

# Προσδιορισμός της αβεβαιότητας κατά τη δοκιμή της αντοχής σκυροδέματος σε θλίψη με τύπου A εκτίμηση

## Determination of type A uncertainty for the concrete compressive strength test

Σταματία ΓΚΑΒΕΛΑ<sup>1</sup>, Γεώργιος ΠΑΠΑΔΑΚΟΣ<sup>2</sup>, Νικόλαος ΝΙΚΟΛΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ<sup>3</sup>, Δήμητρα ΠΑΣΣΑ<sup>4</sup>, Αναστασία ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ<sup>5</sup>

*Λέξεις κλειδιά: Αβεβαιότητα, Τύπου A, Αντοχή σε θλίψη*  
*Keywords: Uncertainty, Type A, Compressive strength test*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας κατά τη μέτρηση της αντοχής σε θλίψη δοκιμίων σκυροδέματος έχει κρίσιμη σημασία. Αποτελεί κριτήριο σύμφωνα με το οποίο το αποτέλεσμα μιας αντίστοιχης δοκιμής αξιολογείται έναντι της συμμόρφωσης του δοκιμίου με τις προδιαγραφές του σκυροδέματος. Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει ανάλυση των παραγόντων αβεβαιότητας κάνοντας χρήση διαγράμματος Ishikawa. Η μέθοδος δοκιμής που εξετάζεται είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 12390. Η εργασία καταλήγει σε πρόταση μιας απλοποιημένης μεθόδου προσδιορισμού της αβεβαιότητας για δοκιμή αντοχής σε θλίψη σκυροδέματος, η οποία βασίζεται σε πείραμα συγκεκριμένου σχεδιασμού. Η μέθοδος διατυπώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αναπαραγώγιμη και να αξιοποιείται από οποιοδήποτε εργαστήριο εφαρμόζει την δοκιμή κατά EN 12390, ειδικά στην περίπτωση που επιδιώκει διαπίστευση σύμφωνα με το Πρότυπο ISO/IEC 17025.

**ABSTRACT:** Determination of the compressive strength measurement uncertainty for concrete specimens is essential. It forms a criterion upon which the result of such a test is assessed against concrete's technical specifications. The present study includes uncertainty parameters analysis using an Ishikawa diagram. The investigated testing method is according to the requirements of European Standard EN 12390. This study suggests a simplified method for determining

<sup>1</sup> Δρ. Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ, Εργαστ. Συνεργάτης ΑΣΠΑΙΤΕ, Τμήμα Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών, email: [matina@gavela.gr](mailto:matina@gavela.gr)

<sup>2</sup> Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ, Σύμβουλος Μετρολογίας, [gpapadakos@teemail.gr](mailto:gpapadakos@teemail.gr)

<sup>3</sup> Εργαστ. Συνεργάτης ΑΣΠΑΙΤΕ, MSc, Εκπ/κός Τεχνολόγος Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ, email: [nikolasnikoloutso@hotmail.com](mailto:nikolasnikoloutso@hotmail.com)

<sup>4</sup> Μέλος Ε.ΔΙ.Π. ΑΣΠΑΙΤΕ, MSc, Εκπαιδευτικός Τεχνολόγος Πολιτικός Μηχανικός, email: [dimpassa@aspete.gr](mailto:dimpassa@aspete.gr)

<sup>5</sup> Καθηγήτρια ΑΣΠΑΙΤΕ, Τμήμα Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, email: [sotiropoulou@aspete.gr](mailto:sotiropoulou@aspete.gr)

concrete compressive strength test uncertainty, mainly based on a certainly designed experiment. This method is described in a way to be reproducible and exploitable by any laboratory that applies the EN 12390 testing method, especially in the case of seeking accreditation according to ISO/IEC 17025.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αβεβαιότητα, εκτός από κριτήριο για την ποιότητα του αποτελέσματος της μέτρησης, αποτελεί και ποσοτικό κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων, σύμφωνα με το αποτέλεσμα της μέτρησης αυτής. Ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας κατά τη μέτρηση της αντοχής σε θλίψη δοκιμίων σκυροδέματος έχει κρίσιμη σημασία, καθώς αποτελεί κριτήριο σύμφωνα με το οποίο το αποτέλεσμα μιας αντίστοιχης δοκιμής αξιολογείται έναντι της συμμόρφωσης του δοκιμίου με τις προδιαγραφές του σκυροδέματος. Αυτό τονίζεται ιδιαίτερα και στη νέα έκδοση του Διεθνούς Προτύπου ISO/IEC 17025, όπου πλέον απαιτείται η αξιολόγηση οποιασδήποτε δοκιμής να γίνεται σύμφωνα με προκαθορισμένο κανόνα για τη λήψη της τελικής απόφασης (decision rule). Προσπάθειες προσδιορισμού της αβεβαιότητας κατά τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη σκυροδέματος βασίζονται κυρίως σε εκτιμήσεις τύπου B, δηλαδή σε εξωτερικές ως προς το εργαστήριο πηγές ή σε εύλογες παραδοχές σύμφωνα με τη θεωρία της επιστήμης. Ο τύπου B προσδιορισμός των παραγόντων αβεβαιότητας είναι απλός και γρήγορος και δίνει λύση στις περιπτώσεις που δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί πείραμα για στατιστικό προσδιορισμό της αβεβαιότητας (τύπου A). Αυτού του τύπου εκτιμήσεις οδηγούν σε πλήθος μειονεκτημάτων, όπως η αδυναμία εκτίμησης του βαθμού θετικής ή αρνητικής συσχέτισης μεταξύ των παραγόντων της μέτρησης. Στην παρούσα εργασία, στην οποία γίνεται ανάλυση των παραμέτρων της αβεβαιότητας κάνοντας χρήση διαγράμματος Ishikawa. Η μέθοδος δοκιμής που εξετάζεται είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 12390-3:2009 και για δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EN 12390-1:2012. Οι παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτή αξιολογούνται πειραματικά και αναδεικνύονται οι σημαντικότεροι. Οι παράγοντες που αξιολογούνται καλύπτουν αρκετές πτυχές της μέτρησης: εξοπλισμός, μέθοδος, συνθήκες μέτρησης, χειριστής του εξοπλισμού, ορισμός του μετρητέου. Η εργασία καταλήγει σε πρόταση μιας μεθόδου προσδιορισμού της αβεβαιότητας για δοκιμή αντοχής σε θλίψη σκυροδέματος σύμφωνα με το EN 12390-3, με ενισχυμένο το στοιχείο του πειραματικού μέρους. Η μέθοδος διατυπώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αναπαραγώγιμη και να αξιοποιείται από οποιοδήποτε εργαστήριο εφαρμόζει την εν λόγω δοκιμή, ειδικά στη περίπτωση που επιδιώκει διαπίστευση σύμφωνα με το Πρότυπο ISO/IEC 17025. Το πρωτόκολλο της προτεινόμενης μεθόδου για τύπου A προσδιορισμό της αβεβαιότητας δοκιμής αντοχής σκυροδέματος σε θλίψη είναι σχεδιασμένο με τρόπο ώστε να οδηγεί στη βέλτιστη δυνατή οικονομία χρησιμοποιούμενων δοκιμίων.

### Παράγοντες αβεβαιότητας

Τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου που υποβάλλεται σε μέτρηση της αντοχής του σε θλίψη σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 12390-3, υπόκεινται σε ορισμό

που αποδίδεται με λεπτομέρειες στο EN 12390-1. Οποιαδήποτε απόκλιση από τις προδιαγραφές του δοκιμίου ως προς τα γεωμετρικά του και άλλα χαρακτηριστικά οδηγεί και αυτή σε σφάλμα της μέτρησης. Αυτό δεν συμβαίνει άμεσα για το αποτέλεσμα της ίδιας της μέτρησης, δηλαδή την αριθμητική ποσότητα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου εκτίμησης της αντοχής σε θλίψη με τη χρήση αντίστοιχης διάταξης. Συμβαίνει έμμεσα, καθώς το οποιοδήποτε αποτέλεσμα της μέτρησης αποδίδεται σε έναν, θεωρητικά, τέλειο κύβο με ακμές που έχουν όλες ίσο μεταξύ τους μήκος και ίσο, για παράδειγμα, με ακριβώς 15cm. Κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό να ισχύει στην πράξη. Η επανάληψη όσο το δυνατό περισσότερες φορές της δημιουργίας ενός δοκιμίου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, αναμένεται να αποδίδει αποτελέσματα μετρήσεων με διασπορά στην οποία έχουν επιδράσει οι εν λόγω αποκλίσεις από τον ορισμό των χαρακτηριστικών του δοκιμίου. Τέτοιου τύπου σφάλματα συνεισφέρουν στη συνολική αβεβαιότητα του αποτελέσματος της δοκιμής με τρόπο εγγενή (βλέπε σχετικό ορισμό του όρου *definitional uncertainty*, JCGM 200: 2012). Είναι αδύνατο να εξαλειφθούν, είναι όμως δυνατό να ελαχιστοποιηθούν (Παπαδάκος κ.α., 2016) μέσω της βελτίωσης των συνθηκών προετοιμασίας των δοκιμίων (π.χ. βελτιώνοντας την ποιότητα κατασκευής των μητρών που χρησιμοποιούνται).

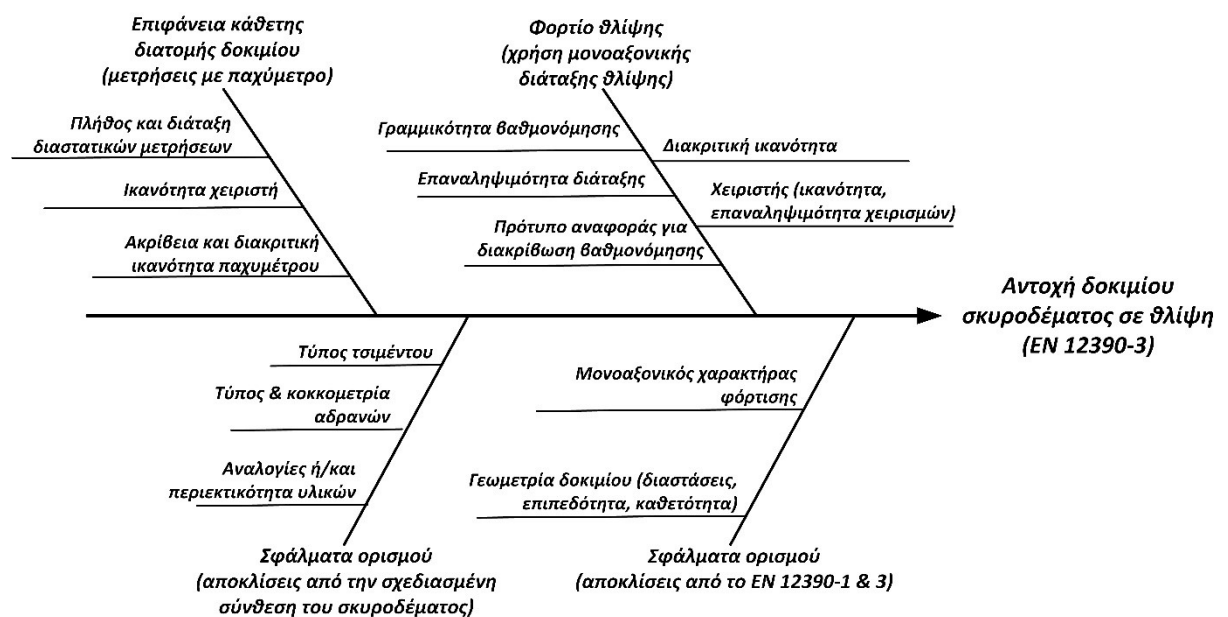
Στην κατηγορία των παραγόντων που συμβάλλουν στη διεύρυνση της συνολικής αβεβαιότητας μέσω σφαλμάτων ορισμού είναι αυτοί που συνδέονται με τον ορισμό της σύνθεσης του σκυροδέματος από το οποίο κατασκευάζεται το δοκίμιο. Οι τιμές της περιεκτικότητας του μίγματος στα επιμέρους υλικά του, συνήθως εκφρασμένη σε  $\text{kg/m}^3$  και η κοκκομετρία των αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται είναι δύο από αυτούς τους παράγοντες. Ιδιαίτερα, όμως, ο παράγοντας της αναλογίας της ποσότητας του νερού προς την ποσότητα του τσιμέντου που χρησιμοποιείται στο μίγμα του σκυροδέματος έχει ήδη αναδειχθεί από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα ως πολύ σημαντικός για τον καθορισμό του αποτελέσματος της αντοχής του δοκιμίου σε θλίψη, ενώ έχουν προταθεί και μαθηματικά μοντέλα που εκτιμούν αυτή τη σχέση για δεδομένη ηλικία του δοκιμίου (Féret, 1892, Abrams, 1927). Νεότερες σχετικές εργασίες πρότειναν μαθηματικά μοντέλα στα οποία περιγράφεται και η προφανής συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη του δοκιμίου σε συνάρτηση με την ηλικία του (Freiesleben Hansen & Pedersen, 1985, Carino & Lew, 1983, Yeh, 2006, Metwally, 2012, Gavela et al, 2017, Sotiropoulou et al, 2017).

Ακόμη ένας παράγοντας που επηρεάζει τα επίπεδα της αντοχής σε θλίψη του δοκιμίου για δεδομένη ηλικία είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο συντελείται η διαδικασία της συντήρησης (Carino & Lew, 1983). Χαρακτηριστικό είναι πως μεγαλύτερη τιμή αυτής της θερμοκρασίας οδηγεί σε ταχύτερη ωρίμανση, επομένως για την ηλικία που αποτελεί στόχο σύμφωνα με τον ορισμό της μεθόδου δοκιμής, π.χ. στις 28 ημέρες, το δοκίμιο παρουσιάζει υψηλότερη αντοχή σε θλίψη.

Φυσικά, η συνολική αβεβαιότητα του αποτελέσματος μιας δοκιμής σύμφωνα με το EN 12390-3 εξαρτάται από την ποιότητα της βαθμονόμησης της μονοαξονικής

θλιπτικής διάταξης και από τον βαθμό εξοικείωσης με τον χειρισμό της από το άτομο που τη χειρίζεται κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Μία διάταξη που έχει διακριβωθεί επιτυχώς σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Διεθνούς Προτύπου ISO 7500-1, μπορεί να θεωρηθεί ότι χαρακτηρίζεται από αμελητέα τυχαία σφάλματα. Δεν πρέπει όμως να παραγνωρίζεται ότι τυχόν συστηματικά σφάλματα, λόγω της ακρίβειας του προτύπου αναφοράς (π.χ. της δυναμοκυψέλης) που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία διακρίβωσης, δεν είναι δυνατό να μηδενιστούν. Για το λόγο αυτό, η αβεβαιότητα των μετρήσεων που προσφέρει το πρότυπο αναφοράς θα πρέπει πάντα να προστίθεται στο ισοζύγιο αβεβαιότητας για τη μέτρηση σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12390-3.

Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στο διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (διάγραμμα Ishikawa) το οποίο έχει συνταχθεί με συγκεκριμένο τρόπο χρήσης (EURACHEM / CITAC Guide, 2016) που έχει ως στόχο τη χαρτογράφηση των παραγόντων αβεβαιότητας με ταυτόχρονη απεικόνιση των μεταξύ τους συνεργειών (Σχήμα 1).



**Σχήμα 1:** Διάγραμμα αιτίου αποτελέσματος για τον τρόπο που συμβάλλουν οι παράγοντες αβεβαιότητας στο τελικό αποτέλεσμα μιας διαδικασίας δοκιμής σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12390-3.

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διενεργήθηκαν δοκιμές για πλήθος δοκιμίων που κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τον ορισμό κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος

ακμής 15cm, όπως παρατίθεται στο EN 12390-1. Για το σχεδιασμό του πειράματος επιλέχθηκε ένας συνδυασμός χαρακτηριστικών για τη σύνθεση του σκυροδέματος για την κατασκευή των δοκιμίων. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ήταν τύπου CEM II 32.5. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θραυστά ασβεστολιθικά. Οι συνθέσεις σκυροδέματος των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν και οδηγήθηκαν στη διαδικασία δοκιμής σε θλίψη φαίνονται στον Πίνακα 1. Ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας της δοκιμής αντοχής σε θλίψη έγινε με εφαρμογή της μεθόδου για ονομαστική ηλικία των δοκιμίων 28 ημερών.

**Πίνακας 1:** Συνθέσεις σκυροδέματος.

	τσιμέντο kg/m <sup>3</sup>	N/T	άμμος kg/m <sup>3</sup>	χαλίκι kg/m <sup>3</sup>	γαρμπίλι kg/m <sup>3</sup>	υπερευστοποιητής kg/m <sup>3</sup>
A	300	0.45	1021.2	623.1	341.3	4.20
B	300	0.50	1001.4	610.0	334.7	3.60
Γ	300	0.55	980.9	598.5	327.8	3.60
Δ	330	0.45	988.4	603.1	330.4	4.62
E	330	0.50	966.7	589.8	323.1	3.96
ΣΤ	330	0.55	944.1	576.1	315.6	3.96
Z	360	0.45	956.7	583.7	319.7	4.32
H	360	0.50	932.0	568.7	311.5	4.32
Θ	360	0.55	908.3	554.2	303.6	3.60
Z	360	0.45	956.7	583.7	319.7	4.32

Για κάθε μία από τις παραπάνω συνθέσεις κατασκευάστηκαν από δέκα δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή αντοχής σε θλίψη, ανά δύο, σε ηλικίες 27, 28, 29, 30 και 31 ημερών. Συμπληρωματικά, κατασκευάστηκαν και επιπλέον 10 δοκίμια της σύνθεσης Z, από τα οποία τα μισά υποβλήθηκαν σε δοκιμή σε ηλικία 7 ημερών ενώ τα υπόλοιπα σε ηλικία 14 ημερών.

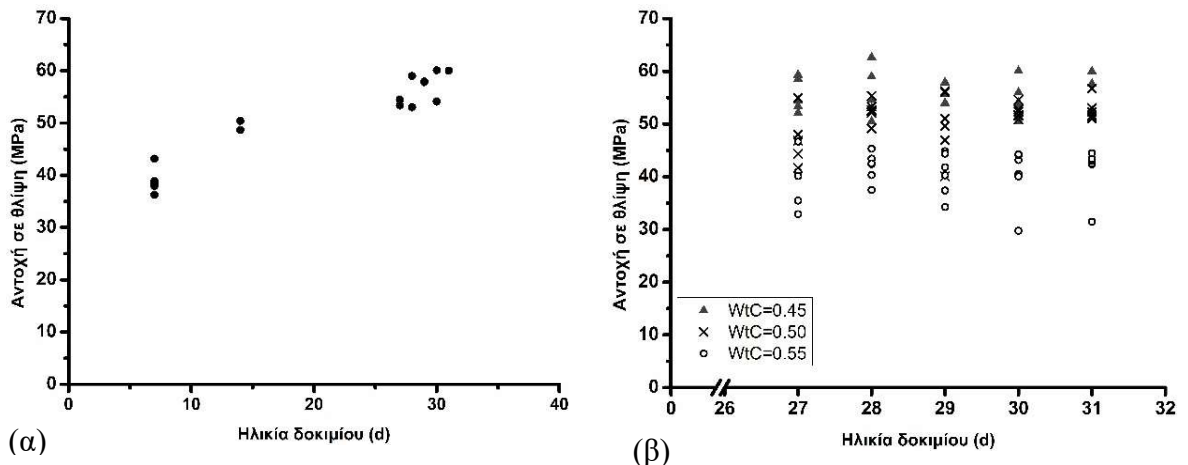
Για την κατασκευή των εν λόγω δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε πλήθος διαφορετικών μεταλλικών μητρών που επισημάνθηκαν με αύξοντα αριθμό. Οι μήτρες αυτές χρησιμοποιήθηκαν με τυχαίοποιημένο τρόπο για την κατασκευή των δοκιμίων των διάφορων συνθέσεων. Η χρήση διαφορετικών μητρών οδήγησε σε μία αναμενόμενη και λογική διασπορά των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων (π.χ. επιπεδότητα και καθετότητα επιφανειών, ακρίβεια διαστάσεων ακμών). Επομένως, τα αποτελέσματα που ακολουθούν αναμένεται να είναι αντιπροσωπευτικά της διασποράς που παρουσιάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων.

Επίσης, η διάταξη μονοαξονικής θλίψης που χρησιμοποιήθηκε είχε υποβληθεί επιτυχώς σε διακρίβωση με συνακόλουθη διόρθωση της βαθμονόμησής της,

σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Διεθνούς Προτύπου ISO 7500-1. Μπορεί να θεωρηθεί ότι η βαθμονόμηση της διάταξης συμβάλλει στην τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα μόνο κατά την επίδραση των συστηματικών σφαλμάτων.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη με την παράμετρο της ηλικίας επιβεβαιώθηκε από μετρήσεις για ένα πλήθος δοκιμίων, συγκεκριμένης σύνθεσης, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για ένα εύρος ηλικιών των δοκιμίων από 7 έως 31 ημέρες (Σχήμα 2α). Πλην όμως, η εικόνα αυτής της συσχέτισης, όταν η απεικόνιση περιορίζεται σε ένα διάστημα ηλικιών 27 έως 31 ημέρες (Σχήμα 2β), δεν είναι σημαντικά εμφανής. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι για τόσο μικρές χρονικές αποκλίσεις, η συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη με την ηλικία είναι ελάχιστων παράγοντας αβεβαιότητας για ηλικίες γύρω από την τιμή των 28 ημερών. Αντίθετα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 2β, επιβεβαιώνεται η σημαντικότητα της παραμέτρου του λόγου νερού προς τσιμέντο,  $WtC$ .

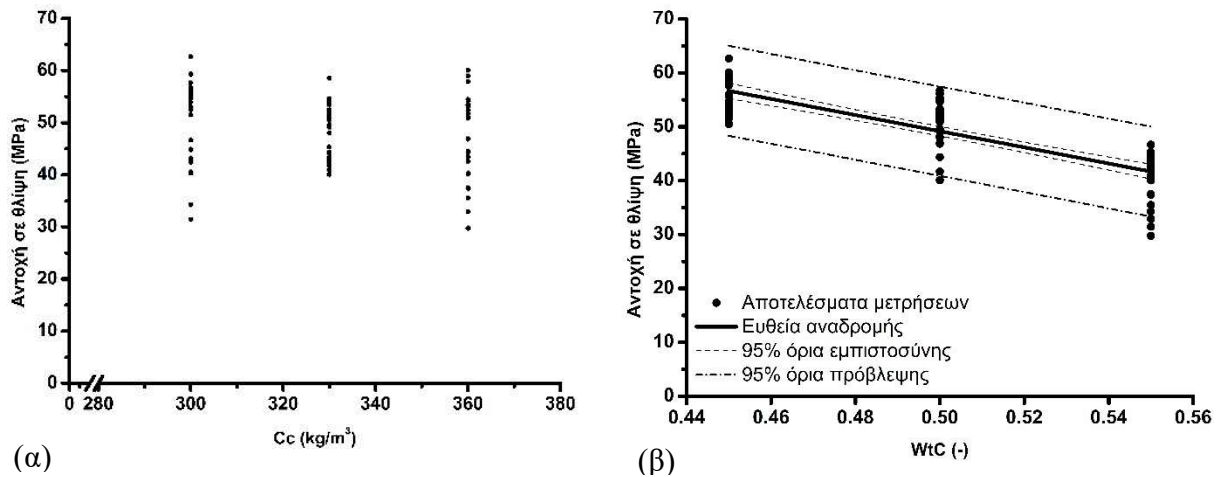


**Σχήμα 2:** Επίδραση του παράγοντα της ηλικίας του δοκιμίου στο αποτέλεσμα της μέτρησης της αντοχής σε θλίψη: (α) για δοκίμια με λόγο  $WtC=0.45$  και  $C_c=360\text{kg/m}^3$  και για ηλικίες από 7 έως 31 ημερών, (β) για δοκίμια διάφορων συνθέσεων και για ηλικίες από 27 έως 31 ημέρες.

Ενώ θα αναμενόταν μία θετική συσχέτιση της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμέντο,  $C_c$ , με την αντοχή σε θλίψη των αντίστοιχων δοκιμίων, αυτό δεν επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα του πειράματος για μεταβολές κατά  $30\text{kg/m}^3$  γύρω από τη βασική τιμή των  $330\text{kg/m}^3$  (Σχήμα 3α, συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson  $r = -0.155$ ). Για την επίδραση της παραμέτρου της αναλογίας νερού προς τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε ευθεία αναδρομής (Σχήμα 3β), σύμφωνα με την Εξίσωση 1.

$$CS = c_0 + c_1 \cdot WtC \quad (1)$$

όπου  $WtC$  είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο και  $CS$  η αντοχή σε θλίψη σε συνάρτηση με τον λόγο νερού προς τσιμέντο.



**Σχήμα 3:** Αξιολόγηση της επίδρασης των παραμέτρων (α) της περιεκτικότητας  $C_c$ , του σκυροδέματος σε τσιμέντο και (β) της αναλογίας νερού προς τσιμέντο,  $WtC$ , στον καθορισμό των επιπέδων της αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων.

Για την ευθεία αναδρομής του Σχήματος 3β με εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων λήφθηκαν οι τιμές  $c_0 = 124 \pm 11 \text{MPa}$  και  $c_1 = -150 \pm 22 \text{MPa}$ . Η ερμηνεία της τιμής που λήφθηκε για την παράμετρο  $c_1$  είναι ότι για κάθε εκατοστιαία μονάδα μεταβολής του λόγου νερού προς τσιμέντο (δηλαδή μεταβολή του  $WtC$  κατά 0.01) η μέση τιμή της αντοχής των δοκιμίων σε θλίψη μεταβάλλεται κατά περίπου 1.5MPa.

Στο Σχήμα 3β απεικονίζονται τα όρια αξιοπιστίας (confidence bands) της ευθείας σε επίπεδο 95%. Δεν αναμένεται όμως να προσφέρουν γενικά χρήσιμη πληροφορία, καθώς χαρακτηρίζουν ένα οποιοδήποτε παρόμοιο πείραμα το οποίο θα βασίζεται σε παρόμοιο πλήθος δοκιμίων. Αντίθετα, τα όρια πρόβλεψης (prediction bands) της ευθείας μπορούν να αποδώσουν με πιθανότητα 95% τα όρια εντός των οποίων αναμένεται να κείται οποιαδήποτε μεμονωμένη επανάληψη της εν λόγω δοκιμής.

### Διαστήματα πρόβλεψης

Όταν η ευθεία αναδρομής έχει προκύψει από ζεύγη τιμών ( $WtB_i$ ,  $CS_i$ ) από τα  $i=1, \dots, n$  το πλήθος αποτελέσματα μετρήσεων, τότε το διάστημα πρόβλεψης που συνοδεύει οποιαδήποτε μέση εκτιμώμενη τιμή για την αντοχή σε θλίψη  $CS$  με τη χρήση της σχέσης (1), για μια επιλεγμένη τιμή του λόγου νερού προς τσιμέντο  $WtC$ , υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 2 (Σιμόπουλος, 2003).

$$\widehat{CS} \pm t_{95\%,n-2} \cdot se(\widehat{CS}) = \widehat{CS} \pm U_{type A} \quad (2)$$

όπου

$$se(\widehat{CS}) = s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(WtC - \overline{WtC})^2}{\sum_1^n (WtC_i - \overline{WtC})^2}} \quad (3)$$

με  $\overline{WtC}$  να είναι η μέση τιμή όλων των  $WtC_i$  τιμών όλων των μετρήσεων και με  $\widehat{CS}_i$  να είναι η εκτίμηση για το  $CS$  με χρήση της (1) που προκύπτει για την τιμή  $WtC_i$ . Επίσης, όπου  $s$  δίνεται από την εξίσωση 4.

$$s = \sqrt{\sum_1^n (CS_i - \widehat{CS}_i)^2} \quad (4)$$

Στην περίπτωση του παρόντος πειράματος προκύπτει ότι μια μεμονωμένη δοκιμή θα έδινε με πιθανότητα 95% αποτέλεσμα σε ένα διάστημα  $\pm 17\%$  της μέσης εκτιμώμενης τιμής της αντοχής. Αυτό το αποτέλεσμα θα πρέπει να θεωρείται σε ένα μεγάλο βαθμό εγγενές για τη διαδικασία, τις διατάξεις και τους χειριστές που συνεισέφεραν. Η μείωσή του απαιτεί βελτιστοποίηση σε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά της μεθόδου δοκιμής.

#### **Δυνατότητες τυποποίησης της διαδικασίας**

Σε ένα εργαστήριο όπου υλοποιούνται δοκιμές αντοχής σε θλίψη δοκιμίων σκυροδέματος που έχουν κατασκευαστεί με έναν συγκεκριμένο τύπο τσιμέντου και αδρανών και έχουν συντηρηθεί υπό μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και υποβάλλονται σε δοκιμή σε ορισμένη ηλικία, είναι δυνατό να γίνεται εκτίμηση τύπου A για την αβεβαιότητα της μέτρησης. Αρκεί να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί απλό πείραμα ως εξής:

(α) Για επιλεγμένες στάθμες τιμών των παραμέτρων  $WtC$  και  $C_c$  που να καλύπτουν το εύρος των συνθέσεων που καλείται το εργαστήριο να χειριστεί, κατασκευάζονται πολλαπλά δοκίμια για κάθε μία σύνθεση, όπως οι εννέα συνθέσεις που για την παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 1.

(β) Πόσο θα είναι το πλήθος των πολλαπλών δοκιμίων ανά σύνθεση προκύπτει από τον γινόμενο των ηλικιών δοκιμής που θα χρησιμοποιηθούν επί το πλήθος των αντίγραφων δοκιμίων ανά σύνθεση και ηλικία. Για παράδειγμα αν επιλεγούν πέντε ηλικίες και δύο αντίγραφα δοκίμια ανά ηλικία, τότε απαιτούνται δέκα δοκίμια ανά σύνθεση σκυροδέματος. Οι ηλικίες για να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές αντοχής σε θλίψη θα πρέπει να επιλέγονται για λογικά διαστήματα κατά τα οποία θα μπορούσε να αποκλίνει η ημερομηνία της δοκιμής σε σχέση με την επιθυμητή, που στην παρούσα εργασία ήταν οι 28 ημέρες.



(δ) Για την κατασκευή των ως άνω δοκιμών είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατό περισσότερες διαφορετικές μήτρες, για λόγους που αναλύθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο.

(ε) Με τον πιο πάνω συνδυασμό δοκιμών επιτυγχάνεται κάλυψη όλων των παραμέτρων αβεβαιότητας που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1, πλην των ενδεχόμενων συστηματικών σφαλμάτων της διάταξης μονοαξονικής θλίψης και της διακύμανσης / απόκλισης στα χαρακτηριστικά του τσιμέντου και των αδρανών.

(στ) Από τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών για την αντοχή σε θλίψη των δοκιμών, μπορεί να ελεγχθεί αν οι μικρές μεταβολές στον προσδιορισμό της ηλικίας των δοκιμών και στην περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

(ζ) Εφαρμογή της ευθείας αναδρομής της σχέσης (1) και των σχέσεων (2) έως (4) για το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων αποδίδει την αβεβαιότητα των δοκιμών σε θλίψη για εύρος συνθέσεων του σκυροδέματος όπως αντιστοιχεί στις τιμές που επιλέχθηκαν κατά το βήμα (α).

(η) Σύμφωνα με τον Οδηγό του ISO για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας (JCGM 100: 2008), εάν η διαδικασία επαναλαμβάνεται υπό τις ίδιες συνθήκες και το αποτέλεσμα λαμβάνεται ως η μέση τιμή δοκιμών πλήθους  $n$ , η τύπου A αβεβαιότητα μπορεί να διαιρείται με  $\sqrt{n}$ . Σε αυτή την εκτίμηση της αβεβαιότητας θα πρέπει να προστίθεται η αβεβαιότητα για τον προσδιορισμό της τιμής αναφοράς της δυναμοκυψέλης που χρησιμοποιείται για τη διακρίβωση της διάταξης δοκιμής, η οποία έστω ότι αναφέρεται ως  $U_{rs}$  με συντελεστή κάλυψης  $k=2$ . Έτσι, ένα διευρυμένο διάστημα με συντελεστή κάλυψης  $k=2$  μπορεί να αποδίδεται από την εξίσωση 5:

$$2 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{type A}}{2 \cdot \sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{U_{rs}}{2}\right)^2} \quad (5)$$

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Ένα πείραμα εκτίμησης της πιστότητας υπό συνθήκες μερικής αναπαραγωγιμότητας, όπως αυτό που περιγράφεται στην παρούσα εργασία, μπορεί να αποτελέσει μια τυποποιημένη διαδικασία εκτίμησης τύπου A της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων ενός Εργαστηρίου που εφαρμόζει τη μέθοδο σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12390-3, για δεδομένους τύπους υλικών που συνθέτουν το υπό δοκιμή σκυροδέμα.
2. Αν το εργαστήριο επιθυμεί να επαναλάβει δοκιμές σύμφωνα με το EN 12390 χρησιμοποιώντας την ίδια διάταξη, ίδιους χειριστές για δοκίμια με παρόμοια χαρακτηριστικά και για συνθέσεις που εμπίπτουν στο εύρος τιμών που καλύφθηκε από το πείραμα, τότε μπορεί να χρησιμοποιεί το

αριθμητικό αποτέλεσμα της εκτίμησης τύπου A αβεβαιότητας που έχει κάνει χωρίς επανάληψη του πειράματος. Στην εκτίμηση που προκύπτει από  $n$  το πλήθος τέτοιων όμοιων δοκιμών, θα πρέπει πάντα να προστίθεται η παράμετρος αβεβαιότητας λόγω των συστηματικών σφαλμάτων της βαθμονόμησης της διάταξης δοκιμής.

3. Εκτιμάται πως σε οποιαδήποτε εφαρμογή της, η μέθοδος αυτή για εκτίμηση τύπου A για την αβεβαιότητα δοκιμής σε θλίψη δοκιμίου σκυροδέματος σύμφωνα με το EN 12390, θα αποδίδει επίπεδα αβεβαιότητας σημαντικά μεγαλύτερα από την αναμενόμενη επαναληψιμότητα της χρησιμοποιούμενης διάταξης, όπως, για παράδειγμα, της τάξης του 17% που υπολογίστηκε στην παρούσα εργασία.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Abrams, D.A, "Water-cement Ratio as a Basis of Concrete Quality". Journal of American Concrete Institute, Vol. 23, (1927) 452-457
2. BIPM, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100: 2008 (GUM 1995 with minor corrections)
3. BIPM, International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms, JCGM 200: 2012 (VIM 3rd edition, JCGM 200:2008 with minor corrections)
4. Carino, N.J., Lew, H.S., "Temperature Effects on Strength-Maturity Relations of Mortar". Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, Vol. 80, No 3, (1983) 177-182
5. CEN, Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, EN 12390-1:2012 (2012)
6. CEN, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, EN 12390-3:2009 (2009)
7. EURACHEM / CITAC Guide (QAC 2016), "Guide to Quality in Analytical Chemistry – An Aid to Accreditation", 3rd edition (2016)
8. Féret, R, "On the compactness of the mortars". Annales des Ponts et Chaussées, Vol. 7, No 4 (1892) 5-164
9. Freiesleben Hansen, P., Pedersen, J., "Curing of Concrete Structures", CEB Information Bulletin, Vol. 166, (1985) 42
10. Gavela, S., Papadakos G., Kaselouri – Rigopoulou V., "A suggestion for standardizing a traceable process for the determination of the mechanical properties of concrete containing thermoplastic polymers as aggregates", in "Thermoplastic Composites – Emerging Technology, Uses and Prospects", Materials Science and Technologies NOVA publications book, 2017, ISBN: 978-1-53610-727-2.
11. ISO, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, ISO/IEC 17025: 2017 (2017)
12. ISO, Metallic materials - Calibration and verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines -

- Calibration and verification of the force-measuring system, ISO 7500-1:2015 (2015)
13. Metwally abd allah, Abd elaty, “Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model”. HBRC Journal, Vol. 10, (2014) 145–155
  14. Sotiropoulou, A., Gavela, S., Nikoloutsopoulos, N., Passa, D., Papadakos, G., “Experimental study of wood shaving addition in mortar and statistical modeling on selected effects”. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, Vol. 26, (2017) 1-2
  15. Yeh, C., “Generalization of strength versus water–cementitious ratio relationship to age”. Cement and Concrete Research, Vol. 36 (2006) 1865–1873
  16. Παπαδάκος, Γ.Ν., Καράγγελος, Δ.Ι., Πετρόπουλος, Ν.Π., Αναγνωστάκης, Μ.Ι., Χίνης, Ε.Π., Σιμόπουλος, Σ.Ε., «Αβεβαιότητα που εισάγεται στη μέτρηση ραδιενέργειας εδάφους από τα σφάλματα ορισμού δειγματοληψίας», Μετρολογία 2016, 6ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Πολεμικό Μουσείο (Αθήνα, 13-14 Μαΐου, 2016)
  17. Σιμόπουλος, Σ.Ε., «Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών», Παρουσιάσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος (<http://nuclear.ntua.gr>), Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα (2003)