

# Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΛΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΚΩΝ ΕΠΙ ΕΔΑΦΟΥΣ

*Επιμέλεια:*  
*Παν. Αναγνωστόπουλος*  
*Πολ. Μηχ., συνεργάτης του ΙΟΚ*

Η συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος είναι ένα φυσικό φαινόμενο, το οποίο, από μόνο του δεν συνιστά πρόβλημα.

Προβλήματα ανακύπτουν όταν η συστολή ξήρανσης επέρχεται στην περιοχή ακλονήτων στοιχείων, όπως τοιχίων, υποστηλωμάτων, παρακειμένων πλακών, υποκειμένων στρώσεων σκυροδέματος ή ή στην διεπιφάνεια με το έδαφος έδρασης της κατασκευής.

Όταν αυτό συμβαίνει - όταν δηλαδή η συστολή ξήρανσης είναι παρεμποδιζόμενη - αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα και μόλις αυτές υπερβούν την εφελκυστική του αντοχή δημιουργούνται ρωγμές.

Το πρόβλημα λοιπόν δεν είναι η συστολή ξήρανσης, αλλά οι ρηγματώσεις λόγω συστολής ξήρανσης. Στους τρόπους αντιμετώπισης του προβλήματος περιλαμβάνονται:

- § Η μείωση της συστολής ξήρανσης
- § Η μείωση των περιορισμών της συστολής
- § Η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος κατά το στάδιο εκδήλωσης της συστολής
- § Η καθυστέρηση της συστολής μέχρι το σκυρόδεμα να αποκτήσει επαρκή αντοχή
- § Η δημιουργία προϋποθέσεων εντοπισμού των ρηγματώσεων και η εφαρμογή προσθέτων ειδικών επιστρώσεων

## **Το σκυρόδεμα δεν τα πάει καλά με τον εφελκυσμό**

Η συστολή συνιστά μεταβολή του όγκου, ή άλλως, παραμόρφωση του σκυροδέματος. Παρά το ότι πολύ συχνά γίνεται αναφορά στην αντοχή ή φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος, πολύ σπάνια γίνεται αναφορά στην ικανότητα του σκυροδέματος να υποστεί παραμόρφωση χωρίς την εμφάνιση ρηγματώσεων, πράγμα που υποδηλώνει υπέρβαση της παραμόρφωσης θραύσης αυτού.

Σε κυλινδρικό δοκίμιο D:H = 150:300 mm, το οποίο εμφανίζει θραύση στα 30 MPa, αν μετρηθεί το ύψος του κυλίνδρου κατά την στιγμή της θραύσεως θα διαπιστωθεί ότι έχει υποστεί βράχυνση της τάξης 0,75-1,00 mm. Αν δοκίμιο από την ίδια παρτίδα σκυροδέματος υποβληθεί σε εφελκυσμό θα διαπιστωθεί ότι η επιμήκυνση θραύσης θα είναι της τάξης των 0,05 mm (~ 1/20 της παραμόρφωσης θραύσης σε θλίψη), παρά το γεγονός ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι της τάξης 1/10 της θλιπτικής του αντοχής.

Για τα περισσότερα σκυροδέματα η εμφάνιση ρωγμών (δηλ. εφελκυστικής αστοχίας) παρατηρείται όταν υποστούν εφελκυστικές παραμορφώσεις 0,1 έως 0,2 mm ανά μέτρο μήκους στοιχείου.

Το αξιοσημείωτο πάντως είναι ότι η συστολή εμφανίζει τιμές 5πλάσιες των ανωτέρω 0,5-1,0 mm ανά τρέχον μέτρο στοιχείου.

Η παρεμπόδιση της συστολής ισοδυναμεί με το να αφεθεί το σκυρόδεμα να συρρικνωθεί ελεύθερα και μετά να «τραβηχθεί» πίσω στα αρχικά περιμετρικά του όρια, είναι δε γνωστό ότι δεν μπορεί να εφελκυσθεί τόσο πολύ.

### **Τι προκαλεί την συστολή ξήρανσης;**

Το σκυρόδεμα είναι ένα μίγμα τσιμεντοπολτού και αδρανών.

Ο τσιμεντοπολτός, ο οποίος είναι μαλακός, πορώδης, απορροφητικός, δαπανηρός και συστέλλεται μέχρι και 1% του αρχικού του όγκου την πρώτη ημέρα μετά την σκυροδέτηση. Έτσι, το σκυρόδεμα με υψηλή περιεκτικότητα τσιμεντοπολτού είναι αναμενόμενο να συρρικνωθεί και ενδεχομένως να εμφανίσει και θραύση.

### **Για ποιον λόγο συρρικνώνεται ο τσιμεντοπολτός;**

Κατά την εξάτμηση του νερού από τον κορεσμένο τσιμεντοπολτό, οι κόκκοι των στερεών συστατικών του μίγματος τείνουν να πλησιάσουν πλησιέστερα μεταξύ τους. Η συρρίκνωση που προκαλείται από την απώλεια νερού αναφέρεται ως συστολή ξήρανσης και οι δημιουργούμενες ρηγματώσεις ως ρηγματώσεις συστολής ξήρανσης.

Η ρηγμάτωση η οποία εκδηλώνεται σύντομα μετά την σκυροδέτηση και ενόσω το σκυρόδεμα είναι ακόμη μαλακό ή «πλαστικό» χαρακτηρίζεται ως «πλαστική συστολή» και οι αντίστοιχες ρηγματώσεις ως «ρηγματώσεις πλαστικής συστολής».

Η διαφορά των δύο μορφών συστολής έχει να κάνει μόνον με την κατάσταση του σκυροδέματος την στιγμή που εκδηλώνονται. Προφανώς, ο περιορισμός τους προϋποθέτει ελάττωση του ρυθμού ξήρανσης του σκυροδέματος.

Πάντως ακόμη και αν περιορισθεί η ξήρανση ή εξαλειφθεί πλήρως, δεν πρόκειται να αποφευχθεί κάποια συστολή. Η ενυδάτωση του τσιμέντου, ακόμη και σε ερμητικά κλειστό χώρο ή κορεσμένο με υδρατμούς περιβάλλον, οδηγεί σε μείωση του όγκου του τσιμεντοπολτού, μέσω χημικής ή αυτογενούς συρρίκνωσης. Ο τελικός όγκος των υδριδίων (προϊόντων ενυδάτωσης) είναι μικρότερος από τον αρχικό όγκο του νερού και του τσιμέντου που αντιδρούν μεταξύ τους.

Η συνολική συρρίκνωση αποτελεί συνισταμένη της πλαστικής συστολής, της συστολής ξήρανσης και της χημικής συστολής, εξαρτάται δε από την δοσολογία του μίγματος, τα συστατικά του και τις συνθήκες ξήρανσης.

Η χημική συστολή αρχίζει ευθύς μόλις το τσιμέντο έρχεται σε επαφή με το νερό. Καθαρὰ μίγματα νερού και τσιμέντου εμφανίζουν συστολή έναντι του αρχικού τους όγκου της τάξης του 1% εντός των πρώτων 24 ωρών. Κατά τις πρώτες ώρες μετά την ανάμιξη η χημική συστολή του πολτού αποτελεί ενδεχομένως την κύρια συνιστώσα, ιδιαίτερα όταν καταβάλλεται προσπάθεια μείωσης της ξήρανσης. Η χημική συστολή εξαρτάται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου, ανεξαρτήτως όμως αυτού, αυξάνεται ανάλογα με την περιεκτικότητα του μίγματος σε τσιμεντοπολτό.

## **Μπορεί να προεκτιμηθεί η συστολή ξήρανσης;**

Χωρίς εργαστηριακούς ελέγχους του συγκεκριμένου μίγματος και αξιόπιστες πληροφορίες για το εργοταξιακό περιβάλλον, το μόνο που μπορεί να προβλεφθεί μετά βεβαιότητας είναι ότι το σκυρόδεμα θα συρρικνωθεί και τελικώς θα ρηγματωθεί όταν οι τάσεις συστολής υπερβούν την εφελκυστική του αντοχή.

Οι παράγοντες που συντελούν στην μειωμένη ακρίβεια των προβλέψεων είναι οι ακόλουθοι:

- Ø Παράμετροι μίγματος, όπως η πραγματική περιεκτικότητα σε νερό, η ποσότητα του τσιμεντοπολτού, η σύνθεση και η λεπτότητα του τσιμέντου.
- Ø Η καθαρότητα των αδρανών.
- Ø Η ειδική επιφάνεια (λόγος επιφάνειας προς όγκο) του διαστρωνομένου σκυροδέματος.
- Ø Η παρεμπόδιση της συρρίκνωσης.
- Ø Η εξέλιξη της θερμοκρασίας του διαστρωθέντος σκυροδέματος.
- Ø Οι καιρικές συνθήκες.

Η Επιτροπή 209 του ACI εκτίμησε την συνολική συστολή ξήρανσης σε ποσοστό μεταξύ 0,40 ‰ και 1,2 ‰ (0,4 / 1,2 mm/m) και διαπίστωσε ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξή της είναι τόσο μεταβλητοί ώστε απαιτούνται από 2 εβδομάδες έως 6 μήνες για να εκδηλωθεί το 50% του συνόλου της.

Έμπειροι κατασκευαστές δαπέδων από σκυρόδεμα αναφέρουν τιμές συστολής από 0,5 ‰ έως 1,0 ‰.

## **Η σύνθεση του μίγματος έχει σημασία.**

Γενικώς, τα υψηλής ποιότητας και καθαρά αδρανή εμφανίζουν σταθερότητα όγκου τόσο κατά την απορρόφηση νερού όσο και κατά την ξήρανση. Όταν όμως τα αδρανή περιέχουν αργίλους, ιλύες ή στρώμα σκόνης μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση της συρρίκνωσης. Η Επιτροπή A 209 του ACI αναφέρει ότι το μέγεθος των αδρανών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα, γιατί όσο μικρότερα είναι τα αδρανή τόσο αυξάνει ο όγκος του τσιμεντοπολτού. Ο δε τσιμεντοπολτός είναι το συστατικό που εμφανίζει την μεγαλύτερη συρρίκνωση.

Στην πράξη, τα λεπτότερα αδρανή (π.χ. μέγιστος κόκκος 20 mm αντί 30 mm) αυξάνουν μεν την εργασιμότητα του σκυροδέματος, αλλά οδηγούν σε ηυξημένη περιεκτικότητα σε τσιμεντοπολτό, άρα και ηυξημένη συστολή. Αντίστοιχα, όταν ο προβλεπόμενος λόγος νερού προς τσιμέντο επιτυγχάνεται με αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου αντί να γίνει επανασχεδιασμός του μίγματος ώστε να μειωθεί η ποσότητα του νερού (με διατήρηση της εργασιμότητας), το αποτέλεσμα είναι αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμεντοπολτό και κατά συνέπεια και της συρρίκνωσης.

Οι λεπτές, χαμηλής διαπερατότητας επιστρώσεις από σκυρόδεμα είναι επιρρεπείς σε συστολή λόγω τόσο του μικρού μεγέθους των αδρανών όσο και του υψηλού υδατοτσιμεντοσυντελεστή. Βέβαια, σήμερα παρέχονται δυνατότητες αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών με χρήση προσθίκτων.

Επισημαίνεται όταν η απαιτούμενη κάθιση επιτυγχάνεται με το νερό (στο συγκρότημα παραγωγής ή ακόμη-πράγμα που είναι απαράδεκτο-στο εργοτάξιο), κατά κανόνα αυξάνονται τα φαινόμενα της συστολής (συρρίκνωσης).

## **Πως και πότε πρέπει να ελαττώνεται η ξήρανση;**

Η χημική συστολή αρχίζει την στιγμή που το νερό έρχεται σε επαφή με το τσιμέντο. Η επιφάνεια του σκυροδέματος αρχίζει να ξηραίνεται όταν η εξάτμιση του νερού υπερβεί την εξύδρωση του σκυροδέματος.

Για τον λόγο αυτό συνθέσεις υψηλής κατηγορίας αντοχής είναι συνήθως επιρρεπείς στις ρηγματώσεις από πλαστική συστολή. Τα ίδια χαρακτηριστικά του μίγματος που καθιστούν το σκληρυνμένο σκυρόδεμα χαμηλής διαπερατότητας είναι εκείνα που περιορίζουν την εξύδρωση.

Ο περιορισμός της πρώιμης συστολής και ρηγμάτωσης που οφείλεται στην ξήρανση απαιτεί την λήψη μέτρων όπως ανεμοφράκτες, στέγαστρα, χημικές συνθέσεις περιορισμού της εξάτμισης ή ψεκάσμο σε συνδυασμό με την εφαρμογή υλικού δημιουργίας μεμβράνης προστασίας (curing compound) αμέσως μετά την ολοκλήρωση των εργασιών επεξεργασίας της επιφανείας (επιφανειακά τελειώματα).

Από την στιγμή που θα ολοκληρωθεί η πήξη του σκυροδέματος μπορεί να αρχίσει η συστηματική διαβροχή.

Πάντως, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σκόπιμο να αναβληθεί η σκυροδέτηση, μέχρι να επικρατήσουν ευνοϊκότερες καιρικές συνθήκες.

## **Αντιμετώπιση της ρηγματώσεως**

Η αποφυγή ή η καθυστέρηση της ξήρανσης μπορεί να αποδειχθεί αποτελεσματική στον περιορισμό των ρηγματώσεων που προκύπτουν από την συστολή ξήρανσης.

Καθώς το σκυρόδεμα πήζει και σκληραίνει τρεις, ανταγωνιστικές μεταξύ τους δράσεις αρχίζουν να λαμβάνουν χώρα:

- Ø Η ενυδάτωση του τσιμέντου σε συνδυασμό με την απώλεια νερού λόγω ξήρανσης οδηγούν το σκυρόδεμα σε συρρίκνωση, η οποία όταν είναι παρεμποδιζόμενη προκαλεί εφελκυστικές τάσεις.
- Ø Συνάμα το σκυρόδεμα καθίσταται περισσότερο δύσκαμπτο, οπότε αυξάνουν οι εφελκυστικές τάσεις που εκδηλώνονται λόγω της συρρίκνωσης.
- Ø Παράλληλα αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος έναντι ρηγματώσεως δεδομένου ότι προοδευτικά αναπτύσσεται η εφελκυστική του αντοχή.

Κατά συνέπεια:

- Ø Εάν η παραμόρφωση λόγω συστολής (συρρίκνωση) προηγείται της ανάπτυξης εφελκυστικής αντοχής, το σκυρόδεμα ρηγματώνεται.
- Ø Εάν η ανάπτυξη της εφελκυστικής αντοχής προηγείται της παραμόρφωσης συστολής, το σκυρόδεμα εξακολουθεί μεν να συρρικνώνεται, αλλά χωρίς την εμφάνιση ρηγματώσεων.

Στην πράξη τα φαινόμενα αυτά εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων και δεν είναι εφικτό να ποσοτικοποιηθούν με επαρκή αξιοπιστία. Ακόμη δυσκολότερο είναι να ερμηνευθεί στην συνέχεια γιατί ρηγματώθηκε η πλάκα Α και όχι η Β.

Γενικώς η στρατηγική αντιμετώπισης των ρηγματώσεων συστολής εστιάζεται σε δύο άξονες:

- Ø Καθυστερήση ξήρανσης και συρρίκνωσης με ταυτόχρονη λήψη μέτρων ενίσχυσης της πρώιμης αντοχής του σκυροδέματος (επαύξηση του ρυθμού ανάπτυξης της πρώιμης αντοχής).
- Ø Αποδοχή του αναπόφευκτου των ρηγματώσεων και «καθοδήγησή τους» σε επιλεχθείσες εκ των προτέρων θέσεις (αρμούς).

### **Κοπή αρμών με αρμοκόφτη**

Με την αρμοκοπή η πλάκα του σκυροδέματος αδυνατίζει σε προκαθορισμένες θέσεις, προκειμένου να επιβληθεί ο σχηματισμός των ρηγματώσεων στις θέσεις αυτές. Η πλήρωση των αρμών με σφραγιστικό υλικό, αν απαιτείται, είναι ευχερής.

Η κοπή των αρμών πρέπει να προχωρά σε βάθος τέτοιο ώστε να αδυνατίζει επαρκώς η διατομή, να γίνεται δε εγκαίρως, πριν οι τάσεις εκ της συστολής υπερβούν την διαθέσιμη εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

Το απαιτούμενο βάθος τομής είναι της τάξης του 25% του πάχους της πλάκας. Όσον αφορά τον χρόνο τομής, συνιστάται να γίνεται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα, δηλ. μόλις το σκυρόδεμα έχει σκληρύνει τόσο ώστε να μπορεί να κινηθεί ο αρμοκόφτης στην επιφάνειά του.

Γενικά, για την διαμόρφωση των αρμών ισχύει ο κανόνας «*γρήγορα και κοντά*».

## **Συγκεφαλαίωση των μεθόδων αντιμετώπισης των ρηγματώσεων**

**Για την μείωση των δυνατοτήτων συρρίκνωσης του μίγματος συνιστώνται:**

- Ø Μεγαλυτέρου μεγέθους αδρανή
- Ø Περισσότερα αδρανή
- Ø Τσιμέντα χαμηλής συρρίκνωσης (αντιστάθμισης συρρίκνωσης/ελαφρώς διογκωτικά, τσιμέντα μειωμένης χημικής συστολής)
- Ø Χαμηλότερος υδατοτσιμεντοσυντελεστής
- Ø Χαμηλότερη κάθιση
- Ø Καθαρότερα αδρανή
- Ø Πρόσμικτα μείωσης συρρίκνωσης (SRA: shrinkage reducing admixtures)

**Για την μείωση της ξήρανσης που οφείλεται σε περιβαλλοντικές συνθήκες:**

- Ø Σκίαστρα
- Ø Αντιανεμικά πετάσματα
- Ø Σκυροδέτηση αργά το απόγευμα
- Ø Αποφυγή σκυροδέτησης με χαμηλή σχετική υγρασία
- Ø Δημιουργία νέφους με ψεκάσμο (fog spray)
- Ø Χρήση προσμίκτου μείωσης εξάτμισης
- Ø Άμεση έναρξη της μετεπεξεργασίας του σκυροδέματος (curing)

**Για την καθυστέρηση της συρρίκνωσης ώστε να προηγηθεί η ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος συνιστάται:**

- Ø Έναρξη της μετεπεξεργασίας του σκυροδέματος το ταχύτερο δυνατόν

**Για την επαύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος συνιστώνται:**

- Ø Εφαρμογή δομικού πλέγματος στηριγμένου σε κατάλληλα καβαλέτα (αναβολείς)
- Ø Ράβδοι οπλισμού
- Ø Ειδική διάταξη οπλισμού στις γωνίες
- Ø Χρήση ινών, χαλυβδίνων ή πολυπροπυλενίου (συνθετικών)

**Για τον έλεγχο των ρηγματώσεων:**

- Ø Κοπή αρμών με αρμοκόφτη, αμέσως μετά την αρχική σκλήρυνση του σκυροδέματος
- Ø Διάταξη των αρμών όσο το δυνατόν εγγύτερα

**Για την μείωση της παρεμπόδισης:**

- Ø Επιμελημένη διαμόρφωση οπλισμών και αρμών για την παραλαβή μετακινήσεων
- Ø Διαμόρφωση ομαλής βάσης έδρασης της πλάκας
- Ø Χρήση φράγματος υδρατμών υπό το σκυρόδεμα

**Και τέλος, για κάθε ενδεχόμενο:**

***Να μην περιμένει ο κατασκευαστής και να μην υπόσχεται εδαφόπλακα μη ρηγματωμένη, χωρίς επιμελή σχεδιασμό της εργασίας και χωρίς πλήρη ανάλυση του κόστους.***