

Συρρίκνωση σκυροδέματος

Τι είναι η συρρίκνωση του σκυροδέματος και ποιες οι συνέπειές της;

Το σκυρόδεμα είναι ένα πορώδες υλικό που αποτελείται από τσιμέντο, αδρανή, νερό και χημικά πρόσμικτα. Οι υδροθερμικές μεταβολές του περιβάλλοντος και στο εσωτερικό της μικροδομής του σκυροδέματος, σε συνδυασμό με τις φυσικο-χημικές διεργασίες που συνοδεύουν την πρόοδο της ενυδάτωσης του τσιμέντου, οδηγούν σε ογκομετρικές μεταβολές το σκυρόδεμα. Το φαινόμενο κατά το οποίο ο αρχικός όγκος του σκυροδέματος μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου, ονομάζεται συρρίκνωση ή συστολή του σκυροδέματος και σχετίζεται κυρίως με την απώλεια υγρασίας του τσιμεντολιθώματος.

Σύμφωνα με το ACI 209.2 (Brooks-2005) μέγιστη τιμή για τη συνολική παραμόρφωση λόγω συρρίκνωσης στο σκυρόδεμα μετά από 30 έτη μπορεί να θεωρηθεί η 1,46 mm/m (1,46 ‰), ενώ σύμφωνα με το ACI-224R-01 η ικανότητα εφελκυστικής παραμόρφωσης του ίδιου του σκυροδέματος είναι μικρότερη του 0,15 mm/m (0,15 ‰). Επομένως, αν η παραμόρφωση λόγω συρρίκνωσης που θα αναπτυχθεί στο σκυρόδεμα παρεμποδίζεται (π.χ. σε πλάκα επί εδάφους ή σε αμφίπακτο/αμφιαρθρωτό μέλος οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις μπορεί να υπερβούν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, οδηγώντας σε ανεπιθύμητη ρηγμάτωση. Οι ρωγμές συρρίκνωσης επηρεάζουν την ανθεκτικότητα, τη λειτουργικότητα και την αισθητική του σκυροδέματος. Πέρα από τη ρηγμάτωση, η συρρίκνωση μπορεί να οδηγήσει το σκυρόδεμα σε κύρτωση (π.χ. σε πλάκες) και διαστατική αστάθεια δομικών μελών.



Ποια είδη συρρίκνωσης υπάρχουν;

Υπάρχουν πέντε διαφορετικά είδη συρρίκνωσης στο σκυρόδεμα, όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Η συρρίκνωση λόγω ενανθράκωσης οφείλεται στην αντίδραση του υδροξειδίου του ασβεστίου με το CO₂ της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ανθρακικού ασβέστιου. Στη σκληρυμένη φάση του σκυροδέματος η ενανθράκωση έχει πολύ μικρή επιρροή στην συνολική συρρίκνωση του, καθώς εξελίσσεται με χαμηλούς ρυθμούς, γι' αυτό και δε λαμβάνεται υπόψη στις κατασκευές. Άλλωστε κυρίως επηρεάζει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος μειώνοντας την αποθεματική αλκαλικότητα και συνεπακόλουθο σοβαρό κίνδυνο διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού. Σε συνθήκες εργαστηρίου είναι πολύ πιθανότερο, λόγω του μικρού μεγέθους των δοκιμίων, να έχει εμφανέστερο αποτέλεσμα στη συρρίκνωση. επίσης, στο νωπό σκυρόδεμα, και ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος όπου χρησιμοποιούνται θερμοαντήρες αέρα σε μη αεριζόμενους χώρους, το CO και το CO₂ που εκλύονται αντιδρούν επιφανειακά με το νωπό σκυρόδεμα παράγοντας μία επιφανειακά αδύναμη πούδρα (φαινόμενο κιμωλίας) συνήθως σε πάχη 2,5-7,5 mm.

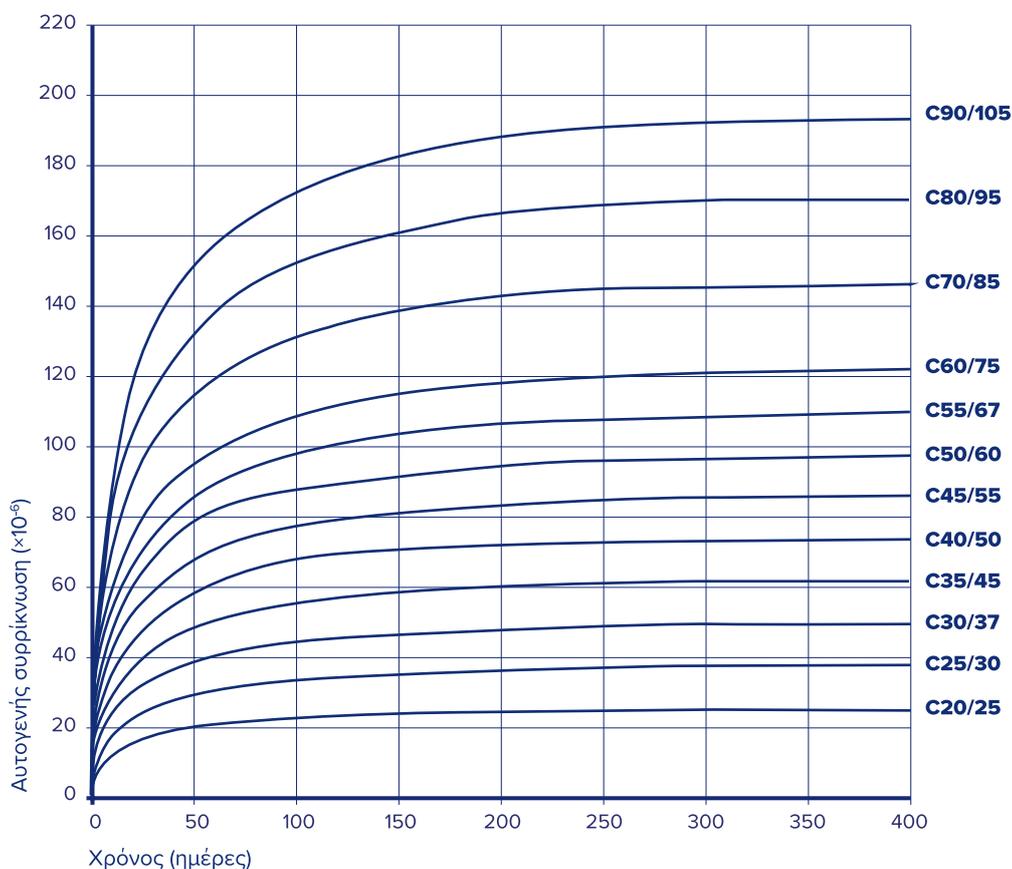
Η θερμική συρρίκνωση είναι η συστολή του σκυροδέματος από απότομη ψύξη λόγω έκθεσής του σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Ως φυσικό φαινόμενο προκαλείται κυρίως λόγω έντονων εποχικών θερμοκρασιακών μεταβολών και μπορεί να συμβεί στο νωπό αλλά και στο σκληρυμένο σκυρόδεμα.

Η αυτογενής συρρίκνωση είναι αποτέλεσμα της χημικής συρρίκνωσης και αυτό-ξήρασης του σκυροδέματος λόγω των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στη μικροδομή του σκυροδέματος. Γενικώς, η αυτογενής συρρίκνωση ταυτίζεται με την χημική συρρίκνωση. Η χημική συρρίκνωση ξεκινά άμεσα με την επαφή του νερού με το τσιμέντο και στη συνέχεια, το μεγαλύτερο μέρος της εξελίσσεται τις πρώτες 1-7 ημέρες. Κατόπιν, συνεχίζεται με μειωμένο ρυθμό έως περίπου τις 28 ημέρες. Τέλος, μετά τις 28 ημέρες η συρρίκνωση συνεχίζει με πολύ μικρούς ρυθμούς, ακόμα και για αρκετούς μήνες, ανάλογα τη σύνθεση του σκυροδέματος (π.χ. μίγμα με $v/t < 0,40$ ή χρήση πυριτικής παιπάλης). Καθώς προχωρά η ενυδάτωση του τσιμέντου ο παραγόμενος όγκος των ενύδρων είναι μικρότερος από τον αρχικό όγκο, με αποτέλεσμα τη συρρίκνωση της τσιμεντόπαστας. Ο Powers (1935) ήταν από τους πρώτους που ποσοτικοποίησαν τη χημική συρρίκνωση διαφόρων φάσεων του κλίνκερ στο τσιμέντο. Η συνολική χημική συρρίκνωση της τσιμεντόπαστας με τσιμέντο Portland μπορεί να φτάσει το 10 % κατ' όγκο ή το 7 % κατά βάρος. Η προσθήκη τσιμεντοειδών πρόσθετων στο σκυρόδεμα (π.χ. σκωρία, ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη) μπορεί να αυξήσει το μέγεθος της αυτογενούς συρρίκνωσης έως και 3 φορές. Τυπική τιμή για την αυτογενή συρρίκνωση στο σκυρόδεμα θεωρείται το εύρος 0,04-0,1 mm/m (0,04-0,1 ‰).

Η αυτογενής συρρίκνωση αυξάνεται:

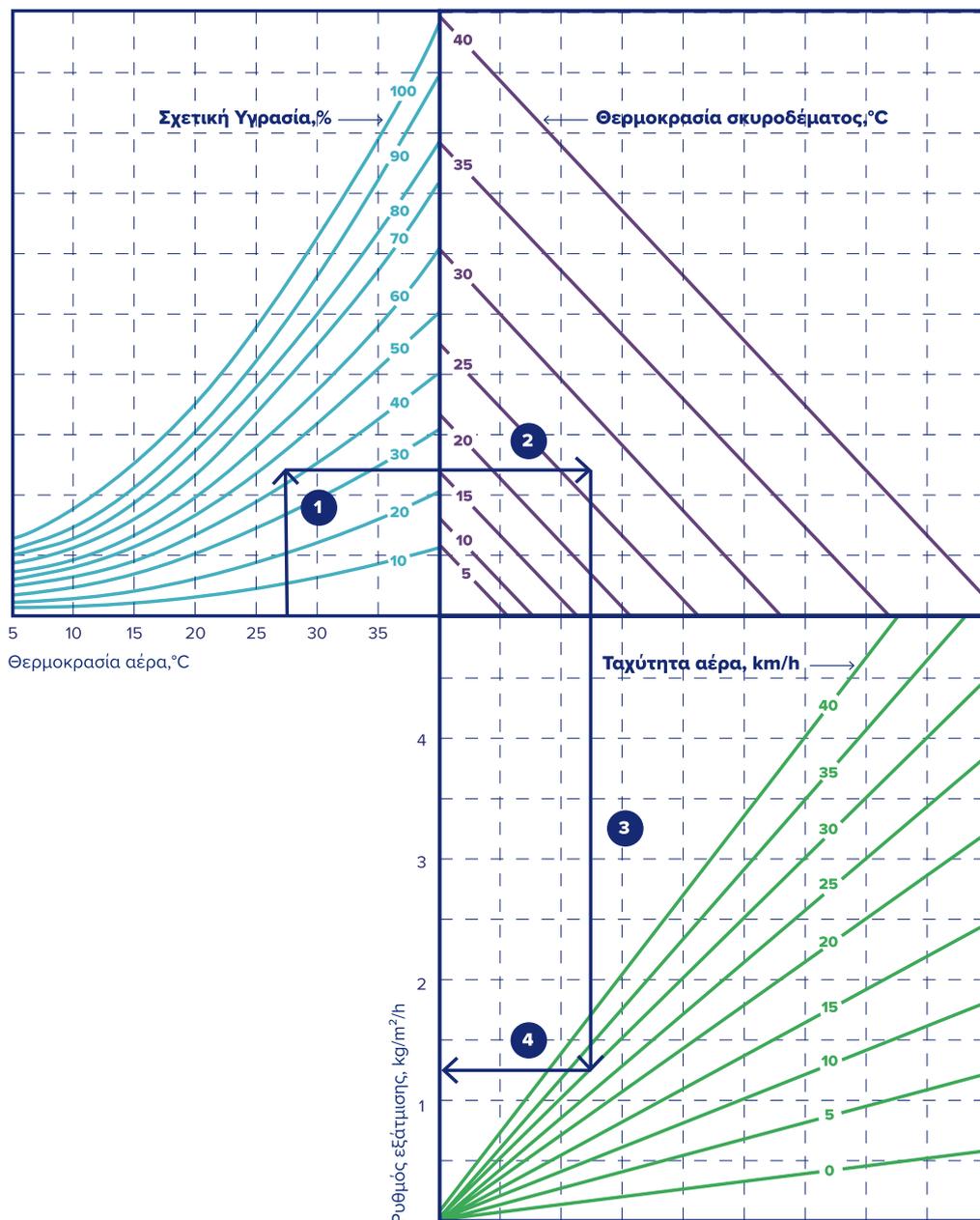
- με μείωση του λόγου v/t
- με αύξηση της θερμοκρασίας σκυροδέματος
- με αύξηση της ποσότητας τσιμέντου
- με αύξηση της λεπτότητας του τσιμέντου

Αυτογενής συρρίκνωση για διαφορετικές κατηγορίες αντοχής, εκτιμημένη με βάση τη μέθοδο που δίνεται στο EN 1992-2-1 [CIRIA και Concrete Society (2008)]*



*Αναδημοσίευση με άδεια.

Η πλαστική συρρίκνωση είναι η συστολή που υφίσταται το σκυρόδεμα όταν ακόμα βρίσκεται στη νωπή και πλαστική κατάσταση μετά τη χύτευση του. Η κρίσιμη συνθήκη για την εμφάνιση του φαινομένου προκύπτει όταν ο ρυθμός εξάτμισης του νερού υπερβαίνει τον ρυθμό εξίδρωσης, δηλαδή της ανάδυσης νερού από τη μάζα του σκυροδέματος. Τότε, το αναδυόμενο εξιδρούμενο νερό δεν επαρκεί για να αναπληρώσει το εξατμιζόμενο, με αποτέλεσμα να επέρχεται το φαινόμενο της πλαστικής συρρίκνωσης. Εάν μάλιστα οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια λόγω της πλαστικής συρρίκνωσης υπερβούν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, τότε αναπτύσσονται και ρηγματώσεις. Σύμφωνα με τον ΚΤΣ 2016, ως κρίσιμος ρυθμός εξάτμισης λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία) και βάσει της θερμοκρασίας σκυροδέματος θεωρείται η τιμή $1\text{kg/m}^2/\text{ώρα}$.



Για να χρησιμοποιήσετε το νομογράφημα

- 1 Ξεκινήστε από την θερμοκρασία περιβάλλοντος (π.χ. 27°C), κινούμενοι κατακόρυφα έως την σχετική υγρασία
- 2 Μετακινηθείτε δεξιά στην θερμοκρασία σκυροδέματος (2)
- 3 Κατεβείτε κάτω προς την ταχύτητα του ανέμου (3)
- 4 Βρείτε που τέμνει η οριζόντια γραμμή τον ρυθμό εξάτμισης (4)

Η συρρίκνωση ξήρανσης είναι το φαινόμενο μείωσης του αρχικού όγκου του σκληρυμένου σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου, όπου η εσωτερική του υγρασία διαχέεται προς το εξωτερικό περιβάλλον λόγω της σταδιακής ξήρανσης που υφίσταται. Συγκεκριμένα, η απώλεια της υγρασίας από το τριχοειδές πορώδες του σκυροδέματος λόγω διάχυσης προκαλεί εφελκυστικές τάσεις, καθώς η εσωτερική υγρασία προσπαθεί να εξισωθεί ομοιόμορφα με τη χαμηλότερη περιβαλλοντική υγρασία. Σύμφωνα με το ACI-224R-01 τυπική τιμή για τη συνολική παραμόρφωση λόγω συρρίκνωση ξήρανσης στο σκυρόδεμα μπορεί να θεωρηθεί $0,6 \text{ mm/m}$ ($0,6 \text{ ‰}$).

Η συρρίκνωση ξήρανσης αυξάνεται:

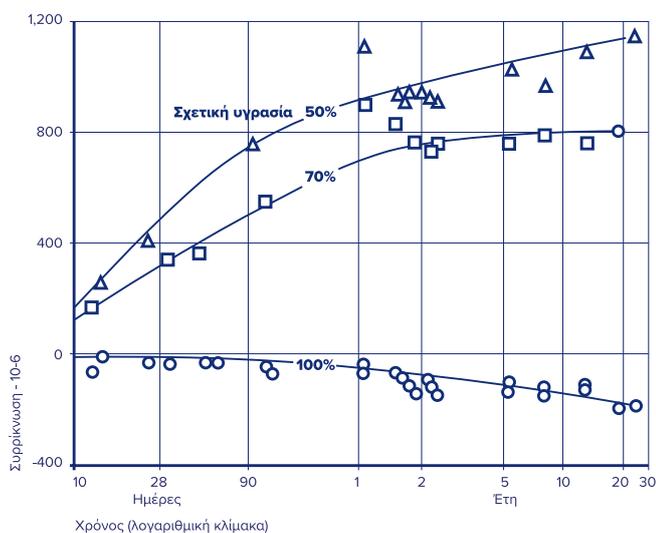
- με αύξηση του λόγου v/t
- με αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος
- με μείωση της σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος
- με αύξηση της ποσότητας νερού στο μίγμα
- με μείωση του μεγέθους αδρανών και αύξηση της τσιμεντόπαστας
- με κακής ποιότητας και υψηλής υδατοαπορροφητικότητας αδρανή
- με δομικά μέλη που έχουν μεγάλες επιφάνειες εκτεθειμένες στο περιβάλλον

Ονομαστικές τιμές ανεμπόδιστης συρρίκνωσης ξήρανσης (μικροπαραμόρφωση, με) για διαφορετικές σχετικές υγρασίες, από το EN 1992-1-1 [CEN (2004)]

Κατηγορία αντοχής σκυροδέματος	Σχετική υγρασία (%)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	620	580	490	300	170	0
20/25	480	460	380	240	130	0
20/25	380	360	300	190	100	0
20/25	300	280	240	150	80	0
20/25	270	250	210	130	70	0

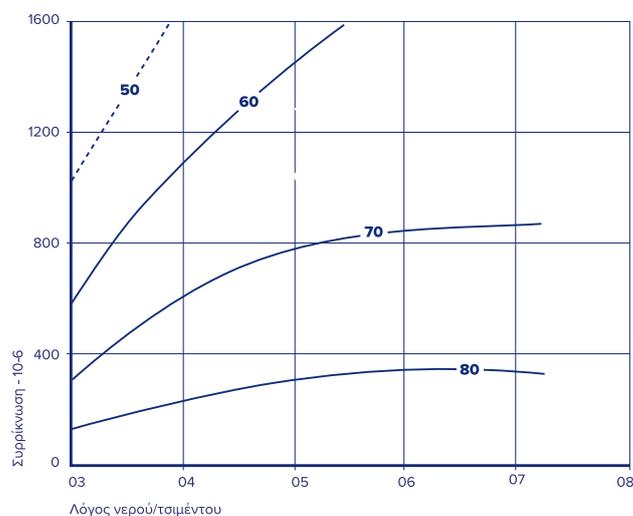
Σημείωση: 1 με είναι μία μικροπαραμόρφωση ή παραμόρφωση της τάξης του $1 \cdot 10^{-6}$, δηλαδή παραμόρφωση $0,001 \text{ mm/m}$.

Σχέσεις μεταξύ συρρίκνωσης και χρόνου για σκυροδέματα αποθηκευμένα σε διαφορετικές σχετικές υγρασίες*



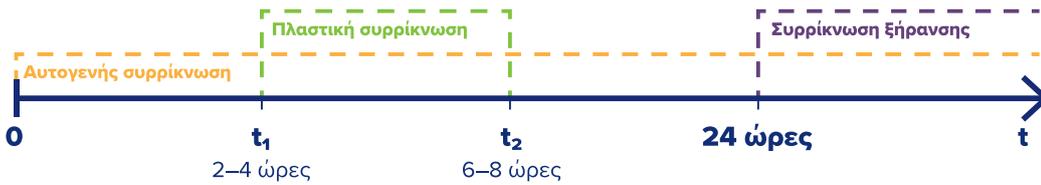
*Ο χρόνος υπολογίζεται από το τέλος της υγρής συντήρησης στις 28 ημέρες (Troxeil, Raphael και Davis 1958).

Επίδραση του λόγου νερού/τσιμέντου και της περιεκτικότητας σε αδρανή στη συρρίκνωση*



*Odman, 1968

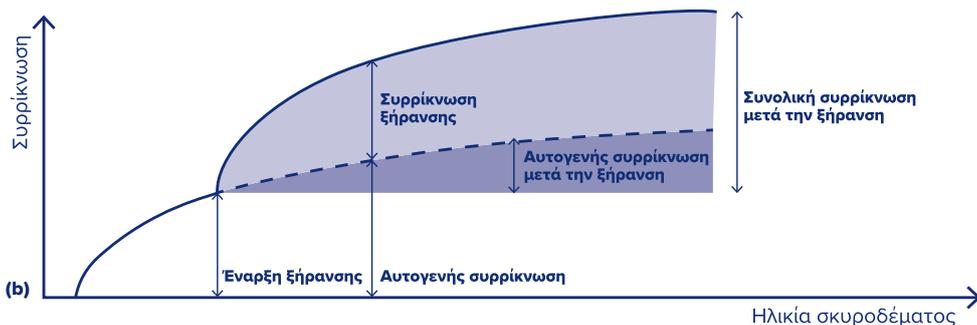
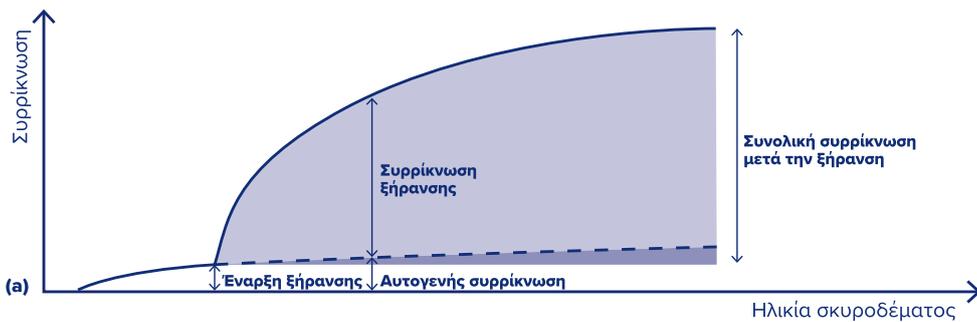
Πως εξελίσσεται η συρρίκνωση στον χρόνο;



Ποια πρότυπα ή κανονισμοί περιγράφουν τη συρρίκνωση του σκυροδέματος;

Οι μελετητές δομοστατικού σχεδιασμού χρησιμοποιούν κανονισμούς και πρότυπα σχεδιασμού, όπως ο Ευρωκώδικας 2-1 (μοντέλο CEB-FIP MC 90), το ACI 318 (μοντέλο ACI 209) και το FIB Model Code 2020, όπου υπολογίζουν τη συνολική συρρίκνωση του σκυροδέματος ως το άθροισμα της αυτογενούς συρρίκνωσης και της συρρίκνωσης ξήρανσης. Επίσης ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ 2016) αναφέρεται στο διάγραμμα ΠΔ6-1 για τον υπολογισμό του ρυθμού εξάτμισης της υγρασίας στο σκυρόδεμα και τον έλεγχο του φαινομένου της πλαστικής συρρίκνωσης. Έχουν επίσης αναπτυχθεί διεθνώς και άλλα υπολογιστικά μοντέλα της συρρίκνωσης του σκυροδέματος. Σε κανονικής αντοχής σκυρόδεμα η αυτογενής συρρίκνωση συνήθως είναι το 10-20% της συνολικής συρρίκνωσης (αυτογενούς και ξήρανσης) του σκυροδέματος (Silliman & Newton, 2006) γι' αυτό και συνήθως ως βασική συνιστώσα της συνολικής συρρίκνωσης λαμβάνεται η συρρίκνωση ξήρανσης. Αντίθετα, σε σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας (HPC) γίνεται εμφανής διάκριση μεταξύ της αυτογενούς συρρίκνωσης και της συρρίκνωσης ξήρανσης καθώς μεταβάλλονται τα ποσοστά επιρροής τους στη συνολική συρρίκνωση του μίγματος ανάλογα με την ηλικία, και ειδικά καθώς το σκυρόδεμα εκτίθεται σε συνθήκες ξήρανσης (Sakata & Shimomura - 2004).

Συνιστώσες μικροπαραμορφώσεων συρρίκνωσης σε σκυρόδεμα κανονικής αντοχής (a) και υψηλής αντοχής (b)



*Sakata & Shimomura 2004.

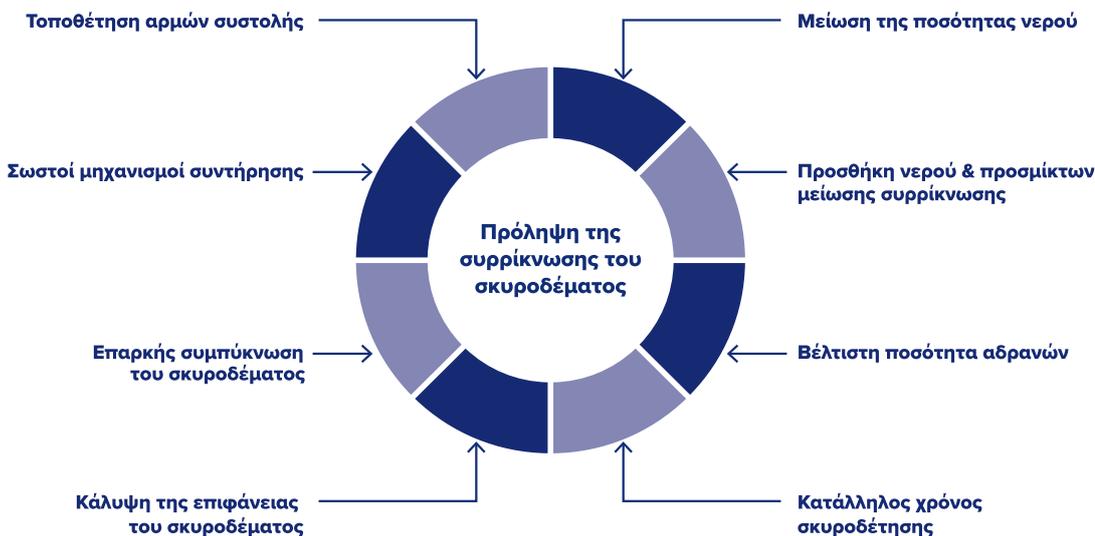
Πως αντιμετωπίζουμε τη συνολική συρρίκνωση στο σκυρόδεμα;

Γενικά για τη μείωση της συνολικής συρρίκνωσης που υφίσταται το μίγμα σκυροδέματος στον κύκλο ζωής του προτείνονται τα εξής μέτρα:

- μεγαλύτερης κοκκομετρίας αδρανή
- καθαρά, ποιοτικά και πιστοποιημένα αδρανή
- μικρότερη ποσότητα τσιμεντόπαστας και αύξηση της ποσότητας αδρανών
- μικρότερη τιμή ν/τ με μείωση του νερού ανάμιξης
- τσιμέντα με κατάλληλη λεπτότητα (τσιμέντα αντιστάθμισης συρρίκνωσης ή τσιμέντα υδραυλικά ελαφρώς διογκωτικά)
- αποφυγή χρήσης προσμίκτων που περιέχουν χλώριο (π.χ. CaCl_2)
- χρήση προσμίκτων μείωσης συρρίκνωσης (SRA – Shrinkage Reducing Admixtures)
- χρήση βέλτιστης ποσότητας & κατάλληλου είδους τσιμεντοειδών προσθέτων (π.χ. ποζολάνες).

Σε μία κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορούν να ληφθούν γενικότερα μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου της συρρίκνωσης και των ανεπιθύμητων συνεπειών που έχει:

- αποφυγή σκυροδέτησης με υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαμηλή σχετική υγρασία και υψηλή ταχύτητα ανέμου
- χρήση σκιάστρων και αντιανεμικών πετασμάτων
- δημιουργία εκνέφωσης νερού για λόγους συντήρησης
- άμεση έναρξη της ωρίμανσης του σκυροδέματος
- χρήση ινών, χαλύβδινων ή συνθετικών
- χρήση κατάλληλης διάταξης, θέσης και διαμέτρου χαλύβδινου οπλισμού για ανάληψη των εφελκυστικών τάσεων
- κοπή αρμών συστολής στη σωστή θέση και στον κατάλληλο χρόνο (π.χ. σε πλάκες)
- μείωση παρεμποδιζόμενης παραμόρφωσης μελών (π.χ. σε πλάκες με χρήση αρμών διαστολής ή χρήση μεμβράνης στην διεπιφάνεια πλάκας-εδάφους).



Κανονιστικό πλαίσιο και τεχνικά πρότυπα

Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ). (2016)
Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016. ΦΕΚ
1561/02.06.2016, Αθήνα: Υπουργείο Υποδομών.

American Concrete Institute (ACI). (2001)
ACI 224R-01: Control of Cracking in Concrete Structures.
Farmington Hills, MI: ACI.

American Concrete Institute (ACI). (2008)
*ACI 209.2R-08: Guide for Modeling and Calculating Shrinkage
and Creep in Hardened Concrete.* Farmington Hills, MI: ACI.

CEN (European Committee for Standardization). (2004)
*EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1:
General Rules and Rules for Buildings.* Brussels: CEN.

fib (Fédération internationale du béton). (2020)
fib Model Code for Concrete Structures 2020. Lausanne: fib.

fib (Fédération internationale du béton). (2010)
*fib Bulletin 52: Structural Concrete – Textbook on Behaviour,
Design and Performance, Volume 2.* Lausanne: fib.

fib (Fédération internationale du béton). (2010)
*fib Bulletin 53: Structural Concrete – Textbook on Behaviour,
Design and Performance, Volume 3.* Lausanne: fib.