

# ΠΡΟΤΑΣΗ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Κ. Γ. Παπανικολάου

*Λέκτορας, Εργαστήριο Μηχανικής & Τεχνολογίας Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστημίου Πατρών.*

Σ. Λυκούδης

*Γεωλόγος, Υπεύθυνος Εργαστηρίου Κλιμακίου Επίβλεψης Θεσσαλονίκης, ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.*

Ν. Γαλανάκης & Ε. Χονδρογιάννης

*Τεχνολόγοι φοιτητές Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστημίου Πατρών.*

*Λέξεις κλειδιά: αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, ιδιότητες νωπής φάσης, ποιοτικός έλεγχος*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Σκοπός της εργασίας είναι η εργαστηριακή αποτίμηση ενός νέου μεγέθους "ποιοτικής βαθμολόγησης" συνθέσεων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) σε εργοστάσια παραγωγής ετοίμου σκυροδέματος ή σε εργοστάσια προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων, με βάση την αξιολόγηση των ιδιοτήτων του υλικού κατά τη νωπή του φάση. Βασικό στοιχείο της διαδικασίας αποτελεί η συσχέτιση των τριών κυριότερων (και πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενων) δοκιμών [slump-flow (S/F), V-funnel (V-f) και L-box] με τις διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε υγρασία των αδρανών.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ – self compacting, ή self consolidating, concrete – SCC – στη διεθνή βιβλιογραφία) είναι το είδος του σκυροδέματος το οποίο δύναται να πληρώσει οποιονδήποτε τύπο (ξύλοτυπο, μεταλλότυπο, πλαστικότυπο, κτλ.) και να αποκτήσει ικανή συμπίκνωση αποκλειστικά μέσω της βαρύτητας και της ρεολογικής του συμπεριφοράς. Κύριο χαρακτηριστικό του ΑΣΣ είναι η ιδιαίτερα αυξημένη του ρευστότητα, σε συνδυασμό με τη διατήρηση της απαιτούμενης «σταθερότητας», η οποία αποτελεί μέτρο της αντίστασης διαχωρισμού του αναμίγματος. Πρόκειται για σκυρόδεμα προηγμένης τεχνολογίας, το οποίο εμπίπτει στην κατηγορία των σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας (σκυροδέματα με επιλεκτικά αναβαθμισμένες ιδιότητες).

Ένα από τα σημεία διαφοροποίησης του συμβατικού σκυροδέματος από το ΑΣΣ είναι η μεγαλύτερη ευαισθησία των συνθέσεων του τελευταίου στις διακυμάνσεις παραγόντων που σχετίζονται με συγκεκριμένες ιδιότητες των συστατικών υλικών (π.χ. ποσοστό υγρασίας αδρανών, κοκκομετρική διαβάθμιση), αλλά και παραγόντων που αφορούν την παραγωγική διαδικασία (π.χ. αλληλουχία και χρόνος ανάμιξης των συστατικών, είδος αναμκτήρα) και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (κυρίως θερμοκρασία και υγρασία). Η Εικόνα 1 συγκεντρώνει και κατηγοριοποιεί τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της ρεολογικής συμπεριφοράς μίας σύνθεσης ΑΣΣ.

Η βέλτιστη παραγωγή ΑΣΣ σε εργοστάσια ετοιμού σκυροδέματος, ή σε παρασκευαστήρια εργοστασίων προκατασκευής, ως ζητούμενο του ποιοτικού ελέγχου, πρέπει να στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των μεταβολών των ρεολογικών χαρακτηριστικών των συνθέσεων, λόγω διακυμάνσεων των προαναφερθέντων παραγόντων. Είναι πρόδηλο ότι (εντός προκαθορισμένων ορίων) και οι ιδιότητες του σκληρυμένου ΑΣΣ (συμπεριλαμβανομένων και των χαρακτηριστικών ανθεκτικότητας) θα πρέπει να παρουσιάζουν μία εξίσου ανελαστική απόκριση ως προς τις αυξομειώσεις των παραγόντων παραγωγής.

Υπογραμμίζεται το γεγονός ότι οι προσπάθειες του συστήματος ποιοτικού ελέγχου για ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων στις παραμέτρους που επηρεάζουν τις ιδιότητες του ΑΣΣ (κυρίως σε νωπή φάση) δεν αρκούν από μόνες τους για να εξασφαλίσουν σταθερές συνθέσεις. Ακόμη και υπό εργαστηριακού τύπου συνθήκες, η ίδια σύνθεση ΑΣΣ θα παρουσιάσει διακύμανση στις τιμές των δοκιμών που θα διεξαχθούν κατά τη νωπή φάση του υλικού (με συντελεστή διασποράς έως και 10%, ανάλογα με τη δοκιμή, βάσει σχετικής εμπειρίας στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών, αλλά και άλλων ερευνητών, όπως οι Nunes et al. 2006). Επιπλέον, το κόστος που απαιτείται για την επίτευξη συνθηκών παραγωγής, όπου όλες οι σχετιζόμενες με το ΑΣΣ παράμετροι έχουν ελάχιστη διασπορά (επιδίωξη αμφίβολα πραγματιστική), είναι ιδιαίτερα υψηλό.

Από την άλλη πλευρά, η απουσία ενός αποτελεσματικού συστήματος ποιοτικού ελέγχου, μεταθέτει την επίλυση των ρεολογικών προβλημάτων σε μίγματα ΑΣΣ στο εργοτάξιο (εάν πρόκειται για έτοιμο σκυρόδεμα), ή στην γραμμή παραγωγής (εάν πρόκειται για εργοστάσιο προκατασκευής και μόνο εάν χρησιμοποιείται εποχούμενος αναμκτήρας για τη σκυροδέτηση των στοιχείων). Οι διορθωτικές ενέργειες σε αυτή την περίπτωση, οι οποίες - αν γίνονται - περιορίζονται στην (συχνά άκριτη) προσθήκη υπερ-ρευστοποιητή, ενέχουν κινδύνους για το τελικό μίγμα (μείωση ικανότητας ροής μέσω στενών ανοιγμάτων, διαχωρισμός, μικρές πρώιμες αντοχές, κ.ά.).

## Πρώτες Ύλες

**Τσιμέντο** (χημική σύσταση, λεπτότητα)

**Πρόσθετες κονίες** – [κυρίως πληρωτικά υλικά, χαμηλού συντελεστή ενεργότητας (χημική σύσταση, λεπτότητα)]

**Αδρανή** (σχήμα, υφή, επιφανειακή υγρασία)

**Ρυθμιστής ιξώδους** (χημική σύσταση, δραστικότητα ~ χρόνος ζωής προϊόντος)

**Υπερ-ρευστοποιητής** (χημική σύσταση – συμβατότητα με το τσιμέντο, δραστικότητα ~ χρόνος ζωής προϊόντος)

## Σύνθεση

**Περιεκτικότητα χονδροκόκκων αδρανών,  $V_{ag}$**

**Μέγεθος μέγιστου κόκκου,  $D_{max}$ , και κοκκομετρία αδρανών**

**Λόγος (κατ'όγκον) νερού προς υλικά λεπτού καταμερισμού (τσιμέντο + πρόσθετες κονίες),  $V_w/V_p$**

**Λόγος (κατ'όγκον) άμμου προς τσιμεντοκονίαμα,  $V_s/V_m$**

**Λόγος (κατά βάρος) πρόσθετων κονιών προς τσιμέντο,  $W_f/W_c$**

**Λόγος (κατά βάρος) υπερ-ρευστοποιητή προς υλικά λεπτού καταμερισμού (τσιμέντο + πρόσθετες κονίες),  $W_{sp}/W_p$**

## Ανάμιξη

**Τύπος αναμικτήρα** (η σφοδρότητα και η ομοιογένεια της ανάμιξης εξαρτώνται από τα: ισχύς αναμικτήρα, διάταξη βραχιόνων, χωρητικότητα, μέγιστος επιτρεπόμενος όγκος αναμίγματος, σύστημα παρακολούθησης ενεργειακής απόδοσης αναμικτήρα, δυνατότητα οπτικής παρακολούθησης του μίγματος – π.χ. μέσω κάμερας)

**Ακρίβεια ζυγιστικών μέσων**

**Αλληλουχία και χρόνος ανάμιξης**

**Εμπειρία χειριστή παρασκευαστηρίου**

## Άλλες παράμετροι

**Θερμοκρασία, Υγρασία, Παρερχόμενος χρόνος από τη λήξη της ανάμιξης**

**Εικόνα 1** Παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της ρεολογικής συμπεριφοράς μίας σύνθεσης ΑΣΣ.

Καθώς το αρχικό κόστος του ΑΣΣ (πρωτογενές κόστος, ή κόστος υλικών) είναι μεγαλύτερο από το κόστος συμβατικού σκυροδέματος της ίδιας κατηγορίας αντοχής, έτσι και το κόστος του σφάλματος που βαρύνει τον παραγωγό είναι επίσης μεγαλύτερο. Το σφάλμα αυτό αντιστοιχεί στην απόρριψη ενός «καλού» μίγματος, δηλ. ενός μίγματος το οποίο με τις κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες θα συμμορφώνετο με τις ρεολογικές απαιτήσεις του έργου και, προφανώς, στην απόρριψη ενός «κακού» μίγματος, δηλ. ενός μίγματος το οποίο ανεξαρτήτως τυχόν διορθωτικών ενεργειών δεν συμμορφώνεται με τις ρεολογικές απαιτήσεις του έργου.

Καθίσταται, επομένως, σαφές ότι η επίτευξη σταθερών συνθέσεων εξαρτάται πρωτίστως από τον ίδιο τον σχεδιασμό τους. Εάν, υπό αυτή την έννοια, ο σχεδιασμός της σύνθεσης είναι επιτυχής, τότε οι διακυμάνσεις των παραμέτρων παραγωγής (και ιδιαίτερα εάν οι τιμές αυτών ακολουθούν μία κανονική κατανομή) αποκτούν (και πρέπει να αποκτούν) δευτερεύουσα σημασία για τη σταθερότητά της. Η πολυπαραμετρικότητα του σχεδιασμού συνθέσεων ΑΣΣ, όπως αυτή καταδεικνύεται και από την Εικόνα 1, τον καθιστά δυσχερή, ειδικά εάν δεν υπάρχει γνώση σχετικά με τον βαθμό επιρροής της κάθε παραμέτρου.

## 2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΣ

### 2.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού σύνθεσης ΑΣΣ

Ο ορθός σχεδιασμός μίας σύνθεσης ΑΣΣ πρέπει να έχει ως αφετηρία τον προσδιορισμό των επιθυμητών στοχοσήμων για το σύνολο των επιτελεστικότητων της σύνθεσης (ρεολογική συμπεριφορά, μηχανικές ιδιότητες, ανθεκτικότητα), οι οποίες υπαγορεύονται από τις ανάγκες μίας συγκεκριμένης εφαρμογής. Έτσι, οι ρεολογικές απαιτήσεις (ικανότητα πλήρωσης μέσω ανεμπόδιστης ροής, ικανότητα ροής μέσω στενών ανοιγμάτων και αντίσταση σε διαχωρισμό) μίας σύνθεσης ΑΣΣ προσδιορίζονται βάσει των παρακάτω στοιχείων:

- Μορφολογία σκυροδετούμενων στοιχείων: Είδος στοιχείου – Διάταξη οπλισμού – Απαιτούμενη ποιότητα εμφανών επιφανειών
- Τεχνολογικά χαρακτηριστικά και διαδικασία σκυροδέτησης: Μέσον σκυροδέτησης [δηλ. παρεχόμενη δυναμική ενέργεια από το μέσον σκυροδέτησης (π.χ. εποχούμενος αναμκτήρας) στο ανάμιγμα] – Είδος τύπων [δηλ. μέγιστος επιτρεπόμενος ρυθμός σκυροδέτησης, ως συνάρτηση της ρευστότητας του αναμίγματος, έτσι ώστε να αποσοβείται ο κίνδυνος αστοχίας των καλουπιών] – Χρονισμός κύκλου παραγωγής [δηλ. εξάρτηση των ρεολογικών χαρακτηριστικών από το χρονικό διάστημα μεταξύ λήξης ανάμιξης και λήξης σκυροδέτησης]

- Περιβαλλοντικές συνθήκες [υγρασία και θερμοκρασία]
- Απαιτήσεις πρώιμων αντοχών.

Η ποσοτικοποίηση των ρεολογικών απαιτήσεων πραγματοποιείται με τη διεξαγωγή μίας σειράς ειδικά σχεδιασμένων δοκιμών για το ΑΣΣ σε νωπή φάση. Η επιλογή των δοκιμών εκείνων που τελικά θα χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης του μίγματος (καθώς περισσότερες από μία δοκιμές έχουν αναπτυχθεί για την ίδια ιδιότητα) εξαρτάται και πάλι από τα ειδικά χαρακτηριστικά της εφαρμογής. Εάν, για παράδειγμα, το ΑΣΣ πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη σκυροδέτηση στοιχείων μεγάλου ύψους, τότε ίσως κριθεί σκόπιμη η διεξαγωγή δύο δοκιμών για την εκτίμηση της αντίστασης σε διαχωρισμό (π.χ. screen stability test και segregation probe test). Παρά ταύτα, η κοινή πρακτική έχει αναδείξει τρεις δοκιμές ως τις πλέον ευρύτερα χρησιμοποιούμενες: τη δοκιμή κάθισης-εξάπλωσης [Slump-Flow (S/F)], τη δοκιμή V-funnel (V-f) και τη δοκιμή L-box.

## 2.2 Η έννοια της σθεναρότητας μίας σύνθεσης ΑΣΣ

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής (όπως αυτές περιεγράφησαν στην προηγούμενη ενότητα), τις παραμέτρους που συνοψίζονται στην Εικόνα 1, καθώς και τη διαθεσιμότητα και το κόστος των πρώτων υλών, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός της σύνθεσης ΑΣΣ. Λόγω της πολυπαραμετρικότητας του προβλήματος και δεδομένης της ύπαρξης ενός μεγάλου εύρους εμπορικών χημικών προσμίκτων και ορυκτών προσθέτων, είναι σαφές ότι περισσότερες από μία συνθέσεις είναι σε θέση να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η επιλογή της βέλτιστης από αυτές δεν θα πρέπει να γίνει με μοναδικό κριτήριο το πρωτογενές κόστος. Εκτός αυτού, θα πρέπει να συνυπολογιστεί το κόστος που συνδέεται με την απόκλιση των ρεολογικών χαρακτηριστικών των συνθέσεων από τις τιμές του σχεδιασμού, εξαιτίας διακυμάνσεων των παραμέτρων παραγωγής.

Βάσει των παραπάνω, ιδιαίτερα χρήσιμη κρίνεται η εισαγωγή της έννοιας της «σθεναρότητας» μίας σύνθεσης ΑΣΣ, σε μία προσπάθεια να αποδοθεί στην ελληνική ο αγγλικός όρος «robustness». Έτσι, σθεναρότητα μίας σύνθεσης νοείται η «ανοχή» της σε διακυμάνσεις των παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας, οι οποίες οφείλονται σε στατιστικά προβλέψιμες αποκλίσεις από τα επιθυμητά μεγέθη των παραμέτρων της παραγωγής (π.χ. από τις επιθυμητές κοκκομετρικές καμπύλες για κάθε κλάσμα αδρανών), σε σφάλματα (π.χ. σφάλματα ζυγομέτρησης), ή και σε απρόβλεπτα περιστατικά.

Με τον όρο «ανοχή» περιγράφεται το εύρος των μεταβολών των μετρήσιμων ρεολογικών χαρακτηριστικών της σύνθεσης, λόγω των διακυμάνσεων στις παραμέτρους παραγωγής, από τα αντίστοιχα ρεολογικά χαρακτηριστικά της «σύνθεσης αναφοράς», ή της «σύνθεσης σχεδιασμού». Η τελευταία αποτελεί – απουσία εναλλακτικών συνθέσεων – τη σύνθεση-στόχο του παραγωγού για ένα συγκεκριμένο έργο και, επομένως, οι τιμές των ιδιοτήτων της (σε όλες τις φάσεις του υλικού: νωπή, πήξης-σκλήρυνσης, πλήρως ενυδατωμένη) αποτελούν τα στοχόσημα για τις ιδιότητες κάθε δόσης της συγκεκριμένης σύνθεσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η «σύνθεση αναφοράς» αντιστοιχεί σε ένα σύνολο συνθηκών και παραμέτρων παραγωγής με συγκεκριμένες τιμές, οι οποίες συνιστούν τη βάση μέτρησης για τον καθορισμό της οιασδήποτε διακύμανσης.

Κάνοντας χρήση των ορισμών που εδόθησαν παραπάνω, μία σύνθεση Α χαρακτηρίζεται ως μικρότερης ανοχής (επομένως μεγαλύτερης ευαισθησίας, ή μικρότερης σθεναρότητας) από μία σύνθεση Β, όταν για μεταβολές των ιδίων παραμέτρων παραγωγής και του ίδιου εύρους, η σύνθεση Α παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις επιθυμητές τιμές των νωπών της ιδιοτήτων, από ότι η σύνθεση Β. Εναλλακτικά, η σύνθεση Α είναι μικρότερης σθεναρότητας από τη σύνθεση Β όταν, συγκριτικά με την τελευταία, επιτρέπει ένα μικρότερο εύρος μεταβολών των (ιδίων) παραμέτρων παραγωγής για την επίτευξη του ίδιου βαθμού συμφωνίας μεταξύ επιθυμητών και επιτευχθέντων ρεολογικών χαρακτηριστικών (αλλά και χαρακτηριστικών αντοχής και ανθεκτικότητας). Είναι προφανές ότι η προστιθέμενη αξία μίας σύνθεσης αυξάνεται με την αύξηση της σθεναρότητάς της.

### *2.3 Ποσοτικός προσδιορισμός της σθεναρότητας μίας σύνθεσης ΑΣΣ*

Η ως άνω αναπτυχθείσα ανάλυση δεν είναι εφαρμόσιμη, εάν δεν ποσοτικοποιηθεί κατάλληλα η σθεναρότητα μίας σύνθεσης. Πρώτο βήμα σε αυτή τη διαδικασία αποτελεί η ιεράρχηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά νωπού ΑΣΣ, με κριτήριο τη σπουδαιότητά τους. Παράμετροι που δεν είναι εφικτό να λάβουν διακριτές τιμές (π.χ. η εμπειρία του χειριστή του παρασκευαστηρίου) και παράμετροι που παραμένουν (ή θεωρούνται) σταθερές κατά την παραγωγή (π.χ. χαρακτηριστικά αναμικτήρα) θα πρέπει να παραληφθούν από την διαδικασία. Έτσι, από τις παραμέτρους που συνοψίζονται στην Εικόνα 1, εκείνες που θεωρούνται ότι επηρεάζουν με τις διακυμάνσεις τους τα ρεολογικά χαρακτηριστικά μίας συγκεκριμένης σύνθεσης ΑΣΣ είναι όλες οι παράμετροι σύνθεσης και η επιφανειακή υγρασία των αδρανών (για δεδομένη θερμοκρασία και υγρασία ατμόσφαιρας και για χρόνο αξιολόγησης των ρεολογικών ιδιοτήτων της σύνθεσης ίσο με τη λήξη της ανάμιξης,  $t_0$ ).

Εάν  $y^k$  είναι οι  $k$  το πλήθος εξαρτώμενες τιμές των ιδιοτήτων νωπού ΑΣΣ (π.χ. η τιμή της δοκιμής κάθισης/εξάπλωσης σε mm, η τιμή της δοκιμής V-funnel σε sec και η τιμή της δοκιμής L-box σε αδιάστατες μονάδες, με  $k = 3$ ), τότε αυτές συνδέονται με τις παραμέτρους σύνθεσης και την επιφανειακή υγρασία των αδρανών (παραμέτροι  $x$ ) με μία γενική εξίσωση, η δευτεροβάθμια μορφή της οποίας έχει την παρακάτω μορφή:

$$y^k = \alpha_0^k + \sum_{i=1}^n \alpha_i^k x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii}^k x_i^2 + \sum_{i < j} \alpha_{ij}^k x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

όπου  $n$  το πλήθος των παραμέτρων  $x$ ,  $\alpha_0^k$  ο ανεξάρτητος όρος,  $\alpha_i^k$  και  $\alpha_{ii}^k$  οι συντελεστές βαρύτητας της παραμέτρου  $x_i$  και του τετραγώνου της, αντίστοιχα,  $\alpha_{ij}^k$  ο συντελεστής βαρύτητας της αλληλεπίδρασης των παραμέτρων  $x_i$  και  $x_j$  και  $\varepsilon$  το σφάλμα που οφείλεται στον αποκλεισμό όρων τρίτου και άνω βαθμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα ρεολογικά χαρακτηριστικά μίας σύνθεσης δεν εξαρτώνται μόνο από τις επί μέρους παραμέτρους που την επηρεάζουν, αλλά και από συνδυασμούς των εν λόγω παραμέτρων. Μερικές δε από αυτές αλληλεπιδρούν συνεργιστικά, ενώ άλλες ανταγωνιστικά.

Κάθε παράμετρος  $x_i$  λαμβάνει τιμές μεταξύ κάποιων μέγιστων και ελάχιστων ορίων [βλ. εξ. (2)], οι οποίες καθορίζονται από το σύστημα ποιοτικού ελέγχου της μονάδας παραγωγής. Για παράδειγμα, αυτά τα όρια δύνανται να αντιστοιχούν στις μέγιστες επιτρεπτές αποκλίσεις των πραγματικών ποσοτήτων δοσολογίας (τελικές ποσότητες στον αναμικτήρα) από τις θεωρητικά προκαθορισμένες (ποσότητες τροφοδοσίας της μονάδας ελέγχου του παρασκευαστηρίου).

$$x_{i,max} \leq x_i \leq x_{i,min} \quad (2)$$

Εάν για μία συγκεκριμένη σύνθεση και για ένα συγκεκριμένο έργο τα στοχόσημα των εξαρτώμενων μεταβλητών  $y^k$  είναι ίσα με  $y^{k,opt}$ , τότε το σύστημα του ποιοτικού ελέγχου του παρασκευαστηρίου (ή/και το σύστημα ποιοτικού ελέγχου του αναδόχου του έργου) πρέπει να ορίσει το πεδίο τιμών (ξεχωριστό για κάθε μία μεταβλητή) μέσα στο οποίο πρέπει να κινούνται οι τιμές των  $y^k$  για να ικανοποιείται ο έλεγχος [βλ. εξ. (3)]. Τα όρια αυτού του πεδίου δύνανται να ισαπέχουν από την τιμή  $y^{k,opt}$ , κατά μία σταθερή ποσότητα (π.χ.  $y^{k,tol}$ ), αρκεί να ικανοποιούνται οι οριακές τιμές που από μόνες τους θέτουν οι δοκιμές νωπού ΑΣΣ (π.χ.  $y_{max}^k = 1$  για L-box).

$$y_{min}^k \leq y^k \leq y_{max}^k \text{ με } y_{min}^k = y^{k,opt} - y^{k,tol} \ \& \ y_{max}^k = y^{k,opt} + y^{k,tol} \quad (3)$$

Μία σύνθεση ΑΣΣ είναι σθεναρή, εάν για οποιαδήποτε τιμή οιασδήποτε παραμέτρου  $x_i$  [εντός του πεδίου τιμών της εξ. (2)] οι τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών  $y^k$  (δηλ. των επιλεγείσων δοκιμών νωπού ΑΣΣ) βρίσκονται εντός του πεδίου τιμών της εξ. (3). Εάν η εξίσωση (1) ήταν μονοπαραμετρική, τότε η κλίση της  $y^k = f(x_i)$ ,  $\forall x_i \in [x_{i,min}, x_{i,max}]$ , θα εξέφραζε το μέγεθος της μεταβολής της εξαρτημένης μεταβλητής  $y^k$  συναρτήσει μεταβολών της παραμέτρου  $x_i$ . Είναι πρόδηλο, επομένως, ότι η σθεναρότητα μίας σύνθεσης (ως προς μία συγκεκριμένη παράμετρο  $x_i$ ) αυξάνεται όσο μειώνεται η πρώτη μερική παράγωγος της εξ. (1) ως προς την παράμετρο αυτή [βλ. εξ. (4)]. Βάσει των παραπάνω, ένα μέτρο της σθεναρότητας συνθέσεων ΑΣΣ που αφορά σε συγκεκριμένη ιδιότητα κατά τη νωπή φάση του υλικού [δείκτης εξάρτησης  $R^k$  στην εξ. (5) για την ιδιότητα  $k$ ] δύναται να εκφραστεί ως το άθροισμα των απολύτων τιμών των πρώτων μερικών παραγώγων της εξ. (1). Η ποσοτικοποίηση της καθολικής σθεναρότητας μίας σύνθεσης ΑΣΣ ( $R$ ) μπορεί να προκύψει από ένα γραμμικό συνδυασμό των επί μέρους δεικτών εξάρτησης  $R^k$  ( $m$  το πλήθος, όσες και οι επιλεγείσες δοκιμές νωπού ΑΣΣ). Οι συντελεστές βαρύτητας στην εξ. (6) πρέπει να επιλέγονται βάσει της εκάστοτε εφαρμογής. Για παράδειγμα, εάν πρόκειται για σκυροδέτηση επίπεδων επιφανειών με μικρές απαιτήσεις όπλισης, τότε ο συντελεστής βαρύτητας της δοκιμής L-box μπορεί να λαμβάνει μικρές τιμές. Γενικά, όσο μικρότερη η τιμή του  $R$ , τόσο μεγαλύτερη η σθεναρότητα της σύνθεσης.

$$\frac{\partial y^k}{\partial x_i} = \alpha_i^k + 2\alpha_{ii}^k x_i + \sum_{j=i+1}^n \alpha_{ij}^k x_j \quad (4)$$

$$R^k = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y^k}{\partial x_i} \right| \quad (5)$$

$$R = \sum_{k=1}^m \lambda^k R^k \quad (6)$$

#### 2.4 Υπολογισμός της σθεναρότητας μίας σύνθεσης ΑΣΣ στην πράξη

Ο πειραματικός προσδιορισμός των συντελεστών  $\alpha$  στην εξ. (1) είναι πρακτικά αδύνατος, καθώς θα προϋπέθετε τη διεξαγωγή ενός εξαιρετικά εκτενούς πειραματικού προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, έστω  $x_i^0$  οι τιμές των παραμέτρων μίας σύνθεσης-βάσης (με αντίστοιχες τιμές νωπών ιδιοτήτων  $y^{k-0}$ ). Εάν η κάθε μία παράμετρος μπορεί να λάβει εντός του πεδίου τιμών της  $s$  το πλήθος (έτερες της  $x_i^0$ ) τιμές [εκατέρωθεν της  $x_i^0$  -



κατά την εξ. (7)], τότε ο συνολικός αριθμός όλων των πιθανών συνδυασμών (δηλαδή, όλων των πιθανών «σεναρίων» της εν λόγω σύνθεσης) είναι της τάξης του  $(s + 1)^n$ . Για παράδειγμα, για έξι παραμέτρους  $x$  και για επτά διακριτές τιμές καθεμίας από αυτές (συμπεριλαμβανομένης της τιμής-βάσης), θα προέκυπταν 117.649 παραλλαγές της βασικής σύνθεσης, βάσει των οποίων οι συντελεστές  $\alpha$  θα υπολογίζονταν με τη χρήση τεχνικών παλινδρόμησης.

$$x_i = \left\{ \left( x_i^0 - \frac{s}{2} dx_i \right), \dots, \left( x_i^0 - 2dx_i \right), \left( x_i^0 - dx_i \right), x_i^0, \left( x_i^0 + dx_i \right), \left( x_i^0 + 2dx_i \right), \dots, \left( x_i^0 + \frac{s}{2} dx_i \right) \right\}$$

$$\text{ή αλλιώς } x_i = \left\{ x_i^{-s/2}, \dots, x_i^{-2}, x_i^{-1}, x_i^0, x_i^{+1}, x_i^{+2}, \dots, x_i^{+s/2} \right\},$$

$$\text{όπου } dx_i = \frac{x_{i,max} - x_{i,min}}{s} \text{ και } s \text{ άρτιος ακέραιος αριθμός} \quad (7)$$

Οι Nunes et al. (2006) διεξήγαγαν μία πειραματική μελέτη κατά το βασικό τμήμα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν πέντε παράμετροι με δύο εναλλακτικές τιμές της κάθε παραμέτρου εκατέρωθεν της βασικής. Οι παράμετροι οι οποίες ελήφθησαν υπ'όψιν ήταν όλες οι παράμετροι σύνθεσης της Εικόνας 1, πλην του μεγέθους του μέγιστου κόκκου και της κοκκομετρίας των αδρανών. Η έρευνά τους απέδειξε ότι ο σημαντικότερος συντελεστής βαρύτητας της εξ. (1) (με διαφορά τάξης μεγέθους από την πλειονότητα των υπολοίπων), για όλες τις επιλεγείσες δοκιμές νεπού ΑΣΣ (Slump-flow,  $T_{50}$ , V-funnel και U-box), είναι ο συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή του λόγου (κατ'όγκον) νερού προς υλικά λεπτού καταμερισμού (τσιμέντο + πρόσθετες κονίες),  $V_w/V_p$ . Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την σπουδαιότητα της παραμέτρου  $V_w/V_p$ . Λιγότερο σημαντικές απεδείχθησαν οι επιρροές των παραμέτρων  $W_{sp}/W_p$  και  $V_{ag}$ .

Οι Rigueira et al. (2007) διαμέσου μίας παραπλήσιας διαδικασίας με αυτή που περιεγράφη παραπάνω (σε εργοστασιακή όμως κλίμακα) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ακρίβεια στη δοσολόγηση των ποσοτήτων νερού και υλικών λεπτού καταμερισμού είναι ο πλέον αποφασιστικός παράγοντας για τον έλεγχο της σθεναρότητας μίας σύνθεσης. Κατά τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το ΑΣΣ (EFNARC, 2005), μία σύνθεση ΑΣΣ, για να χαρακτηρίζεται ως σθεναρή, θα πρέπει να έχει ανοχή σε αυξομειώσεις του συνολικού νερού ίσες με  $\pm 5 \sim 10 \text{ l/m}^3$ . Οι αυξομειώσεις αυτές αντιστοιχούν σε σφάλματα ζυγομέτρησης της τάξης του 6% και 4% για σκυρόδεμα κατηγορίας C40/50 και C20/25, αντίστοιχα, ή σε μία μέση αύξηση της περιεκτικότητας σε επιφανειακή υγρασία των αδρανών (κυρίως της άμμου) ίση με 1.5~2%.

Με βάση τα δεδομένα των Nunes et al. (2006), εάν ληφθεί υπ' όψιν μόνο η επίδραση της παραμέτρου  $V_w/V_p$  και εκτιμηθεί η τιμή της δοκιμής κάθισης-εξάπλωσης, το σφάλμα μεταξύ θεωρητικής και πραγματικής τιμής (για κάθε παραλλαγή της σύνθεσης-βάσης, δηλ. για κάθε διαφορετικό λόγο  $V_w/V_p$ ) εκτιμήθηκε από τους συγγραφείς της παρούσας εργασίας ίσο με 4% (αποκλείοντας τις συνθέσεις με τιμές V-funnel μεγαλύτερες από 12 mm). Ως απόρροια των παραπάνω, ο δείκτης σθεναρότητας  $R^k$  στην εξ. (5) μπορεί απλά να εκφραστεί ως το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας  $a_i^k$  και πιο συγκεκριμένα εκείνων που συνδέονται με την περιεκτικότητα σε νερό ( $a_w^k$ ) και με την κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών ( $a_{g.c.}^k$  - παράμετρο για την οποία δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα που να προσφέρονται για ποσοτικοποίηση της επιρροής αυτής της παραμέτρου στη ρεολογική συμπεριφορά του ΑΣΣ). Η επίδραση της κοκκομετρικής καμπύλης στα ρεολογικά χαρακτηριστικά μίας σύνθεσης ΑΣΣ δύναται να ποσοτικοποιηθεί μέσω της συσχέτισης των εξαρτημένων μεταβλητών  $y^k$  με μία χαρακτηριστική παράμετρο της κοκκομετρικής καμπύλης. Στην παρούσα εργασία προτείνεται η συσχέτιση των  $y^k$  με την παράμετρο  $n$  στην εξ. (8), η οποία βασίζεται στο προσομοίωμα Fuller.

$$YT_i = \frac{100}{D_{max}} \left( D_i - D_0 \right)^m \quad (8)$$

όπου  $YT_i$  το θεωρητικό διερχόμενο (επί τοις εκατό) ποσοστό από το κόσκινο  $I$ ,  $D_{max}$  ο μέγιστος κόκκος αδρανών,  $D_i$  το άνοιγμα βροχίδας του κόσκινου  $i$  και  $D_0$  το μέγεθος κόκκου για  $YT_i = 0$ .

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Με σκοπό τη διερεύνηση της εξάρτησης των ρεολογικών χαρακτηριστικών από αυξομειώσεις της περιεκτικότητας σε νερό συνθέσεων ΑΣΣ, διεξήχθη πειραματικό πρόγραμμα, το οποίο περιελάμβανε τη μελέτη 18 συνθέσεων, κατηγορίας αντοχής C20/25. Όλες οι συνθέσεις και οι αντίστοιχες τιμές των νωπών τους ιδιοτήτων (Slump-Flow, V-funnel και L-box) δίνονται στον Πίνακα 1. Για κάθε μία από τις δύο συνθέσεις-βάσης (συνθέσεις 4 και 13 στον Πίνακα 1) με περιεκτικότητα σε νερό ίση με  $255 \text{ kg/m}^3$ , διερευνήθηκαν έξι παραλλαγές, με διαφορά σε περιεκτικότητα συνολικού νερού ίση με -15, -10, -5, +5, +10 και +15  $\text{kg/m}^3$  [δηλ.  $dW_w = 5 \text{ kg/m}^3$  στην εξ. (7)], σε σύγκριση με τη σύνθεση-βάσης. Οι δύο συνθέσεις-βάσης διέφεραν κυρίως ως προς το είδος του υπερ-ρευστοποιητή (η διακεκομμένη γραμμή στον Πίνακα 1 διαχωρίζει τις δύο ομάδες συνθέσεων). Για κάθε μία από τις 18 συνθέσεις μελετήθηκε και η επιρροή του παρερχόμενου από τη λήξη της ανάμιξης χρόνου στις ιδιότητες νωπού ΑΣΣ [δηλ. απ' ευθείας μετά ( $t_0$ ), μισή ώρα μετά ( $t_{30}$ ) και μία ώρα μετά  $t_{60}$ ].

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: τσιμέντο τύπου CEM I 42,5 πληρωτική κονία ασβεστολιθικής παιπάλης, ποτάμια άμμος με υγρασία από 8% έως 11%, άμμος λατομείου με υγρασία από 1% έως 2%, δύο κλάσματα θραυστών ασβεστολιθικών χονδρόκοκκων αδρανών (4-8 και 8-16 mm), υπερ-ρυστοποιητής πολυκαρβοξυλικού αιθέρα (διαφορετικός για κάθε μία από τις δύο ομάδες συνθέσεων), βελτιωτικό ξώδους και επιβραδυντής πήξης (η μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των δοκιμών ήταν ίση με 20°C). Οι συνθέσεις 8, 9, 17 και 18 αποτελούν παραλλαγές των βασικών με διαφορές σε άλλες παραμέτρους εκτός της περιεκτικότητας σε νερό και παρουσιάζονται για λόγους πληρότητας. Ο Πίνακας 2 περιλαμβάνει τις τιμές των συντελεστών  $\alpha_i^k$  και  $\alpha_i^k(t)$  (χρονικά εξαρτώμενοι συντελεστές) για την παράμετρο της περιεκτικότητας σε συνολικό νερό ( $W_w$ ).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο για την εκτίμηση της ευαισθησίας μίας σύνθεσης στη διακύμανση της περιεκτικότητας σε νερό και της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών. Η ευαισθησία αυτή ποσοτικοποιείται μέσω της καθολικής σθεναρότητας, η οποία συνδυάζει με έναν ορθολογικό τρόπο τις ενδείξεις των τριών προαναφερθεισών δοκιμών και αποτελεί ένα κριτήριο επιλογής μεταξύ εναλλακτικών συνθέσεων.

#### 5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

EFNARC THE SELF-COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use. International Bureau for Precast Concrete - BIBM, CEMBUREAU, European Ready Mixed Concrete Organization - ERMCO, European Federation of Engineering Consultancy Associations - EFCA, European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures – EFNARC.

Nunes, S., Figueiras, H., Oliveira, P., Coutinho, J. and Figueiras, J., “A methodology to assess robustness of SCC mixtures”. Cement and Concrete Research, 36 (2006) 2115-2122.

Rigueira, J., Taengua, E. and Serna, P. “Robustness of SCC docages and its implications on large-scale production”, in Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete”, 3-5 September 2007, Gjent, Belgium.

#### 6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα χημικά πρόσμικτα ήταν ευγενική χορηγία της εταιρείας BASF C.C. HELLAS SA.

Πίνακας 1 Συνθέσεις ΑΣΣ.

α/α	T	K	N	Αδρανή (kg/m <sup>3</sup> )				Πρόσμικτα (kg/m <sup>3</sup> )			S/F (mm)			V-funnel (sec)			L-box		
	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	0-4 (Π)	0-4 (Λ)	4-8	8-16	VMA	SP	Stab.	t <sub>0</sub>	t <sub>30</sub>	t <sub>60</sub>	t <sub>0</sub>	t <sub>30</sub>	t <sub>60</sub>	t <sub>0</sub>	t <sub>30</sub>	t <sub>60</sub>
1	365	250	240	480	220	300	330	4	5.5	1.5	750	675	555	3.6	5.0	6.0	1.0	0.95	0.90
2	365	250	245	480	220	300	315	4	5.5	1.5	750	685	615	5.0	5.5	6.0	1.0	0.80	0.68
3	365	250	250	480	220	300	305	4	5.5	1.5	745	610	610	4.5	5.0	6.0	0.95	0.95	0.95
4	365	250	255	480	220	300	290	4	5.5	1.5	800	750	715	2.5	3.0	3.0	1.00	1.00	1.00
5	365	250	260	480	220	300	290	4	5.5	1.5	790	740	700	3.5	4.0	4.3	1.00	1.00	1.00
6	365	250	265	480	220	300	280	4	5.5	1.5	760	645	610	2.0	2.5	3.0	1.00	1.00	0.85
7	365	250	270	480	220	300	280	4	5.5	1.5	865	850	810	2.0	2.5	2.5	1.00	1.00	1.00
8	365	250	255	480	220	300	291	4	5.5	0.7	830	820	800	2.5	3.0	4.0	1.00	1.00	0.94
9	365	250	255	480	220	300	295	4	5.5	0.0	830	780	545	4.0	5.0	8.5	1.00	1.00	0.52
10	365	225	240	480	220	300	360	4	5.5	1.5	435	445	-	12.0	-	-	-	-	-
11	365	225	245	480	220	300	346	4	5.5	1.5	410	440	-	11.0	-	-	-	-	-
12	365	225	250	480	220	300	333	4	5.5	1.5	430	450	515	9.0	9.0	8.5	0.23	0.35	0.62
13	365	225	255	480	220	300	320	4	5.5	1.5	525	670	725	3.5	2.5	2.5	0.67	1.00	1.00
14	365	225	260	480	220	300	306	4	5.5	1.5	460	625	745	5.0	4.0	3.5	0.57	1.00	1.00
15	365	225	265	480	220	300	293	4	5.5	1.5	660	730	770	1.5	1.5	1.5	1.00	1.00	1.00
16	365	225	270	480	220	300	280	4	5.5	1.5	570	715	780	2.0	2.0	2.0	1.00	1.00	1.00
17	365	225	255	480	220	300	329	0	5.5	1.5	440	600	645	5.0	3.5	3.5	0.41	0.84	0.92
18	365	250	255	480	220	300	291	4	5.5	1.5	605	770	830	2.0	2.0	2.0	0.95	1.00	1.00

Σημείωση: (T) τσιμέντο, (K) πληρωτική κονία (ασβεστολιθική παιπάλη), (N) συνολικό νερό (λαμβάνοντας υπ' όψιν την περιεκτικότητα σε υγρασία και την απορροφητικότητα των αδρανών), [0-4 (Π)] ποτάμια άμμος, [0-4 (Λ)] άμμος λατομείου, (VMA) ρυθμιστής ιξώδους, (SP) υπερ-ρευστοποιητής, (Stab.) επιβραδυντής.

Πίνακας 2. Συντελεστές  $a_i^k$  και  $a_i^k$  για την παράμετρο της περιεκτικότητας σε συνολικό νερό ( $W_w$ ).

	$a_{W_w}^{S/F}$			$a_{W_w}^{V-f}$			$a_{W_w}^{L-b}$			$a_i^k$	$c_i^k$	$c_i^k = g$	$c_i^k = A_i^k + B_i^k$	$C_i^k$
	t <sub>0</sub>	t <sub>30</sub>	t <sub>60</sub>	t <sub>0</sub>	t <sub>30</sub>	t <sub>60</sub>	t <sub>0</sub>	t <sub>30</sub>	t <sub>60</sub>	$(A, B, C)_{W_w}^{S/F} =$	$(A, B, C)_{W_w}^{V-f} =$			
Mix A	2.93	4.75	7.04	-0.09	-0.10	-0.12	≥ 0.9 (για το 95%)			(-1.85, 0.07, 0)	(-16.6, -0.43, 0.03) × 10 <sup>-3</sup>			
Mix B	6.68	11.18	11.50	-0.38	-0.30	-0.28	= 1.0 (για το 67%)			(2.31, 0.10, 0)	(-16.6, -1.7, 0) × 10 <sup>-3</sup>			