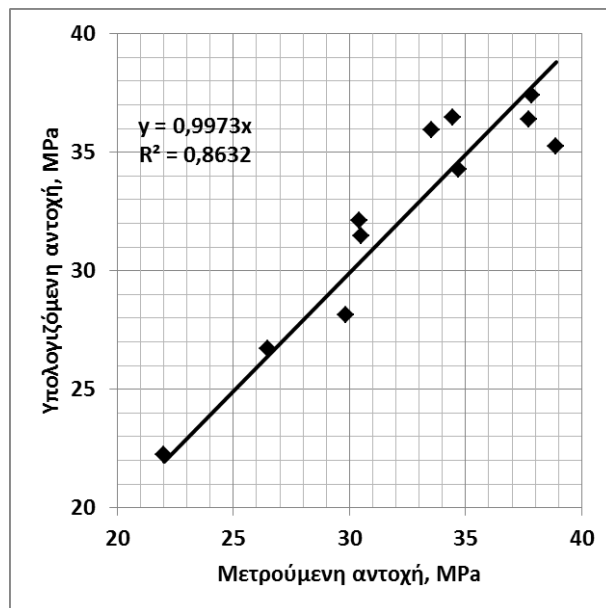
$S_{con\ calc}$ : υπολογιζόμενη αντοχή δοκιμίων αναμιγμάτων, MPa

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των παραμέτρων φαίνονται στον Πίνακα 3.

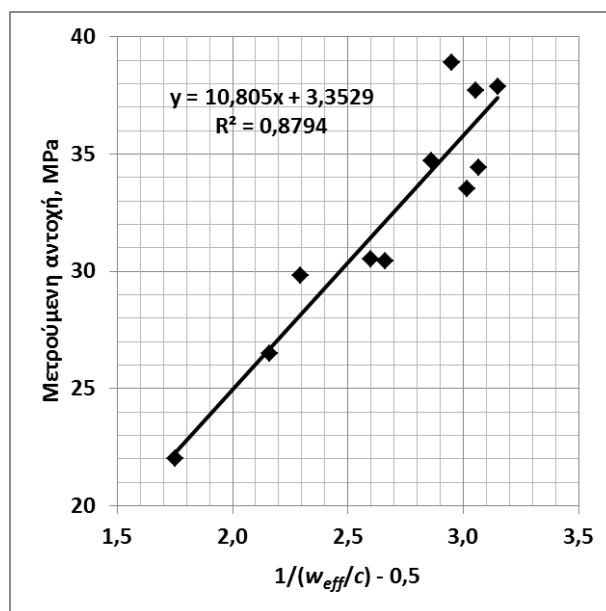
Πίνακας 3 Εκτίμηση των παραμέτρων  $A$ ,  $M$ ,  $a$  και  $b$

$A$	0,204
$M$	3,35
$A$	-0,195
$B$	22,76
$SSQ$	32,3

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η καλή συμφωνία μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών αντοχής με βάση την σχέση Bolomey και στο Σχήμα 2 εμφανίζεται η γραμμικότητα μεταξύ της παραμέτρου  $1/(w_{eff}/c)-0,5$  και της πειραματικής αντοχής των αναμιγμάτων.



Σχήμα 1 Σχέση μετρούμενης και υπολογιζόμενης αντοχής των αναμιγμάτων κισηροδέματος με την χρήση της σχέσης Bolomey



Σχήμα 2 Γραμμικότητα μεταξύ της παραμέτρου  $1/(w_{eff}/c) - 0,5$  της σχέσης Bolomey και της πειραματικής αντοχής των αναμιγμάτων κισηροδέματος



Όπως αναμένεται η παράμετρος  $A$ , η οποία αντιστοιχεί στην συμβολή της κίσηρης στην αντοχή του κισηροδέματος εμφανίζει σημαντικά μικρότερη τιμή (0,204) από εκείνες του Πίνακα 2 που αφορούν αδρανή κανονικού βάρους.

Παρατηρείται επίσης ότι η παράμετρος  $a$  λαμβάνει αρνητική τιμή και η παράμετρος  $b$  θετική τιμή σε συμφωνία με την διατύπωση των δυναμικών κατανομής του νερού στην φάση της κίσηρης και στην φάση της τσιμεντόπαστας. Επαναδιατυπώνοντας, όσο αυξάνεται η υγρασία της κίσηρης μειώνεται η ικανότητα απορρόφησης νερού και όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του προστιθέμενου νερού στο ανάμιγμα τόσο αυξάνεται η ικανότητα απορρόφησης νερού από την τσιμεντόπαστα προς την κίσηρη.

Μετά τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $A$ ,  $M$ ,  $a$  και  $b$  προσδιορίζεται για κάθε ανάμιγμα η περιεκτικότητα του νερού στην κίσηρη μετά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος ( $p_f$ ) από την Εξίσωση 4, και ο λόγος ενεργού νερού προς τσιμέντο ( $w_{eff}/c$ ) από τις Εξισώσεις 1 και 5. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 1 (γραμμές 14 και 15). Η  $p_f$  είναι μεγαλύτερη από την αρχική υγρασία της κίσηρης ( $p_m$ ) υποδεικνύοντας απορρόφηση νερού από την τσιμεντόπαστα προς τους κόκκους της κίσηρης. Ο λόγος ενεργού νερού προς τσιμέντο υπολογίζεται να λαμβάνει ασυνήθως μικρές τιμές από 0,27 έως 0,44 υποδεικνύοντας περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο.

Ως πρακτικός κανόνας συνάγεται ότι όταν η υγρασία της κίσηρης είναι μεγαλύτερη από περίπου 22% (ξηρή βάση) η κίσηρη δεν εμφανίζει σημαντική αύξηση στο τελικώς απορροφούμενο νερό. Για παράδειγμα στο ανάμιγμα 6137 η αρχική υγρασία της κίσηρης ( $p_m$ ) μετρήθηκε ίση με 29,7% και μετά την παρασκευή του αναμίγματος η περιεκτικότητα της κίσηρης σε νερό ( $p_f$ ) υπολογίζεται ίση με 32,6% η οποία όμως είναι σημαντικά μικρότερη από την περιεκτικότητα 41,2% που εμφανίζεται στο ανάμιγμα 15151p. Σημειώνεται η σημαντική αύξηση στο απορροφούμενο νερό στα αναμίγματα 14046-8 p, στα οποία η υγρασία της κίσηρης ήταν 11,1% σε ξηρή βάση.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η αντοχή του δομικού κισηροδέματος το οποίο περιέχει ως μόνο αδρανές κίσηρη συσχετίζεται καλά με τον λόγο ενεργού νερού προς τσιμέντο με βάση την σχέση Bolomey

- Δεδομένων των παραμέτρων της σχέσης Bolomey για κισηρόδεμα μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την απορρόφηση νερού από την τσιμεντόπαστα προς την κίσηρη
- Τα εργαστηριακά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την θεώρηση ότι υπάρχει κατανομή μεταξύ της περιεκτικότητας του νερού που τελικά απορροφάται από την κίσηρη και της περιεκτικότητας νερού που περιέχεται στην τσιμεντόπαστα
- Για την ποσοτικοποίηση και μοντελοποίηση του φαινομένου της ταχύτητας απορρόφησης του νερού στην κίσηρη και της ισορροπίας της περιεκτικότητας του νερού μεταξύ των φάσεων της κίσηρης και της τσιμεντόπαστας απαιτούνται πρόσθετα πειραματικά δεδομένα με κύριες μεταβλητές την κοκκομετρική κατανομή της κίσηρης, την περιεχόμενη αρχική υγρασία, τον λόγο των μαζών κίσηρης προς τσιμέντο και την ποσότητα του προστιθέμενου νερού στον όγκο του αναμίγματος
- Επειδή με την ακολουθούμενη τεχνική ο λόγος ενεργού νερού προς τσιμέντο προσδιορίζεται έμμεσα από την αντοχή του κισηροδέματος πρέπει να διερευνηθούν μέθοδοι άμεσου προσδιορισμού για την σύγκριση των αποτελεσμάτων

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει μέρος των αποτελεσμάτων του ερευνητικού έργου 716-BET-2013 «Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη». Το έργο χρηματοδοτήθηκε και υλοποιήθηκε υπό την εποπτεία της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) στο πλαίσιο της πράξης της ΠΑΒΕΤ 2013 του ΕΠΑΝ ΙΙ. Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της παρούσης αφορούν αποκλειστικά τον γράφοντα.

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

Καλοϊδάς, Β., Μάνος, Γ., Ζέρης, Χ., «Πειραματική διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του φέροντος κισηροδέματος», Πρακτικά 17<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Σκυροδέματος, (Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου 2016), Ανακοίνωση 33

Lafarge cement, «Technical Memento», Ch.9, 4

Li, Z., «Advanced concrete technology», John Wiley & Sons, New Jersey, (2011) 16-17, 109-110

Meta, P.K, Monteiro, P.J.M., «Concrete – Microstructure, Properties, and Materials», MacGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> ed. (2006) 54-55, 546-547

Neville, A., «Properties of concrete», Pearson, Essex (1995, repr. 2004) 269-274

Popovics, S., «Strength and related properties of concrete», John Wiley & Sons, London (1998) 328

Soroka, I., «Portland Cement Paste and Concrete», Macmillan Press, London (1979) 205-208