

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΤΑ ΤΟ EN 196-1

**Δ. ΤΣΑΜΑΤΣΟΥΛΗΣ<sup>1</sup>, Β. ΡΙΖΟΥ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε., 17<sup>ο</sup> ΧΛΜ ΕΘΝ. ΟΔΟΥ ΑΘΗΝΩΝ ΚΟΡΙΝΘΟΥ, 19300, ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

<sup>2</sup>ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΧΗΜΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

e-mail: [d.tsamatsoulis@halyps.gr](mailto:d.tsamatsoulis@halyps.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της μελέτης είναι η ανάλυση της ευαισθησίας ορισμένων σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν τις μετρήσεις αντοχής του τσιμέντου, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Με βάση σχεδιασμένα πειράματα αλλά και σημαντικό όγκο βιομηχανικών δεδομένων, εξάγονται συσχετίσεις που συνδέουν τις παραμέτρους εισόδου με τις θλιπτικές αντοχές του τσιμέντου. Στη συνέχεια ακολουθείται η τεχνική μετάδοσης σφάλματος. Με βάση τα αποτελέσματα, γίνεται αξιολόγηση εάν οι παρεχόμενες από το EN 196-1 ανοχές στις θεωρούμενες παραμέτρους, είναι ικανές στο να οδηγήσουν ένα εργαστήριο σε κανονική ή και πολύ καλή επίδοση.

**Λέξεις – Κλειδιά:** *Τσιμέντο, αντοχή, διασπορά, αβεβαιότητα, ανάλυση ευαισθησίας.*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρότυπο EN 196-1:2005 [1] για τον προσδιορισμό της αντοχής του τσιμέντου, δίνονται ορισμένες ανοχές που σχετίζονται με τις ποσότητες, το χρόνο μέτρησης, τη θερμοκρασία, την υγρασία, κλπ. Μελετώνται ορισμένες από αυτές τις ανοχές, καθώς και η επίδρασή τους στην αντοχή του τσιμέντου, οι ακόλουθες:

- (i) Μάζα τσιμέντου –  $450 \pm 2$  gr
- (ii) Μάζα νερού –  $225 \pm 1$  gr
- (iii) Μάζα άμμου –  $1350 \pm 5$  gr
- (iv) Ηλικία 24 h  $\pm$  15 min
- (v) Ηλικία 48 h  $\pm$  30 min
- (vi) Ηλικία 7 ημέρες  $\pm$  2 h
- (vii) Ηλικία 28 ημέρες  $\pm$  8 h

Οποσδήποτε υπάρχουν και άλλες ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία ωρίμανσης και η υγρασία του υγρού θαλάμου που δεν εμπίπτουν στο αντικείμενο της παρούσας πειραματικής ανάλυσης. Για την εκτίμηση της επίδρασης της μεταβολής της κάθε παραμέτρου στην αντοχή, ακολουθείται η μέθοδος διάδοσης σφάλματος σύμφωνα με το πρότυπο ENV 13005:2000 [2].

## 2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΑΖΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ, ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΜΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ

Για να εκτιμηθεί η επίδραση της μεταβλητότητας των μαζών (i),(ii),(iii) στην αντοχή σε θλίψη 28 ημερών του τσιμέντου, σχεδιάστηκε η ακόλουθη πειραματική διαδικασία.

1. Ελήφθη μια παρτίδα τσιμέντου CEM II B-M (P-L) 32,5 N, παραγωγής του εργοστασίου ΧΑΛΥΨ
2. Εκτελέστηκε μια πρότυπη δοκιμή με τις τυπικές μάζες και μετρήθηκε η αντοχή 28 ημερών.
3. Εκτελέστηκαν σειρές δοκιμών με διαφορετικές μάζες τσιμέντου – από 350 έως 550 gr – και διαφορετική αναλογία νερού προς τσιμέντο, W/C – από 0.45 έως 0.60
4. Για κάθε δοκιμή του σταδίου 3 υπολογίστηκε η μάζα της άμμου που έδινε τον ίδιο όγκο κονιάματος, με την πρότυπη δοκιμή. Για τις πρώτες ύλες θεωρήθηκαν οι ακόλουθες τιμές πυκνότητας: Νερό: 1gr/cm<sup>3</sup>, Πυριτική άμμος: 2,65 gr/cm<sup>3</sup>, Τσιμέντο: 2,96 gr/cm<sup>3</sup>

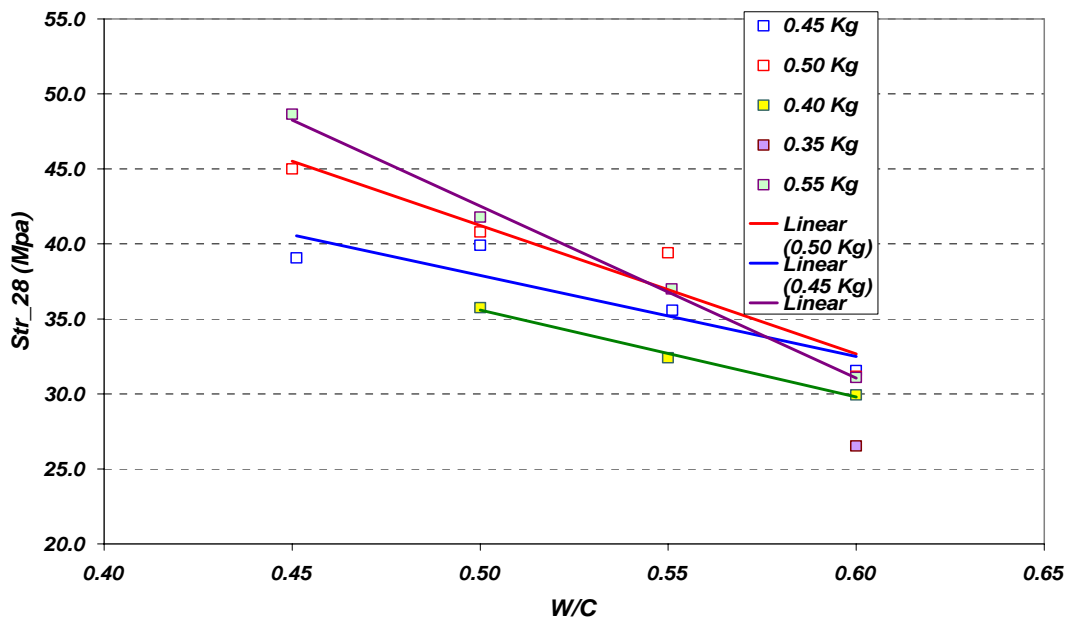
Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι παράμετροι εισόδου, που είναι η μάζα του τσιμέντου, η αναλογία νερού προς τσιμέντο (W/C), η αναλογία άμμου προς τσιμέντο, καθώς και η αντοχή 28 ημερών. Τα δεδομένα δίνονται σε διάγραμμα, στο σχήμα 1. Όπως είναι φανερό, η αύξηση της αναλογίας W/C οδηγεί σε μείωση της αντοχής. Από την άλλη πλευρά, για την ίδια τιμή W/C, όταν η μάζα του τσιμέντου αυξάνεται, η αντοχή αυξάνεται επίσης. Η τάση αυτή είναι πιο έντονη, σε χαμηλές αναλογίες W/C. Τα δεδομένα αυτά συσχετίζονται με πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, με στόχο την εύρεση αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων. Οι μεταβλητές εισόδου είναι οι εξής: X<sub>1</sub> = Τσιμέντο (kg), X<sub>2</sub> = Νερό/Τσιμέντο (W/C), X<sub>3</sub> = Άμμος/Τσιμέντο. Η αντοχή 28 ημερών, str<sub>28</sub>, συσχετίστηκε με αυτές τις παραμέτρους, με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Str_{28} = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2 + A_{33}X_3^2 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 \quad (1)$$

Πίνακας 1. Παράμετροι εισόδου και αποτελέσματα αντοχής 28 ημερών

Άμμος (Kg)	Τσιμέντο (Kg)	Νερό (Kg)	Σύνολο (Kg)	Άμμος /Τσιμ.	Νερό /Τσιμ.	Αντοχή 28 ημ. (Mpa)
1.350	0.450	0.225	2.025	3.00	0.50	39.9
1.410	0.450	0.203	2.063	3.13	0.45	39.1
1.290	0.450	0.248	1.988	2.87	0.55	35.6
1.231	0.450	0.270	1.951	2.74	0.60	31.6
1.305	0.500	0.225	2.030	2.61	0.45	45.0
1.239	0.500	0.250	1.989	2.48	0.50	40.8
1.173	0.500	0.275	1.948	2.35	0.55	39.4
1.106	0.500	0.300	1.906	2.21	0.60	31.2
1.461	0.400	0.200	2.061	3.65	0.50	35.7
1.408	0.400	0.220	2.028	3.52	0.55	32.4
1.355	0.400	0.240	1.995	3.39	0.60	29.9
1.479	0.350	0.210	2.039	4.23	0.60	26.5
1.201	0.550	0.248	1.999	2.18	0.45	48.6
1.128	0.550	0.275	1.953	2.05	0.50	41.8
1.055	0.550	0.303	1.908	1.92	0.55	37.0
0.982	0.550	0.330	1.862	1.79	0.60	31.1

Με τη χρήση t-test, οι μη σημαντικοί συντελεστές για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% δεν λαμβάνονται υπόψη. Έτσι η εξίσωση (1) γίνεται:



Σχήμα 1. Ανάπτυξη της αντοχής ως συνάρτηση της αναλογίας W/C και της περιεκτικότηταςτσιμέντου.

$$Str_{28} = A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_{22} X_2^2 + A_{12} X_1 X_2 \quad (2)$$

Οι συντελεστές A και το σφάλμα της παλινδρόμησης και οι τιμές t για κάθε A, φαίνονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Συντελεστές της εξίσωσης

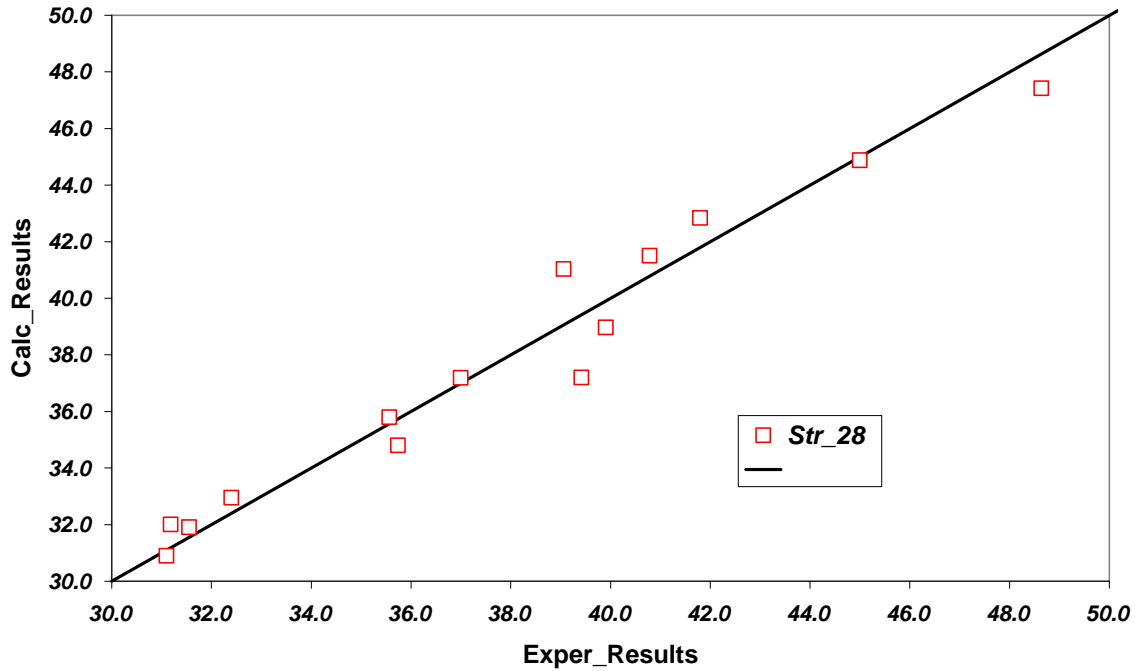
	Τιμή συντελεστής	Τιμή t	R <sup>2</sup> = 0.999  Std_Err = 1.17 Mpa
A <sub>1</sub>	163.3	2.3	
A <sub>2</sub>	318.3	3.3	
A <sub>3</sub>	-12.59	2.7	
A <sub>22</sub>	-184.2	2.1	
A <sub>12</sub>	-488.2	2.5	

Η πραγματική και η υπολογισμένη τιμή της αντοχής παρουσιάζονται μαζί στο σχήμα 2. Πρέπει να αναφερθεί ότι η χρησιμοποιούμενη πολλαπλή παλινδρόμηση παρέχει πολύ καλύτερο τυπικό σφάλμα σε σχέση με την απλή παλινδρόμηση μεταξύ του Y και των 3 μεταβλητών X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>. Στην περίπτωση αυτή το τυπικό σφάλμα είναι 2.8 Mpa. Με τη χρήση της εξίσωσης (2), η επίδραση της διασποράς της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στη διασπορά της αντοχής μπορεί να υπολογιστεί, με τη χρήση του ακόλουθου γενικού τύπου:

$$s_Y^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 s_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r_{ij} s_i s_j \quad (3)$$

όπου

- s<sub>Y</sub> : η τυπική απόκλιση της μεταβλητής Y
- s<sub>i</sub> : η τυπική απόκλιση της μεταβλητής x<sub>i</sub>
- r<sub>ij</sub> : ο συντελεστής παλινδρόμησης μεταξύ των μεταβλητών x<sub>i</sub> και x<sub>j</sub>



Σχήμα 2. Πραγματικές και υπολογισμένες τιμές αντοχής

Αν  $Y_2 =$  μάζα νερού (Kgr)  $Y_3 =$  μάζα άμμου (Kgr). Τότε  $X_2=Y_2/X_1$ ,  $X_3=Y_3/X_1$ . Τα σφάλματα στις μάζες θεωρούνται ως ανεξάρτητα, παραδοχή η οποία δεν είναι πάντα σωστή, εάν υπάρχει ένα μόνιμο σφάλμα στο ζυγό στον οποίο γίνεται η μέτρηση. Για  $X_2 = W/C = Y_2/X_1$  ο τύπος (3) για τη διακύμανση της αναλογίας νερού-τσιμέντου, γίνεται:

$$s_{X_2}^2 = X_2^2 \left( \left( \frac{s_{X_1}}{X_1} \right)^2 + \left( \frac{s_{Y_2}}{Y_2} \right)^2 \right) \quad (4)$$

Ομοίως, ο τύπος για τη διασπορά του  $X_3$  έχει ως εξής:

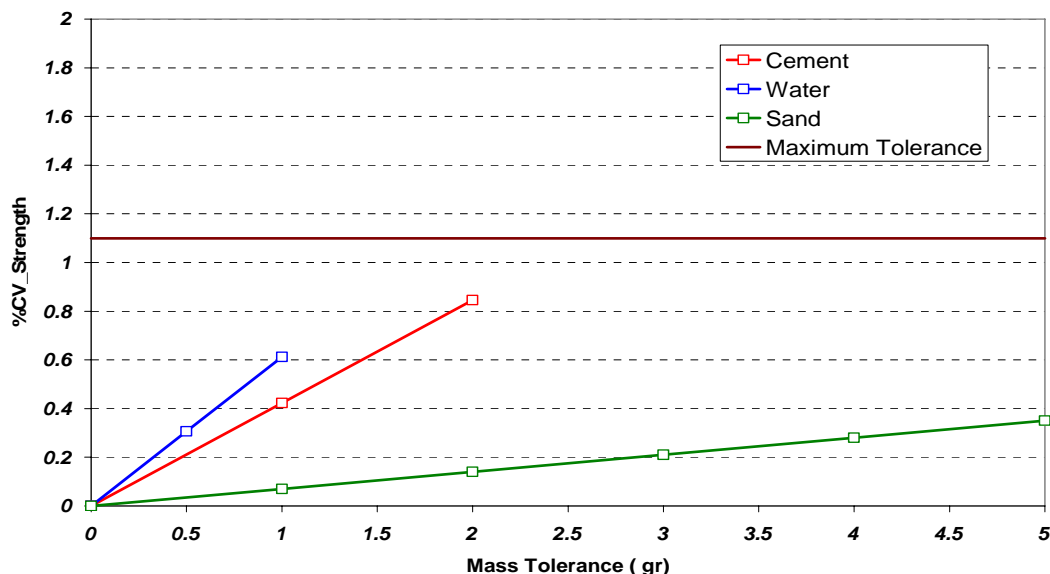
$$s_{X_3}^2 = X_3^2 \left( \left( \frac{s_{X_1}}{X_1} \right)^2 + \left( \frac{s_{Y_3}}{Y_3} \right)^2 \right) \quad (5)$$

Οι παράγωγοι της εξίσωσης (2) δίνονται από τις εξισώσεις (6):

$$\begin{aligned} \frac{\partial str}{\partial X_1} &= A_1 + A_{12} X_2 & \frac{\partial str}{\partial X_2} &= A_2 + 2 A_{22} X_2 + A_{12} X_2 \\ \frac{\partial str}{\partial X_3} &= A_3 \end{aligned} \quad (6)$$

Η διασπορά  $s_{str}^2$  της αντοχής Str\_28 δίνεται από τον τύπο (3), με την εφαρμογή των εξισώσεων (4),(5),(6). Ο συντελεστής μεταβλητότητας για την αντοχή δίνεται από τον τύπο (7), όπου ως Str\_28 θεωρείται η τιμή της αντοχής που δίνεται από την τυπική δοκιμή.

$$\%CV_{str} = \frac{s_{str}}{Str\_28} \times 100 \quad (7)$$



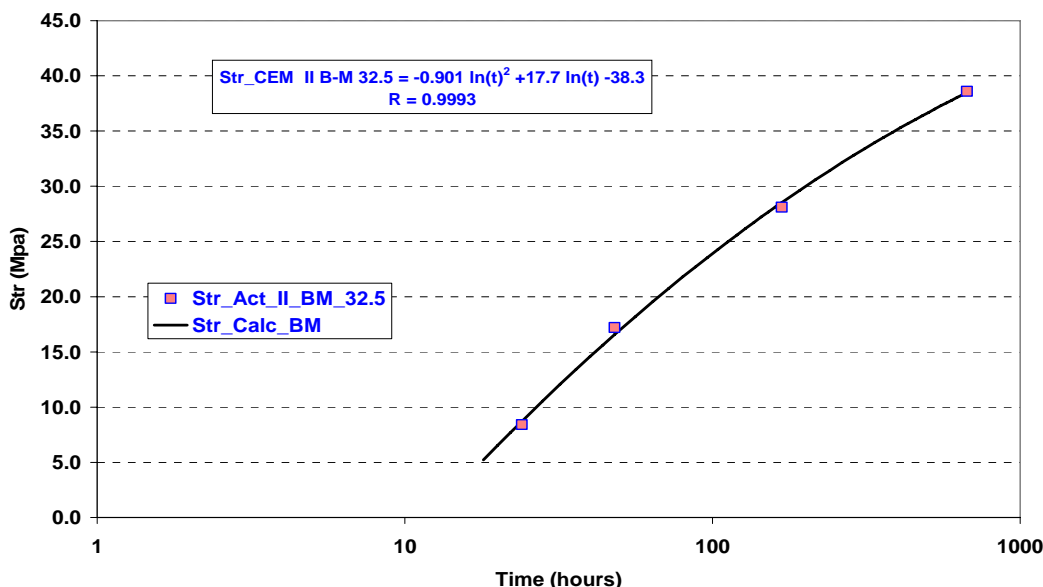
Σχήμα 3. Συντελεστής %CV της τιμής αντοχής 28 ημερών ως συνάρτηση των ανοχών μαζών των υλικών

Για τη μελέτη της επίδρασης της διασποράς της κάθε μεταβλητής στο συντελεστή %CV της τυπικής απόκλισης της αντοχής για κάθε υλικό, θεωρήθηκαν τυπικές αποκλίσεις από 0 έως την επιτρεπόμενη ανοχή για την κάθε μία μεταβλητή. Οι άλλες δύο διατηρούνταν σε τιμή 0. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 3. Όπως είναι φανερό, τα σφάλματα στη μάζα τσιμέντου και στη μάζα νερού είναι πολύ πιο σημαντικά, σε σχέση με την επίδραση του σφάλματος της μάζας της άμμου. Όμως, στην περίπτωση όπου οι τρεις τυπικές αποκλίσεις σε μια μακρά χρονική περίοδο, ισούνται με τα επιτρεπόμενα όρια αντοχής κατά EN 196-1, τότε η προκύπτουσα τιμή του συντελεστή %CV της αντοχής 28 ημερών γίνεται σχετικά σημαντική, ίση με 1.1% ή 0.44 Mpa ως τυπική απόκλιση για το συγκεκριμένο επίπεδο αντοχής. Η μακροπρόθεσμη επαναληψιμότητα για “κανονική επίδοση” σύμφωνα με το EN 196-1 πρέπει να είναι μικρότερη από 3.5% ή  $3.5/100 \cdot 39.9 = 1.40$  Mpa εκφρασμένη ως τυπική απόκλιση. Είναι φανερό ότι η διασπορά που προκύπτει από τις τιμές των μαζών συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική διασπορά. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντική η βαθμονόμηση των ζυγών και ο χειριστής θα πρέπει να ζυγίζει τις μάζες όσο το δυνατό πιο κοντά στις προδιαγραφές του προτύπου. Από την άλλη πλευρά, πρέπει να σημειωθεί ότι το πρότυπο EN 196-1 είναι ένα πρότυπο συνεπές όσον αφορά στις επιτρεπόμενες ανοχές, διότι η μέγιστη τυπική απόκλιση που προκύπτει από τα σφάλματα στις μάζες βρίσκεται εντός της περιοχής του 30% ( $=0.44/1.4 \cdot 100$ ) της συνολικής μέγιστης επιτρεπόμενης απόκλισης σε δοκιμές μακροπρόθεσμης επαναληψιμότητας.

### 3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Για την εκτίμηση της επίδρασης της αντοχής του χρόνου μέτρησης στο αποτέλεσμα της αντοχής, θεωρούνται τα ακόλουθα βήματα :

1. Λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα μέσου όρου για το έτος 2005 των αποτελεσμάτων παραγωγής ενός συγκεκριμένου μύλου τσιμέντου για την αντοχή 1, 2, 7, 28 ημερών για τον συγκεκριμένο τύπο τσιμέντου
2. Τα αποτελέσματα αυτά δίνονται σε σχεδιάγραμμα ως προς το λογάριθμο του χρόνου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4. Αντοχή του CEM II B-M (P-L) 32.5 ως προς το χρόνο

Από τα δεδομένα αυτά, προέκυψε η ακόλουθη σχέση:

$$Str(t) = -38.3 + 17.7 \cdot \ln(t) - 0.901 \cdot (\ln(t))^2 \quad (8)$$

Με την εφαρμογή της γενικής εξίσωσης (3), η διασπορά της τιμής  $str(t)$  δίνεται από την εξίσωση (9):

$$s_{str(t)}^2 = [17.7 - 2 \cdot 0.901 \cdot \ln(t)]^2 \cdot \frac{1}{t^2} \cdot s_t^2 \quad (9)$$

Για τις μέγιστες ανοχές που δίνονται από το πρότυπο, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Τυπική απόκλιση που προκύπτει από την ανοχή χρόνου

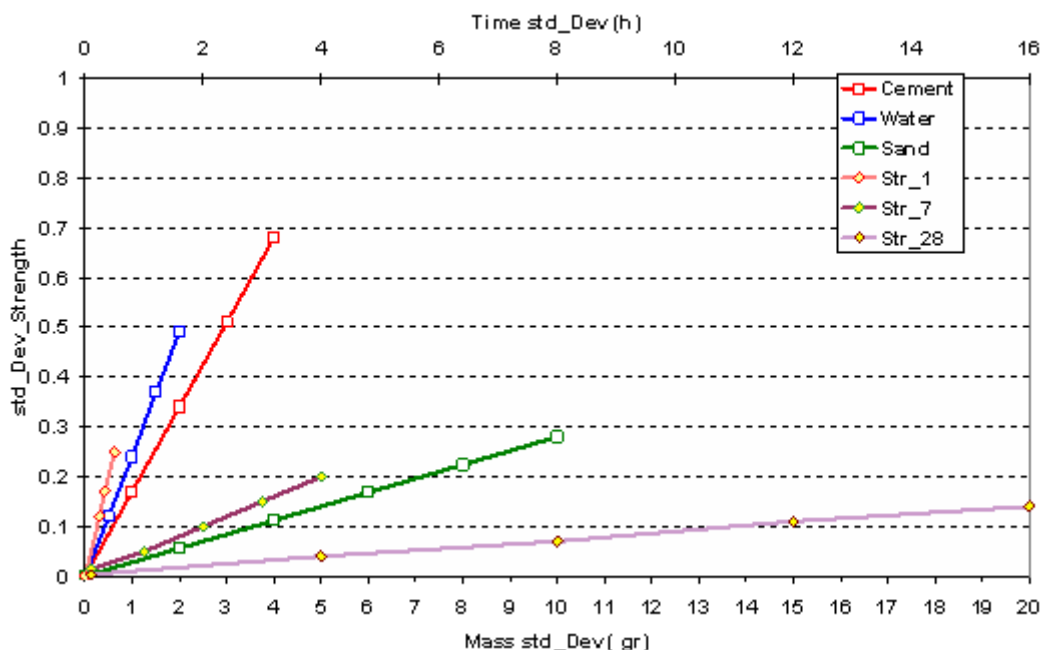
Χρόνος ωρίμανσης (ημέρες)	Ανοχή χρόνου	Τυπική απόκλιση (Mpa)
1	15 min	0.12
2	30 min	0.11
7	2 h	0.10
28	8 h	0.07

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο η ανοχή του χρόνου που ορίζεται από το πρότυπο παράγει περίπου την ίδια τυπική απόκλιση, η οποία διατηρείται σε χαμηλό επίπεδο. Το παραπάνω επαληθεύει το προαναφερθέν συμπέρασμα, ότι το πρότυπο EN 196-1 αποτελεί ένα ιδιαίτερα συνεπές πρότυπο αναφορικά με τις ανοχές.

#### 4. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Χρησιμοποιώντας όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάστηκε προηγουμένως, μπορεί να δημιουργηθεί ένα γενικό διάγραμμα για την επίδραση της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής. Η τυπική απόκλιση της κάθε παραμέτρου θεωρείται από 0 έως το διπλάσιο της επιτρεπόμενης ανοχής. Για να μελετηθεί η επίδραση της κάθε

παραμέτρου ξεχωριστά, όλες οι άλλες παραμένουν σταθερές και ίσες με 0. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5. Συνεισφορά της τυπικής απόκλισης της κάθε μεταβλητής στην τυπική απόκλιση της αντοχής.

Από το σχήμα αυτό μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι οι τυπικές αποκλίσεις για τις μάζες νερού και τσιμέντου έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη μέτρηση της αντοχής 28 ημερών, σε σχέση με τις άλλες δύο παραμέτρους που εξετάστηκαν - τη μάζα άμμου και το χρόνο μέτρησης της αντοχής 28 ημερών. Επίσης, η απόκλιση του χρόνου στον οποίο μετράται η αντοχή 1 ημέρας συνεισφέρει σημαντικά στην απόκλιση που προκύπτει. Προκειμένου να διαμορφωθεί μια πιο ρεαλιστική εικόνα της συνεισφοράς της διασποράς κάθε μεταβλητής στη διασπορά της αντοχής 28 ημερών, και ιδιαίτερα στην βραχυπρόθεσμη επαναληψιμότητα, πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη προσομοίωση:

1. Για τις τυπικές αποκλίσεις της μάζας τσιμέντου, της μάζας νερού και του χρόνου μέτρησης, επιλέγονται τυχαίες τυπικές αποκλίσεις – από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών – με τιμές από 0 έως το ανώτερο όριο αντοχής.
2. Επιλέχθηκαν τέσσερις συνδυασμοί ανώτερων ορίων αντοχής, οι οποίοι δίνονται στον πίνακα 4:

Πίνακας 4. Μέγιστη αντοχή για την κάθε μεταβλητή

Περίπτωση	Ανοχή μάζας τσιμέντου (gr)	Ανοχή μάζας νερού (gr)	Ανοχή χρόνου (h)
1	2	1	8
2	2	1	2
3	1	0.5	8
4	1	0.5	2

Η τυπική απόκλιση μάζας άμμου διατηρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις, μεταξύ 0 και 5 γραμμαρίων.

3. Συνολικά εξετάστηκαν 52 τυχαίες ομάδες αποκλίσεων, μία για κάθε εβδομάδα. Η περίοδος της κάθε εβδομάδας μπορεί να θεωρηθεί ως βραχυπρόθεσμη περίοδος.
4. Για κάθε ομάδα  $I=1..52$  διασπορών υπολογίστηκε η διασπορά της αντοχής 28 ημερών, σύμφωνα με τους τύπους (3) έως (9) και με την πρόσθετη εξίσωση (10). Η πρώτος όρος της εξίσωσης (10) προέρχεται από την εξίσωση (5), ενώ ο δεύτερος από την εξίσωση (9). Αυτές οι δύο διασπορές είναι ανεξάρτητες, για αυτό τον λόγο δεν απαιτείται όρος συνδιασποράς.

$$s_{Tot}^2 [I] = s_{Mass}^2 [I] + s_{Time}^2 [I] \quad (10)$$

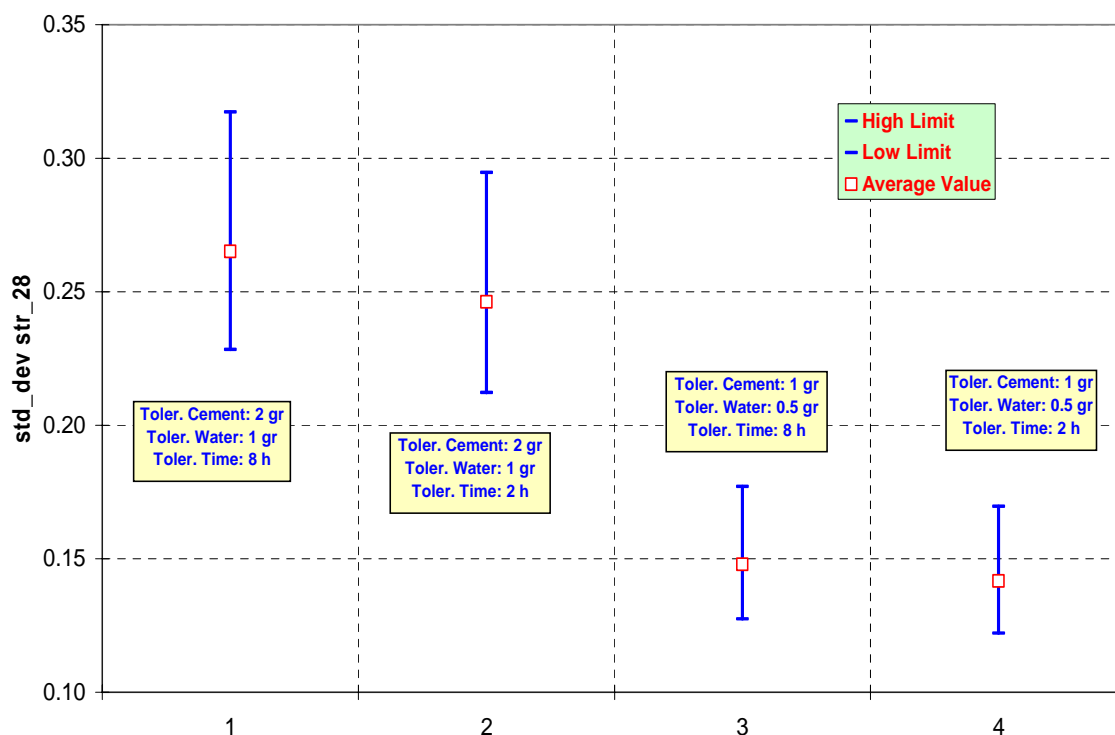
5. Η μέση διακύμανση των 52 ομάδων υπολογίζεται από τον τύπο (11):

$$s_{Aver}^2 = \frac{\sum_{I=1}^{52} s_{Tot}^2 [I]}{N} \quad (11)$$

6. Με τη χρήση της κατανομής  $X^2$ , υπολογίζεται το διάστημα εμπιστοσύνης της τυπικής απόκλισης, με βάση τον τύπο (12):

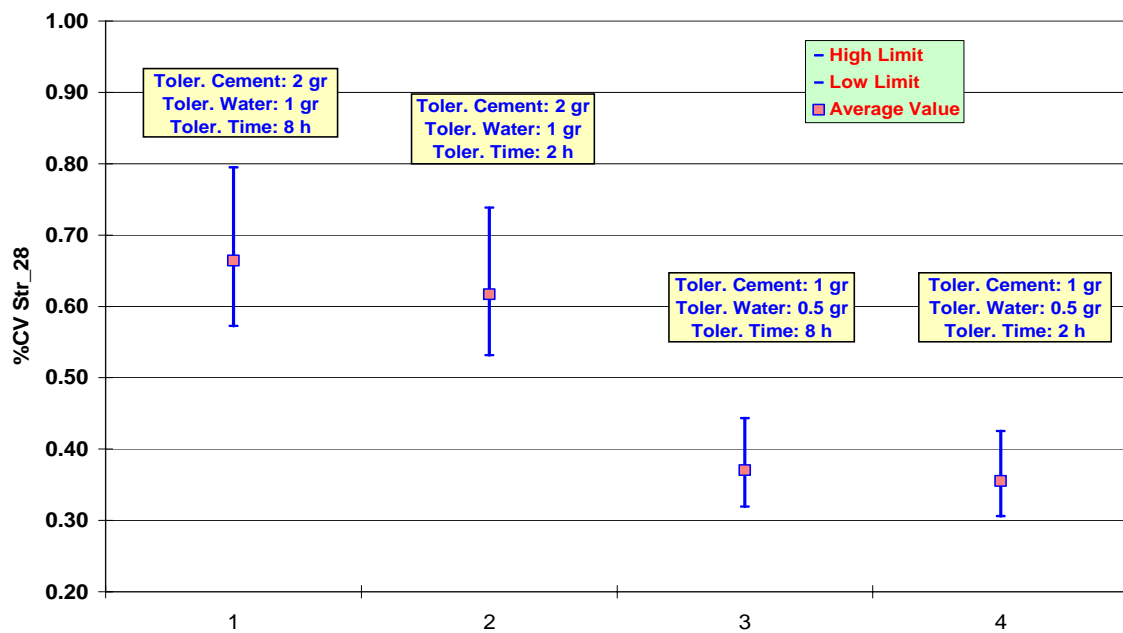
$$\sqrt{\frac{51}{\chi^2(0.05,51)}} \leq s_{Aver} \leq \sqrt{\frac{51}{\chi^2(0.95,51)}} \quad (12)$$

7. Τα αποτελέσματα για τις 6 περιπτώσεις που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στα σχήματα 6 και 7, που αναφέρονται στην τυπική απόκλιση και στο συντελεστή μεταβλητότητας αντίστοιχα.



Σχήμα 6. Τυπική απόκλιση της αντοχής 28 ημερών - βραχυπρόθεσμη επαναληψιμότητα





Σχήμα 7. Συντελεστής μεταβλητότητας της αντοχής 28 ημερών - βραχυπρόθεσμη επαναληψιμότητα.

Από τα σχήματα 6 και 7 προκύπτει ότι η μείωση της ανοχής χρόνου για την αντοχή 28 ημερών, δίνει μια μικρή μόνο βελτίωση στην επαναληψιμότητα της αντοχής. Από την άλλη πλευρά, η μείωση της ανοχής των μαζών νερού και τσιμέντου, οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της επαναληψιμότητας. Έτσι για τη ζύγιση των μαζών, μια ακρίβεια 0.1 g, αντί της ακρίβειας 1 g που προτείνεται στο EN 196-1, μπορεί να οδηγήσει σε αυστηρότερη ανοχή σε σχέση με την προτεινόμενη από το πρότυπο. Όπως αναφέρεται στο EN 196-1, ο συντελεστής %CV της βραχυπρόθεσμης επαναληψιμότητας, για κανονική επίδοση, είναι 2%. Για πολύ καλή επίδοση είναι 1%. Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, για κάθε μία από τις 4 περιπτώσεις μπορεί να υπολογιστεί το υπολειπόμενο επιτρεπτό περιθώριο αποδεκτή διασποράς από άλλες πηγές, προκειμένου ένα εργαστήριο να επιδεικνύει καλή επίδοση. Ο τύπος για τον υπολογισμό της υπολειπόμενης διασποράς δίνεται από την εξίσωση (13). Τα αποτελέσματα, ως τυπική απόκλιση και συντελεστής μεταβλητότητας του υπολειπόμενου περιθωρίου δίνονται στον πίνακα 5.

$$S_{Res}^2 = S_{\text{Norm. Performance}}^2 - S_{\text{AVER}}^2 \quad (13)$$

Πίνακας 5. Επιτρεπτό περιθώριο υπολειπόμενης τυπικής απόκλισης για κανονική και καλύτερη απόδοση

Περίπτωση	%CV = 2		%CV = 1	
	$S_{Res}$	%CV <sub>Res</sub>	$S_{Res}$	%CV <sub>Res</sub>
1	0.75	1.51	0.30	0.60
2	0.76	1.53	0.31	0.63
3	0.78	1.58	0.37	0.75
4	0.79	1.59	0.37	0.75

Στην περίπτωση της κανονικής απόδοσης, η επίτευξη μικρής επαναληψιμότητας  $S_{\text{AVER}}$ , αυξάνει σε ορισμένο βαθμό το υπολειπόμενο επιτρεπτό περιθώριο, σε ποσοστό ~4%

( $= (1.58-1.52)/1.52 \cdot 100$ ). Εάν ένα εργαστήριο αναζητά την πολύ καλή απόδοση, θα πρέπει να επιτυγχάνει χαμηλή επαναληψιμότητα  $S_{AVER}$ , προκειμένου να πρέπει να φθάσει κάποιο αποδεκτό περιθώριο. Στην περίπτωση αυτή, η βελτιωμένη τιμή  $S_{AVER}$ , επιτρέπει την αύξηση του περιθωρίου, σε ποσοστό  $\sim 20\%$  ( $= (0.75-0.62)/0.62 \cdot 100$ ).

Πρέπει να αναφερθεί ότι ως άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη επαναληψιμότητα του κονιάματος της αντοχής μπορούν να χαρακτηριστούν οι εξής:

- Η εμπειρία και ο βαθμός ομοιογένειας της εργασίας διαφορετικών χειριστών που εκτελούν τις μηχανικές δοκιμές
- Η επαναληψιμότητα της κατανομής σωματιδίων της πρότυπης άμμου
- Η επαναληψιμότητα της ανάμιξης και ανάδευσης του κονιάματος
- Η κατάσταση των καλουπιών
- Οι συνθήκες ωρίμανσης – υγρασία και θερμοκρασία του υγρού θαλάμου και θερμοκρασία των δεξαμενών συντήρησης

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση της ευαισθησίας ορισμένων σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν τις μετρήσεις αντοχής του τσιμέντου, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Σχεδιάστηκε μια σειρά πειραμάτων προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση των μαζών του τσιμέντου, του νερού και της άμμου στην αντοχή 28 ημερών. Βρέθηκε μια συνάρτηση μεταξύ του χρόνου ωρίμανσης και της αντοχής, με βάση μέσες τιμές δεδομένων παραγωγής ενός έτους. Όλα τα δεδομένα αφορούν στο CEM II B-M (P-L) 32.5 N. Ως αποτέλεσμα προέκυψε μια σχέση μεταξύ των διασπορών των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Όσο αφορά στην αντοχή 28 ημερών, η επίδραση της διασποράς της περιεκτικότητας του κονιάματος σε τσιμέντο και νερό είναι πιο σημαντική σε σύγκριση με την αντίστοιχη της περιεκτικότητας άμμου και του χρόνου μέτρησης, σε σχέση με τις επιτρεπόμενες ανοχές του EN 196-1. Η διασπορά του χρόνου μέτρησης γίνεται πολύ σημαντική για τις μετρήσεις πρώιμων ηλικιών.

Μια ουσιαστική μείωση στη διασπορά των μαζών τσιμέντου και νερού αυξάνει το υπολειπόμενο περιθώριο, προκειμένου ένα εργαστήριο να επιτύχει κανονική επίδοση και προσφέρει επίσης στο εργαστήριο τη δυνατότητα να επιδείξει πολύ καλή επίδοση, όσο αφορά στη βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα της αντοχής 28 ημερών.

Μια περαιτέρω μελέτη των ίδιων παραμέτρων σε άλλους τύπους τσιμέντου θα μπορούσε να επαληθεύσει και να επεκτείνει ακόμη περισσότερο αυτά τα αποτελέσματα. Επίσης, μια μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας ωρίμανσης στην αντοχή του τσιμέντου θα μπορούσε να οδηγήσει σε ένα πιο γενικευμένο μοντέλο, το οποίο θα συμπεριλαμβάνει όχι μόνο την προετοιμασία και το χρόνο της ωρίμανσης, αλλά επίσης και τις συνθήκες υπό τις οποίες αυτή διεξάγεται.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΕΛΟΤ EN 196-1, «Μέθοδοι δοκιμών τσιμέντου – Μέρος 1 : Προσδιορισμός αντοχών», ΕΛΟΤ, Αθήνα, 2005.
- [2] UNI CEI ENV 13005:2000, “Guida all’ espressione dell’ incertezza di misura”, UNI-CEI, Milano, 2000.