



Διπλωματική Εργασία

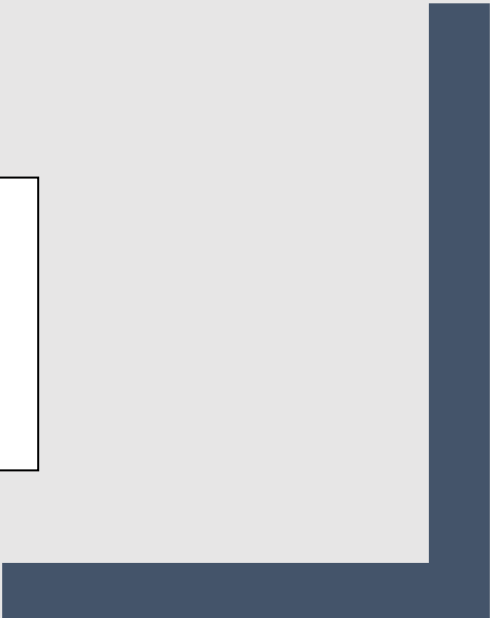
Παρουσίαση ιδιοτήτων και έργων
εφαρμογής του Αυτοσυμπυκνούμενου
Σκυροδέματος (ΑΣΣ)

Τριαντάφυλλος Δελής

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Επιβλέπων Καθηγητής
Καρακασίδης Θεόδωρος

Βόλος Σεπτέμβριος 2020



Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη βοήθεια, τη καθοδήγηση και τη συμπαράσταση μιας ομάδας ατόμων που στάθηκαν δίπλα μου καθόλη τη διάρκεια της συγγραφής της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. **Θεόδωρο Καρακασίδη** για την άριστη καθοδήγηση και συνεργασία. Η εργασία δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς τη συμβολή του. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής τους καθηγητές κ. **Χρήστο Παπακωνσταντίνου** και κ. **Λάμπρο Κούτα** για τη μετάδοση γνώσεων κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Η βασική έμπνευση για αυτή την εργασία οφείλεται στους κ. **Ιωάννη Διαμαντόπουλο** και **Λάμπρο Σιέρρα** της κατασκευαστικής εταιρείας ΑΡΧΙΚΟΝ ΑΕ στην οποία πραγματοποίησα την Πρακτική μου Άσκηση το προηγούμενο καλοκαίρι. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στις κ. **Καραμάνου Σοφία** και **Μαρία Νομικού** για την παροχή φωτογραφικού υλικού και πληροφοριών από την εταιρεία Lafarge Beton του ομίλου ΑΓΕΤ-Ηρακλής. Η χρήση τους γίνεται καθαρά για βιβλιογραφικούς σκοπούς.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για τη στήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Τους αφιερώνω αυτή την εργασία.

© Δελής Τριαντάφυλλος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2)

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη του Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (ΑΣΣ) και η σύγκριση του με το Συμβατικό Σκυρόδεμα (ΣΣ). Οι βάσεις σύγκρισης είναι τα υλικά, η αντοχή, η ανθεκτικότητα και το κόστος. Στα πρώτα τρία κεφάλαια δίνεται ο ορισμός του ΑΣΣ, ενός υπέρρευστου σκυροδέματος που μπορεί να πληρώσει κάθε ξυλότυπο χωρίς δόνηση. Ακολουθούν η ιστορική του αναδρομή τη τελευταία 30ετία από τη πρώτη παραγωγή του στην Ιαπωνία στα τέλη της δεκαετίας του 1980, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει έναντι του ΣΣ. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αρκετά παραδείγματα εφαρμογής του σε έργα στο εξωτερικό. Παρουσιάζονται λεπτομερώς τα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται το σκυρόδεμα, καθώς και η διαφορετική σύσταση που έχει το ΑΣΣ.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι ΑΣΣ, ορισμένα μοντέλα για τη σύνθεση του μίγματος του, τα κριτήρια που πρέπει να έχει ένα μίγμα νωπού σκυροδέματος για να μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΑΣΣ. Επίσης αναφέρονται οι δοκιμές που εξετάζουν τις ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ και οι διαδικασίες που ακολουθούνται για τη μεταφορά, σκυροδέτηση και συντήρηση πριν από τη σκλήρυνση του.

Στο 5^ο γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων του σκληρυμένου ΑΣΣ και του ΣΣ με βάση τις μηχανικές αντοχές και την ανθεκτικότητα τους σε βάθος χρόνου. Γίνεται βιβλιογραφική αναφορά σε διάφορα πειράματα που εξέτασαν ξεχωριστά αντοχές και ανθεκτικότητα με οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων τους. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις το ΑΣΣ έχει καλύτερη θλιπτική αντοχή και ανθεκτικότητα σε περιβαντολλογικές συνθήκες σε σχέση με το ΣΣ.

Στο 6^ο και 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στοιχεία παραγωγής του ΑΣΣ στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, ποιες εταιρείες το παράγουν, ποιο είναι το κόστος του και εφαρμογές του στην Ελλάδα. Σύμφωνα με έγκυρες πηγές το ΑΣΣ είναι 30% ακριβότερο από το ΣΣ, ενώ η χρήση του μέχρι στιγμής στην Ελλάδα γίνεται σε περιορισμένο βαθμό.

Στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται μερικές πρόσφατες εξελίξεις που αφορούν το ΑΣΣ με παρασκευή και μελέτη νέων ειδών που εκμεταλλεύονται τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις και αποτελούν αντικείμενο μελέτης στο σήμερα.

Τέλος αναγνωρίζονται κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας καθώς και ξεχωρίζονται μερικές μελλοντικές προτάσεις που θα προωθήσουν αυτό το νέο είδος σκυροδέματος στη χώρα μας.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Πίνακας περιεχομένων	4
1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Ορισμός Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (ΑΣΣ)	6
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	7
1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	9
2. Έργα εφαρμογής του ΑΣΣ στο εξωτερικό	11
3. Υλικά των σκυροδεμάτων	17
3.1 Τσιμέντο (cement)	18
3.2 Αδρανή υλικά (aggregates).....	19
3.2.1 Προέλευση-Σχήμα-Τραχύτητα.....	21
3.2.2 Κοκκομετρία.....	21
3.2.3 Αντοχή σε θραύση	23
3.3 Νερό (water)	23
3.4 Πρόσθετα (additives)	23
3.4.1 Ιπτάμενη τέφρα	24
3.4.2 Πυριτική παιπάλη	25
3.4.3 Ασβεστολιθική παιπάλη	26
3.4.4 Σκωρία.....	27
3.5 Χημικά Πρόσμικτα (admixtures).....	28
3.5.1 Υπερρευστοποιητές	28
3.5.2 Υδατικοί μειωτήρες.....	29
3.5.3 Ρυθμιστές ιξώδους.....	30
4. Παραγωγή και χαρακτηριστικά νωπού ΑΣΣ.....	31
4.1 Τύποι ΑΣΣ	31
4.2 Διαδικασία παραγωγής νωπού ΑΣΣ.....	32
4.3 Ιδιότητες νωπού ΑΣΣ.....	36
4.4 Δοκιμές ιδιοτήτων νωπού ΑΣΣ.....	36
4.4.1 Δοκιμές Ρευστότητας: Κώνος εξάπλωσης, T_{50} και Χοάνη V.....	37
4.4.2 Δοκιμές Διειλεσιμότητας: Δοχείο L, Δακτύλιος J.....	40

4.4.3 Δοκιμές Σταθερότητας: Απόμιξη στήλης, Σταθερότητας μέσω κοσκίνισης.....	42
4.5 Μεταφορά και Σκυροδέτηση νωπού ΑΣΣ.....	44
4.6 Συντήρηση ΑΣΣ.....	48
5. Χαρακτηριστικά σκληρυμένου ΑΣΣ.....	50
5.1 Αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό.....	51
5.2 Αντοχή σε κάμψη.....	55
5.3 Συνάφεια με το χαλύβδινο οπλισμό.....	56
5.4 Μέτρο ελαστικότητας.....	58
5.5 Συρρίκνωση και Ερπυσμός.....	59
5.6 Ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης-απόψυξης.....	63
5.7 Ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.....	64
5.8 Ανθεκτικότητα σε ενανθράκωση και χλωριόντα.....	66
5.9 Συμπεράσματα σκληρυμένου ΑΣΣ.....	70
6. Παραγωγή και κόστος του ΑΣΣ.....	71
6.1 Παραγωγή στον Ευρωπαϊκό και Ελληνικό Χώρο.....	72
6.2 Κόστος ΑΣΣ.....	74
7. Έργα εφαρμογής του ΑΣΣ στην Ελλάδα.....	78
7.1 Κτήριο γραφείων καταστημάτων στην Αθήνα.....	78
7.2 Ενίσχυση θεμελίωσης και σκυροδέτηση δώματος.....	79
7.3 Σκυροδέτηση δαπέδου με Agilia Horizontal.....	80
7.4 Ενίσχυση υποστυλωμάτων και γέμισμα κόμβου με Agilia Vertical.....	81
7.5 Πεζογέφυρα Λεωφόρου Κηφισίας.....	82
7.6 Πρόσφατες εφαρμογές.....	84
8. Πρόσφατες εξελίξεις, συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	86
8.1 Πρόσφατες εξελίξεις.....	87
8.2 Συμπεράσματα.....	88
8.3 Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες.....	89
9. Βιβλιογραφία.....	90

1. Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα είναι ένα οικοδομικό υλικό το οποίο παράγεται και χρησιμοποιείται ευρέως ανά τον κόσμο. Ωστόσο υπάρχουν δυσκολίες στη μεταφορά του, στο σχεδιασμό ξυλοτύπων και στη διαδικασία της χύτευσης. Επιπλέον πρόσθετα προβλήματα δημιουργούνται λόγω των απαιτήσεων των νεότερων κατασκευαστικών κανονισμών που αφορούν τα σύγχρονα οικοδομικά έργα, όπως είναι τα υψηλά κτήρια, οι γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων, οι πλωτές κατασκευές κ.ά. Σε έργα τέτοιας κλίμακας είναι αναγκαίο το σκυρόδεμα να χαρακτηρίζεται από καλή εργασιμότητα, να παρουσιάζει δηλαδή καλή ρευστότητα και συνεκτικότητα. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της χημικής βιομηχανίας στο συγκεκριμένο τομέα βοήθησε στην παραγωγή νέων μορφών σκυροδέματος με επιλεκτικά τροποποιημένες ιδιότητες.

Μερικές από τις νέες μορφές σκυροδεμάτων είναι:

1. Το γαρμπιλόδεμα,
2. Το ελαφροσκυρόδεμα,
3. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα,
4. Το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής,
5. **Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ)** το οποίο αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας στην οποία θα παρουσιαστεί διεξοδικά, θα αναλυθούν οι ιδιότητές του και θα αναφερθούν οι χρήσεις του.

1.1 Ορισμός Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (ΑΣΣ)

Οι κατασκευές με πυκνό χαλύβδινο οπλισμό χαρακτηρίζονται από μεγάλη πλαστιμότητα, δηλαδή μπορούν να υπόκεινται σε μεγάλες παραμορφώσεις δίχως να χάνουν σημαντικό μέρος της αντοχής τους. Είναι μια σημαντική ιδιότητα του σκυροδέματος που προσδίδει ασφάλεια σε περιπτώσεις έντονης καταπόνησης της κατασκευής, όπως ένας σεισμός. Ωστόσο ο πυκνός χαλύβδινος οπλισμός για να προσδώσει πλαστιμότητα στην κατασκευή απαιτεί καλή συνάφεια με το σκυρόδεμα. Για να μπορέσει το σκυρόδεμα να πληρώσει επαρκώς τον οπλισμό πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή ρευστότητα.

Το **αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (εφεξής ΑΣΣ)** γνωστό και ως Self-Compacting ή Self-Consolidating Concrete (SCC) στη διεθνή βιβλιογραφία, είναι μια ειδική κατηγορία

σκυροδέματος που μπορεί να πληρώσει (γεμίσει) τα κενά του ξυλοτύπου ανεξαρτήτως σχήματος ή πυκνότητας οπλισμού και να ελευθερώσει τον εγκλωβισμένο αέρα από τον ξυλότυπο χωρίς τη χρήση δονητών κατά την παραγωγή και χύτευση του σε νωπή (υγρή) κατάσταση [Σίδερης (2009)]. Αυτή η ικανότητα του ονομάζεται συμπύκνωση και επιτυγχάνεται λόγω της υψηλής ρεολογικής συμπεριφοράς του αλλά και λόγω του ίδιου του βάρους. Σημειώνεται ότι η διαδικασία σκυροδέτησης απλοποιείται και επιταχύνεται χωρίς τη χρήση δονητών.

Πέραν της χαρακτηριστικής ρευστότητας του, το ΑΣΣ χαρακτηρίζεται επίσης από σταθερότητα και ομοιογένεια επειδή παρουσιάζει αυξημένη αντίσταση στον διαχωρισμό-απόμιξη (segregation) του μίγματός του στα επιμέρους του συστατικά. Κατά συνέπεια αποφεύγονται προβλήματα που δημιουργούνται λόγω υπερβολικής χρήσης δονητών από το εργατικό προσωπικό κατά τη διαδικασία της χύτευσης του σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι για να είναι ομοιογενές το σκυρόδεμα θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση των δονητών πέραν ενός χρονικού ορίου διότι δημιουργούνται συνθήκες διαχωρισμού μεταξύ των λεπτόκοκκων και των χονδρόκοκκων αδρανών της τσιμεντόπαστας με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται και να επιδεινώνονται τα μηχανικά του χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή αντοχή και η ανθεκτικότητα.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση του Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος αναβαθμίζει την ποιότητα ενός οικοδομικού έργου και ανοίγει νέους ορίζοντες για την ανάπτυξη της τεχνολογίας του. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παράγεται με τα ίδια υλικά με το συμβατικό σκυρόδεμα (εφεξής ΣΣ) με διαφορετικές όμως αναλογίες και με μεγαλύτερες δόσεις προσμίκτων ουσιών, συνήθως υπερρευστοποιητές και μειωτές ιξώδους.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη αναφορά για το Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα έγινε από τον Ιάπωνα καθηγητή Okamura στο πανεπιστήμιο του Τόκιο το 1986 όπου παρουσιάστηκε η ανάπτυξη μιας νέας σύνθεσης σκυροδέματος με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά [Okamura and Ouchi (2003)].

Αν και παρουσιάστηκε ως ένα είδος σκυροδέματος με υψηλή εργασιμότητα και ρεολογία εντούτοις δεν του είχε αποδοθεί η σημερινή του ονομασία. Αυτή προέκυψε μέσα από μεταγενέστερες εργασίες [Gagne et al. (1989), Okamura et al. (1993), Maekawa et al. (1993)].

Το βασικό πλεονέκτημα του νέου σκυροδέματος ήταν η απουσία της μηχανικής δόνησης προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπύκνωση. Μετά από έρευνα με τους συνεργάτες του,

ο καθηγητής Okamura πραγματοποίησε την πρωτότυπη παραγωγή του ΑΣΣ με υλικά από την Ιαπωνική αγορά το 1988 [Ozawa et al. (1989)]. Η πρώτη γενιά ΑΣΣ σκυροδεμάτων χρησιμοποιήθηκε περιορισμένα και κυρίως σε επισκευαστικές εργασίες. Η πρώτη γενιά ΑΣΣ αντιμετώπιστηκε από τον κατασκευαστικό κλάδο με καχυποψία λόγω της απουσίας δοκιμών ελέγχου του νέου υλικού, αλλά και του υψηλού του κόστους που οφειλόταν στην προσθήκη των υπερρευστοποιητών. Εντούτοις οι παρουσιάσεις εργασιών αναφορικά με το ΑΣΣ σε διεθνή συνέδρια που έγιναν τα επόμενα χρόνια βοήθησαν την αύξηση του ενδιαφέροντος για το νέο υλικό και συνέβαλαν στη σταδιακή άρση των αρχικών επιφυλάξεων.

Λίγα χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα το 1994 η Ιαπωνική κοινότητα Πολιτικών Μηχανικών (Japan Society of Civil Engineers, JSCE) ανέθεσε σε ειδική επιτροπή την έκδοση Κανόνων Τέχνης και Τεχνικής (1996) και Κανόνων Πρακτικής Εφαρμογής (1998) στους οποίους περιλαμβάνονται με ακρίβεια οι ορισμοί των ιδιοτήτων και των κατηγοριών του ΑΣΣ [Sfikas (2017)]. Η διάδοση της τεχνογνωσίας και χρήσης του ΑΣΣ άρχισε να επεκτείνεται κυρίως στην Ευρώπη και στην Αμερική.

Στην Ευρώπη το ΑΣΣ άρχισε να χρησιμοποιείται στα τέλη της δεκαετίας του '90 και συγκεκριμένα στις χώρες της Σκανδιναβικής χερσονήσου κυρίως σε κατασκευές με προκατασκευασμένα στοιχεία. Εφαρμόστηκε όμως και σε επισκευές μεγάλων υποδομών, όπως γέφυρες, τοίχοι αντιστήριξης και σήραγγες. Ταυτόχρονα, οι εξελίξεις στον τομέα της νανοτεχνολογίας και της χημείας στην παραγωγή ρευστοποιητών τρίτης γενιάς και ειδικών ρυθμιστών ιξώδους οδήγησαν στην εκτεταμένη έρευνα και χρήση του νέου υλικού.

Την ίδια χρονική περίοδο συστάθηκε ειδική επιστημονική επιτροπή από την RILEM για τη δημιουργία και το συντονισμό συνεχόμενου δικτύου πληροφόρησης σχετικά με τις εξελίξεις πάνω στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Η RILEM ως οργάνωση στοχεύει στην παγκόσμια συνεργασία επιστημονικών ινστιτούτων στον τομέα των υλικών και των κατασκευών. Όσον αφορά στο ΑΣΣ έχουν οργανωθεί έως και σήμερα εννέα συνέδρια με συμμετοχή επιστημόνων/ερευνητών από τριάντα χώρες και συγκεκριμένα στις : Στοκχόλμη (1999), Τόκιο (2001), Ρέικιαβικ (2003), Σικάγο (2005), Γάνδη (2007), Μόντρεαλ (2010), Παρίσι (2013), Ουάσιγκτον (2015) και Δρέσδη (2019).

1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Παρόλο που θεωρείται σίγουρο ότι το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα δεν πρόκειται να αντικαταστήσει ολικώς το συμβατικό σκυρόδεμα, το ΑΣΣ είναι ήδη ένα εξαιρετικό κατασκευαστικό υλικό που κερδίζει θέση συνεχώς στον κατασκευαστικό κλάδο.

Τα πλεονεκτήματά του και γενικότερα οι λόγοι για τους οποίους προτιμάται έναντι του ΣΣ είναι οι ακόλουθοι:

- ❖ Ικανοποιητική συμπύκνωση και πλήρωση των κενών σε κτήρια όπου απαιτείται πυκνός οπλισμός.
- ❖ Καλύτερη προστασία του οπλισμού.
- ❖ Βελτιωμένη ανθεκτικότητα που οφείλεται στο μικρό πορώδες.
- ❖ Αυξημένη θλιπτική αντοχή συγκρινόμενο με ίδιες κατηγορίες ΣΣ σκυροδέματος.
- ❖ Δυνατότητα υλοποίησης πολύπλοκων αρχιτεκτονικών σχεδίων.
- ❖ Απουσία δόνησης με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου σκυροδέτησης και του κινδύνου εργατικών ατυχημάτων.
- ❖ Ταχεία σκυροδέτηση.
- ❖ Μείωση απαιτούμενου προσωπικού στη διαδικασία σκυροδέτησης.
- ❖ Μείωση όχλησης κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης.
- ❖ Ελαχιστοποίηση επιδιορθώσεων από πιθανές κακοτεχνίες.
- ❖ Βελτίωση της ποιότητας του έργου.
- ❖ Λείανση των εξωτερικών επιφανειών που βελτιώνει την αισθητική του έργου.
- ❖ Δυνατότητα χρήσης σε υποθαλάσσια σκυροδέτηση.
- ❖ Αύξηση της διάρκειας ζωής των κατασκευών.
- ❖ Μείωση των εργασιών συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής.
- ❖ Μείωση εργασιών φινιρίσματος.

Τα μειονεκτήματα του ΑΣΣ που δημιουργούν ερωτηματικά και ενδεχόμενες αμφισβητήσεις είναι:

- ❖ Υψηλότερο κόστος παραγωγής που οφείλεται στη χρήση των προσμίκτων, όπως οι υπερρευστοποιητές και οι ρυθμιστές ιξώδους.
- ❖ Απαίτηση για πυκνότερους ξυλότυπους λόγω της αυξημένης ρευστότητας του.

- ❖ Μεγαλύτερες απαιτήσεις για ελέγχους κατά την παραγωγή του μίγματος.
- ❖ Άγνοια και έλλειψη εξειδίκευσης προσωπικού.
- ❖ Κίνδυνος εμφάνισης ρωγμών στο εσωτερικό του λόγω μεγαλύτερης ποσότητας λεπτών αδρανών σε σχέση με το ΣΣ.
- ❖ Προσεκτικός σχεδιασμός του μίγματος αφού δεν υπάρχουν σαφείς οδηγίες για τη σύνθεση του.
- ❖ Μικρότερες ανοχές σε μεταβολές των συστατικών του μίγματος σε σχέση με το ΣΣ.

Από τα παραπάνω μειονεκτήματα το πιο σοβαρό είναι το αυξημένο κόστος παραγωγής. Μιας και το ΑΣΣ είναι ένα νέο είδος σκυροδέματος και έχει πρωτοεμφανιστεί στη χώρα μας τη τελευταία εικοσαετία πρέπει να γίνεται κατάλληλη μελέτη πριν αποφασιστεί η χρήση του. Ο εργολάβος πρέπει να λαμβάνει υπόψη το είδος και την ποιότητα αυτού του ειδικού σκυροδέματος σε συνδυασμό με τον ωφέλιμο χρόνο ζωής που μπορεί να προσδώσει σε μια κατασκευή. Ο ωφέλιμος χρόνος ζωής μιας κατασκευής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανθεκτικότητα των υλικών σε βάθος χρόνου. Δυστηχώς όπως θα φανεί και στα επόμενα κεφάλαια τέτοιες μελέτες απαιτούν μεγάλη ανάλυση και δύσκολα πραγματοποιούνται σε ικανοποιητικό βαθμό, επομένως δεν μπορεί να συγκριθεί το κόστος σε κάθε φάση της κατασκευής όπου χρησιμοποιείται ΑΣΣ με το αντίστοιχο κόστος που θα υπήρχε αν γινόταν χρήση ΣΣ.

2. Έργα εφαρμογής του ΑΣΣ στο εξωτερικό

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα ως σκυρόδεμα ειδικής κατηγορίας χρησιμοποιείται σε έργα με πυκνούς οπλισμούς και τεράστιες απαιτήσεις αντισεισμικότητας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν έργα με μερική ή και ολική χρήση ΑΣΣ.

Η πρώτη γνωστή εφαρμογή του ΑΣΣ σε έργο μεγάλης κλίμακας ήταν στις βάσεις των αγκυρώσεων της γέφυρας Akashi-Kaikyo (εικόνα 2.1) που κατασκευάστηκε στο Kobe της Ιαπωνίας στο χρονικό διάστημα 1988-1998. Πρόκειται για την μεγαλύτερη, μέχρι και σήμερα, κρεμαστή γέφυρα στον κόσμο με άνοιγμα μήκους 1991 μέτρων.

Στη συγκεκριμένη γέφυρα αποφασίστηκε η χρήση ΑΣΣ βάσει αυστηρότατων προδιαγραφών και αντισεισμικών απαιτήσεων λόγω της σεισμικότητας της περιοχής. Η ποσότητα του ΑΣΣ που χρησιμοποιήθηκε για τις βάσεις των αγκυρώσεων (εικόνα 2.2) ήταν 290.000 κυβικά μέτρα και η χρήση του μείωσε το χρονικό διάστημα κατασκευής κατά 20%, δηλαδή από 2,5 σε 2 χρόνια [Ouchi (2003)].



Εικόνα 2.1: Γέφυρα Akashi-Kaikyo [πηγή: Google Εικόνες]



Εικόνα 2.2: Βάση αγκύρωσης γέφυρας Akashi-Kaikyo [πηγή: Ouchi (2003)]

Παρόμοιο παράδειγμα είναι και η γέφυρα Ohmi-Odori (εικόνα 2.3) στην επαρχία Shiga της Ιαπωνίας [Ouchi et al. (2003)]. Η έναρξη των εργασιών ξεκίνησε το 2002 και η γέφυρα ολοκληρώθηκε το 2007. Στις βάσεις της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε ΑΣΣ θλιπτικής αντοχής 50MPa λόγω της μεγάλης πυκνότητας του οπλισμού των πέλδων και της σεισμικότητας της περιοχής.



Εικόνα 2.3: Τμήμα της γέφυρας Ohmi-Odori [πηγή: Google Εικόνες]

Στην Αμερική σε μικρότερης κλίμακας έργο, κατασκευάστηκε μια πεζογέφυρα από ΑΣΣ πάνω από τον αυτοκινητόδρομο I-4 στο Orlando της πολιτείας Florida (εικόνα 2.4). Για την κατασκευή της ανωτέρω πεζογέφυρας ήταν αναγκαίο το σκυρόδεμα να έχει ταυτόχρονα υψηλή αντοχή και εργασιμότητα. Λόγω της συνεχούς κίνησης των οχημάτων η διαδικασία δόνησης θα ήταν χρονοβόρα, δύσκολη και θα επηρέαζε αρνητικά την αισθητική της κατασκευής. Για τους παραπάνω λόγους αποφασίστηκε η χρήση του ΑΣΣ.

Η σκυροδέτηση έγινε από ύψος 4,6 μέτρων, με καλή ροή και μηδενική απαίτηση σε δόνηση. Παρατηρήθηκε καλή εργασιμότητα του μείγματος ακόμα και σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών (32 °C) και αναπτύχθηκε θλιπτική αντοχής 51,5 MPa σε 28 ημέρες.



Εικόνα 2.4: Πεζογέφυρα στο Orlando, Florida [πηγή: https://assets.master-builders-solutions.com/en-us/project_profile-scc-overpass.pdf]

Πέρα από γέφυρες ή πεζογέφυρες, το ΑΣΣ χρησιμοποιείται στη κατασκευή ουρανοξυστών, όπως ο Trump International Hotel and Tower (εικόνα 2.5) που βρίσκεται στο Chicago της Αμερικής. Στο συγκεκριμένο έργο έγινε χρήση 3.800 m³ ΑΣΣ στη θεμελίωση και αναπτύχθηκε αντοχή 63 MPa στις πρώτες 7 ημέρες και 69 MPa στις 28 μέρες, πολύ παραπάνω από τους στόχους των μελετητών. Χρησιμοποιήθηκαν 30 φορτηγά που μετέφεραν σε 600 διαδρομές έτοιμο ΑΣΣ από το εργοστάσιο παραγωγής του. Το μέγιστο ύψος από το οποίο πραγματοποιήθηκε η σκυροδέτηση

ήταν 12 μέτρα και δεν παρατηρήθηκε απόμιξη του μίγματος. Ο συγκεκριμένος πύργος έχει 92 ορόφους, ολοκληρώθηκε το 2009 και είναι το δεύτερο υψηλότερο κτήριο στην Αμερική.



Εικόνα 2.5: Trump International Hotel and Tower [πηγή: Google Εικόνες]

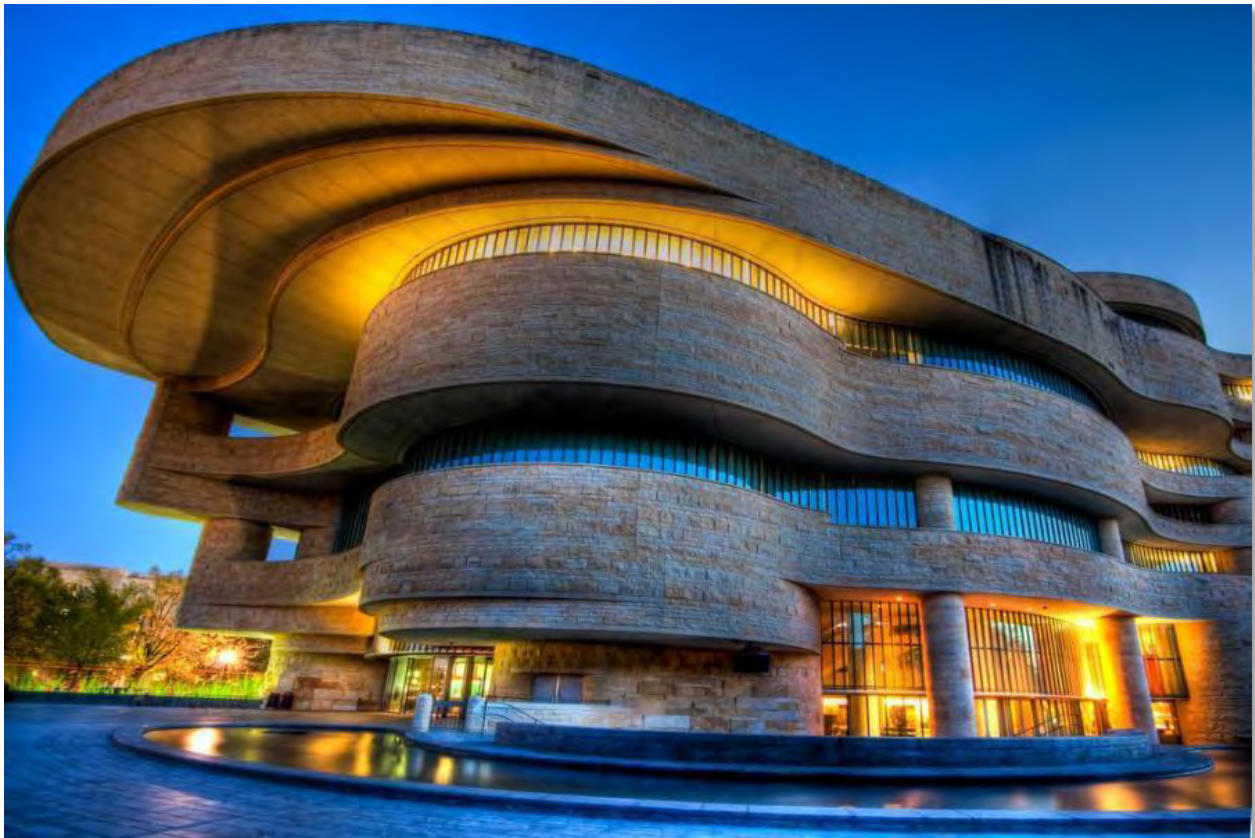
Άλλο ένα παράδειγμα χρήσης του ΑΣΣ είναι το Comcast Tower στην Philadelphia των ΗΠΑ (εικόνα 2.6). Η κατασκευή ξεκίνησε το 2005 και η σκυροδέτηση ολοκληρώθηκε το 2006 με χρήση τριών διαφορετικών μειγμάτων ΑΣΣ συνολικής ποσότητας 30.000 m^3 και ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής ίση με 87 MPa στις 28 ημέρες. Το κτήριο έχει ύψος 297 μέτρα και είναι το δεύτερο μεγαλύτερο στην Philadelphia. Αποφασίστηκε η σκυροδέτηση με ΑΣΣ λόγω της πυκνότητας

οπλισμού, της ευκολότερης και ταχύτερης χύτευσης σκυροδέματος και χαμηλότερου εργασιακού κόστους.



Εικόνα 2.6: Comcast Center [πηγή: Google Εικόνες]

Το ΑΣΣ προσφέρει μεγάλη ελευθερία στο σχεδιασμό ενός έργου εξαιτίας της υψηλής του ποιότητας και αντοχής. Έτσι μπορούν να υλοποιηθούν σύνθετα αρχιτεκτονικά σχέδια, όπως είναι το National Museum for the American Indian στη Washington των ΗΠΑ. Το κτήριο κατασκευάστηκε το 2004 και εξωτερικά μοιάζει με βράχο διαβρωμένο από αέρα και νερό με το πέρασμα των αιώνων (εικόνα 2.7). Η χρήση των δονητών θα ήταν προβληματική για τα ειδικά κατασκευασμένα καλούπια για αυτό και αποφασίστηκε η χρήση ΑΣΣ συνολικής ποσότητας 2300 m³ σε ένα κτήριο με απουσία ορθών εξωτερικών γωνιών.



Εικόνα 2.7: National Museum for the American Indian [πηγή: Google Εικόνες]

Τέλος αναφέρονται μερικά επιπλέον παραδείγματα έργων στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί το ΑΣΣ, όπως ο Odeon Tower στο Μονακό, ο Shanghai Tower στη Κίνα και ο ουρανοξύστης The Shard στο Λονδίνο της Αγγλίας.

3. Υλικά των σκυροδεμάτων

Όπως αναφέρθηκε στα δύο προηγούμενα κεφάλαια, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα κατασκευάζεται παρόμοια με το συμβατικό σκυρόδεμα, δηλαδή χρησιμοποιεί τα ίδια υλικά. Μια από τις σημαντικότερες διαφορές τους είναι ότι στο ΑΣΣ προστίθεται μεγαλύτερη ποσότητα χημικών πρόσμικτων που αποσκοπούν να προσδώσουν αυξημένη ρευστότητα και αντίσταση στην απόμιξη. Λόγω της ρευστότητάς του το ΑΣΣ καλύπτει επαρκώς τους χαλύβδινους οπλισμούς και τους προστατεύει. Η απόμιξη εμφανίζεται πολλές φορές σε ρευστά μίγματα και είναι ο διαχωρισμός των υλικών από τα οποία αποτελείται η πάστα του νωπού σκυροδέματος, είτε κατά την μεταφορά είτε κατά την σκυροδέτηση. Ωστόσο όπως θα δούμε παρακάτω το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται καταλλήλως στο ΑΣΣ με την προσθήκη των υπερρρευστοποιητών.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των σκυροδεμάτων (ΣΣ και ΑΣΣ).

Γενικά το σκυρόδεμα είναι το γνωστότερο δομικό υλικό στον κατασκευαστικό κλάδο. Προτιμάται λόγω της ευκολίας παραγωγής του, του σχετικά χαμηλού του κόστους και των υψηλών του αντοχών [Τριανταφύλλου (2013)]. Η δομή του σκυροδέματος είναι αρκετά σύνθετη και μέχρι και σήμερα πραγματοποιούνται μελέτες για τη σχέση μεταξύ των υλικών του. Τα υλικά από τα οποία αποτελείται το σκυρόδεμα συνδράμουν όλα μαζί στη διαμόρφωση των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών του, τόσο στη νωπή όσο και στη σκληρυμένη κατάσταση. Αναλόγως του τύπου, της ποιότητας και της ποσότητας που χρησιμοποιείται από το κάθε υλικό μπορούν να παρασκευαστούν μίγματα σκυροδέματος που ενώ μοιάζουν μεταξύ τους στην ουσία είναι τελείως διαφορετικά. Τα υλικά αυτά είναι:

1. Τσιμέντο (cement)
2. Αδρανή υλικά (aggregates)
3. Νερό (water)
4. Πρόσθετα (additives)
5. Χημικά Πρόσμικτα (admixtures)

3.1 Τσιμέντο (cement)

Πρόκειται για ένα λεπτό ανόργανο υλικό σε μορφή σκόνης μεγέθους κόκκου περίπου 20μm. Λειτουργεί ως συνδετικό υλικό των αδρανών και μπορεί να σκληρύνει με την προσθήκη νερού. Αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του πυριτίου και ασβεστόλιθο τα οποία ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία συνθέτουν τσιμεντοκονία. Ως βασικότατο για το σκυρόδεμα υλικό, το τσιμέντο προσδίδει στο τελικό μίγμα ρεολογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Εξαιτίας αυτών των χαρακτηριστικών η ποσοστιαία περιεκτικότητα σε τσιμέντο στο ΑΣΣ είναι μεγαλύτερη, κάτι που είναι βασικό για να επιτευχθεί η επιθυμητή ρευστότητα του σκυροδέματος.

Ο πιο διαδεδομένος τύπος τσιμέντου είναι τύπου Portland (πίνακας 3.1) και οφείλει την ονομασία του στην ομοιότητά του με τον ασβεστόλιθο της περιοχής Dorset στην νότια Αγγλία. Χρησιμοποιείται ευρέως στην Ελλάδα αλλά και σε άλλες χώρες. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οργάνωση EFNARC κάθε τύπος τσιμέντου Portland είναι κατάλληλος για παρασκευή ΑΣΣ. Τονίζεται όμως ότι απαιτείται προσοχή στην επιλογή του κατάλληλου τύπου που θα είναι συμβατός με τα άλλα υλικά και ειδικά με τον υπερρρευστοποιητή που θα χρησιμοποιηθεί. Οι βασικοί τύποι του τσιμέντου Portland, σύμφωνα με το EN 197-1 είναι οι παρακάτω:

1. Τύπου I τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση Κλίνκερ και γύψου.
2. Τύπου II τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση Κλίνκερ-Portland, γύψου και ποζολάνης σε ποσοστό 6-35%.
3. Τύπου III τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση Κλίνκερ, γύψου και σκωρίας σε ποσοστό 36-95%.
4. Τύπου IV τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση Κλίνκερ-Portland, γύψου, ποζολάνης, ιπτάμενη τέφρα πυριτική ή ασβεστούχα και πυριτική παιπάλη και δεν μπορούν να περιέχουν σκωρία.
5. Τύπου V τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση Κλίνκερ, γύψου, σκωρίας και σε ίσο ποσοστό ποζολάνη ή πυριτική τέφρα σε ποσοστό 36-50% και δεν μπορούν να περιέχουν πυριτική παιπάλη.

Το Κλίνκερ είναι η βασική, πρώτη ύλη για την παρασκευή κάθε τύπου τσιμέντου, καθώς είναι αυτό που του προσδίδει τις υδραυλικές ιδιότητες. Με την έψηση ενός μίγματος περίπου 80% ασβεστόλιθου και 20% αργίλου σε υψηλή θερμοκρασία, μέσω χημικών αντιδράσεων,

δημιουργείται το κλίνκερ, που είναι σφαιροειδείς κόκκοι διαμέτρου 10-25mm με υψηλή σκληρότητα. Η ποσότητα του κλίνκερ στο τσιμέντο μπορεί να μειωθεί προσθέτοντας εναλλακτικά υλικά, τα οποία αποκαλούνται πρόσθετα τσιμέντου.

Φάσεις	Χημικός τύπος	Χημεία τσιμέντου	Περιεκτικότητα(%)
Πυριτικό τριασβέστιο (Alit)	3CaO SiO_2	C_3S	50-70
Πυριτικό διασβέστιο (Belit)	2CaO SiO_2	C_2S	10-20
Αργιλικό τριασβέστιο (Celit) ή (Brownmillerit)	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A	-10
Τετρασβέστιο του αργίλου-σιδήρου (Felit)	$4\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_4(\text{A}, \text{F})$	-10
Οξειδίο του ασβεστίου ή Ελεύθερη άσβεστος	CaO	C	1-2
Οξειδίο του μαγνησίου	MgO	M	1-5
Αλκάλια	$\text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{Li}_2\text{O}$	-	0,6-1,5

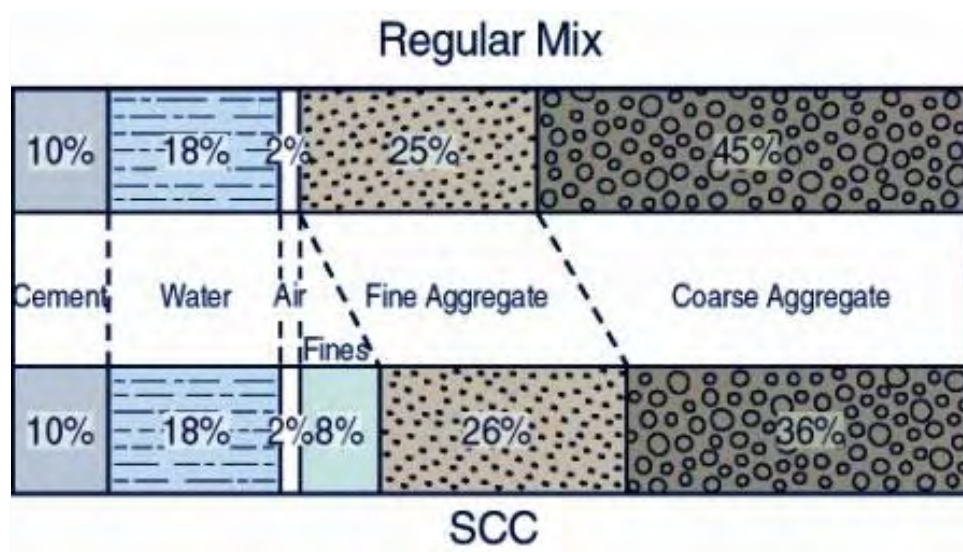
Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση τσιμέντου Portland [πηγή: Γεωργιάδης (2010)]

3.2 Αδρανή υλικά (aggregates)

Τα αδρανή υλικά δεν αντιδρούν με το νερό και το τσιμέντο και δεν επιφέρουν αλλαγές στην σύνθετη σύσταση του σκυροδέματος, εξ ου και η ονομασία τους. Είναι σχετικά φτηνά υλικά για αυτό και ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλο τον πλανήτη. Προέρχονται από εξόρυξη πετρωμάτων ή από θραύσματα φυσικών αποθέσεων αυτών των πετρωμάτων. Τα πιο γνωστά αδρανή υλικά είναι η άμμος, το γαρμπίλι, το χαλίκι και η σκύρα. Τα προαναφερθέντα έχουν πυκνότητα μεταξύ 1520 και 1680 kg/m^3 και παράγουν σκυρόδεμα κανονικού βάρους με ειδικό βάρος 2400 kg/m^3 . Άλλα αδρανή που βρίσκονται κάτω ή πάνω από τα παραπάνω όρια πυκνότητας θεωρούνται ελαφριά και βαριά αντίστοιχα [Mehta and Monteiro (2006)].

Ο βασικός ρόλος των αδρανών στο σκυρόδεμα είναι ο σχηματισμός ενός ιστού που θα είναι ταυτόχρονα ανθεκτικός, συνεκτικός και θα μπορεί να παραλάβει τα φορτία της κατασκευής. Γενικά συστήνεται να επιλέγονται αδρανή με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται το περιεχόμενο τους στο σκυρόδεμα βάσει των επιτρεπτών ορίων μεγέθους, όπως αναφέρονται στον

κανονισμό EN 12620. Τις περισσότερες φορές το 60-80% του βάρους του σκυροδέματος οφείλεται στα αδρανή. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζονται δύο διαφορετικά σκυροδέματα, το ένα ΣΣ και το άλλο ΑΣΣ όπου χρησιμοποιείται ίδιο ποσοστό για το τσιμέντο, το νερό και τον παγιδευμένο αέρα. Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην ποσοστιαία χρήση των χονδρόκοκκων (coarse) αδρανών και στην ύπαρξη πρόσθετων ουσιών (fines) στο ΑΣΣ.



Εικόνα 3.1: Παράδειγμα ποσοστιαίας χρήσης πρώτων υλών σε ΣΣ (regular mix) και ΑΣΣ (SCC)
[πηγή: www.selfconsolidatingconcrete.org/mixdesign.html]

Είναι φανερό, ότι η περιεκτικότητα των ΣΣ σε χονδρόκοκκα αδρανή είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε ΑΣΣ (45% έναντι 36%), ενώ σε λεπτόκοκκα αδρανή είναι περίπου η ίδια (25% με 26%). Σημαντική διαφορά παρατηρείται επίσης στην ύπαρξη μεγάλου ποσοστού σε περιεκτικότητα πρόσθετων υλικών (fines), ήτοι 8% στο ΑΣ, έναντι 0% στο ΣΣ.

Η επιλογή των αδρανών υλικών είναι πολύ σημαντικά γιατί επηρεάζει τη σύνθεση του σκυροδέματος, αλλά και τις ιδιότητές του σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση. Επειδή το πλήθος των αδρανών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σκυροδεμάτων είναι μεγάλο θα γίνει διακριτοποίηση βάσει των σημαντικότερων χαρακτηριστικών τους. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η προέλευση, το σχήμα, η τραχύτητα επιφάνειας, η κοκκομετρία και η αντοχή σε θραύση.

3.2.1 Προέλευση-Σχήμα-Τραχύτητα

Τα αδρανή υλικά (εικόνα 3.2) ανάλογα με την προέλευση τους διακρίνονται σε φυσικά, θραυστά ή ανακυκλώσιμα. Από την προέλευσή τους καθορίζονται και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους. Λεπτομέρειες για τη διάκριση τους δίνονται ως εξής:

- a) Τα φυσικά ή ορυκτά αδρανή λαμβάνονται από ποταμούς, ρέματα, ακτές θαλάσσης και ορυχεία είναι γενικώς στρογγυλεμένα και λεία. Προέρχονται από διάφορα είδη πετρωμάτων, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούν μέρος ορυκτών.
- b) Τα θραυστά αδρανή παράγονται από τη θραύση πετρωμάτων, συνήθως ασβεστόλιθων στην Ελλάδα και είναι γενικώς ακανόνιστου σχήματος. Μετά την θραύση και συλλογή τους, κοσκινίζονται για να χωριστούν ανάλογα με τις διαστάσεις τους σε κοκκομετρικές ομάδες όπως και τα φυσικά αδρανή. Τα θραυστά αδρανή χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ειδικών σκυροδεμάτων, όπως το ελαφροσκυρόδεμα.
- c) Τα ανακυκλώσιμα συλλέγονται από κατεδαφισμένες κατασκευές με κατάλληλη επεξεργασία και η χρήση τους στο εξωτερικό αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Αν και θεωρούνται οικονομικά και οικολογικά (αφού ανακυκλώνουν ήδη χρησιμοποιηθέντα αδρανή) πρέπει να συλλέγονται και χρησιμοποιούνται με προσοχή λόγω του αυξημένου ποσοστού χλωριόντων που ενδεχομένως περιέχουν. Σύμφωνα με τους Aslani et al. (2018) η χρήση ανακυκλώσιμων αδρανών επιδρά αρνητικά στη ρευστότητα και διεισσιμότητα του νωπού ΑΣΣ, έννοιες που θα εξηγηθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Στις περισσότερες κατασκευές προτιμώνται τα φυσικά αδρανή και ο λόγος είναι ότι το σφαιρικό τους σχήμα μειώνει τις εσωτερικές τριβές του μίγματος και συνδράμει θετικά στην εργασιμότητα του. Όπως είναι κατανοητό από τη διαδικασία συλλογής και ελάχιστης απαιτούμενης επεξεργασίας τους, τα φυσικά αδρανή είναι και τα φτηνότερα.

3.2.2 Κοκκομετρία

Ως ορισμός, κοκκομετρία είναι η ανάλυση που γίνεται στα αδρανή υλικά και η οποία μας παρέχει το ποσοστό επί τοις εκατό της σύνθεσης του αδρανούς σε κόκκους διαφόρων μεγεθών. Αναλόγως της διέλευσής τους από συγκεκριμένα κόσκινα τα αδρανή διακρίνονται σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα. Τα λεπτόκοκκα αδρανή στα οποία ανήκει η πολύ λεπτή άμμος έχουν μέγεθος κόκκου μικρότερο των 4mm, ενώ τα χονδρόκοκκα αδρανή έχουν μέγεθος κόκκου μεγαλύτερο των

4mm και φτάνουν συνήθως μέχρι και 25mm. Σε αυτά ανήκουν τα χαλίκια, το γαρμπίλι και η σκύρα.



Εικόνα 3.2: Αδρανή σκυροδέματος [πηγή: Google Εικόνες]

Για την κατασκευή εργάσιμων και οικονομικών σκυροδεμάτων απαιτείται χρήση τόσο των χονδρόκοκκων όσο και των λεπτόκοκκων αδρανών. Όσο αυξάνεται το ποσοστό χρήσης και ο μέγιστος κόκκος από τα χονδρόκοκκα αδρανή τόσο λιγότερο τσιμέντο και νερό απαιτούνται για να τα καλύψουν. Επίσης τα χονδρόκοκκα αδρανή αντιμετωπίζουν το φαινόμενο της συρρίκνωσης του σκυροδέματος, όμως η χρήση τους μπορεί να δημιουργήσει φαινόμενα εμπλοκής στους οπλισμούς του ΑΣΣ εξαιτίας του μεγέθους τους. Για αυτό το λόγο οι περισσότεροι κανονισμοί προτείνουν ο μέγιστος κόκκος των χονδρόκοκκων αδρανών να μην ξεπερνά τα 20mm (European Guidelines for SCC 2005). Τα λεπτόκοκκα αδρανή λόγω του μικρού μεγέθους κόκκου που έχουν αυξάνουν τις απαιτήσεις σε ποσότητα τσιμέντου επομένως και το κόστος, αλλά επιδρούν θετικά στην εργασιμότητα του σκυροδέματος.

Στα περισσότερα μίγματα σκυροδέματος και ειδικότερα στο ΑΣΣ υπερτερούν ποσοστιαία τα χονδρόκοκκα αδρανή από τα λεπτόκοκκα. Από κατάλληλες δοκιμές που θα παρουσιαστούν σε

επόμενο κεφάλαιο μπορεί να καθοριστεί όχι μόνο αν το μίγμα μπορεί να διέλθει χωρίς πρόβλημα, αλλά και ποιος είναι ο μέγιστος κόκκος χονδρόκοκκων αδρανών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

3.2.3 Αντοχή σε θραύση

Τα αδρανή υλικά είναι γενικά συμπαγή, ανθεκτικά και δεν επηρεάζουν αρνητικά την αντοχή ή το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος ανεξαρτήτως της προέλευσής τους. Οι συνηθισμένες τιμές αντοχής σε θραύση για πετρώματα από τα οποία εξάγονται τα αδρανή όπως ο γρανίτης, ο βασάλτης, ο πυρόλιθος και ο συμπαγής ασβεστόλιθος είναι μεταξύ 210 και 310 MPa.

3.3 Νερό (water)

Το νερό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του σκυροδέματος θα πρέπει να επιλέγεται βάσει του Ευρωπαϊκού κανονισμού EN-1008 (2002). Ειδικότερα, προτιμητέα επιλογή είναι το πόσιμο νερό που δεν απαιτεί κανέναν περαιτέρω έλεγχο. Πέραν αυτού όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπόγεια ή επιφανειακά νερά, ύστερα από συγκεκριμένους ελέγχους. Μεταξύ των ελέγχων αυτών, συνήθεις είναι δοκιμές για το χρώμα, την οσμή, το pH και την ύπαρξη σωματιδίων. Το θαλάσσιο νερό ενδείκνυται για χρήση μόνο στο άοπλο σκυρόδεμα. Επομένως δεν χρησιμοποιείται στο ΑΣΣ που χρησιμοποιείται σε οπλισμένες κατασκευές. Τέλος το νερό από τις αποχετεύσεις έχει κριθεί εντελώς ακατάλληλο για την σύνθεση όλων των τύπων σκυροδεμάτων.

3.4 Πρόσθετα (additives)

Τα πρόσθετα υλικά είναι ανόργανες ουσίες που εισάγονται κατά την ανάμιξη του μίγματος του σκυροδέματος με σκοπό να βελτιώσουν ή να ελέγξουν ορισμένα χαρακτηριστικά του, όπως η εργασιμότητα, η ανθεκτικότητα σε διάρκεια, ο χρόνος πήξης και η αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Τα πιο γνωστά είναι η ιπτάμενη τέφρα, η πυριτική παιπάλη, η ασβεστολιθική παιπάλη και η σκωρία. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως λεπτά υλικά λόγω του μεγέθους του κόκκου τους που δεν ξεπερνά τα 0.06 mm και βοηθούν στη μείωση του κόστους του σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει διότι τα πρόσθετα είναι πιο φτηνά από το τσιμέντο, μέρος του οποίου αντικαθιστούν.

Χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή του ΑΣΣ συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της σπατάλης παραπροϊόντων βιομηχανικής επεξεργασίας. Τα πρόσθετα υλικά θεωρούνται επιβλαβή για το περιβάλλον, όμως με την αξιοποίησή τους από τον κατασκευαστικό κλάδο μειώνονται οι ρύποι

από την παραγωγή τσιμέντου αφού το αντικαθιστούν σε ένα ποσοστό. Επίσης εφόσον επαναχρησιμοποιούνται αυτά τα επιβλαβή υλικά μειώνεται η επίδρασή τους στο περιβάλλον. Τα περισσότερα πειράματα που έχουν διεξαχθεί πρόσφατα μελετούν τη χρήση και δοσολογία των πρόσθετων στο μίγμα του ΑΣΣ με απώτερο σκοπό την ανάδειξή του μεταξύ άλλων και σε οικολογικό δομικό υλικό.

3.4.1 Ιπτάμενη τέφρα

Πρόκειται σύμφωνα με τον EN 450-1 για λεπτόκοκκο προϊόν (εικόνα 3.3) που λαμβάνεται ως κατάλοιπο της καύσης του άνθρακα (λιθάνθρακα, λιγνίτη) στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως fly ash. Βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό την εργασιμότητα στο νωπό σκυρόδεμα και καθυστερεί την ανάπτυξη των πρώιμων αντοχών. Με την χρήση της ιπτάμενης τέφρας αντικαθίσταται περίπου το 30% του τσιμέντου. Η ιπτάμενη τέφρα είναι δύο κατηγοριών ανάλογα με την περιεκτικότητα της σε ασβέστιο και έχει σφαιρική μορφή κόκκου μεγέθους 50μm.



Εικόνα 3.3: Ιπτάμενη τέφρα [πηγή: Google Εικόνες]

3.4.2 Πυριτική παιπάλη

Είναι παραπροϊόν της βιομηχανίας πυριτικών μετάλλων και σίδηρο-πυριτικών κραμάτων και χρησιμοποιείται από την δεκαετία του 1980. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως silica fume. Σε σχέση με τους κόκκους του κοινού τσιμέντου τύπου Portland έχει σφαιρικούς κόκκους μεγέθους έως και εκατό φορές μικρότερους. Χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα ως πρόσθετο υλικό για αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό 4-10%. Αν και είναι ακριβό υλικό, μπορεί να:

- ✓ Αυξήσει την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κατά 10-15% ,
- ✓ Αυξήσει το μέτρο ελαστικότητας σε όλες τις ηλικίες του σκυροδέματος
- ✓ Συμβάλλει στην αντίσταση σε απόμιξη.

Πρόσφατα παράγονται σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας με βελτιωμένες ιδιότητες (υψηλή αντοχή, ανθεκτικότητα, εργασιμότητα), μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και το ΑΣΣ, στα οποία γίνεται ευρεία χρήση της πυριτικής παιπάλης (εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Πυριτική παιπάλη [πηγή: Google Εικόνες]

3.4.3 Ασβεστολιθική παιπάλη

Χρησιμοποιείται τα τελευταία 35 χρόνια ως υλικό πλήρωσης ή αντικατάστασης του τσιμέντου με σκοπό την μείωση του κόστους παραγωγής του. Είναι η συνηθέστερη μορφή προσθήκης στο ΑΣΣ στο εξωτερικό λόγω των εμφανών αποτελεσμάτων στη νωπή και σκληρυμένη κατάσταση του σκυροδέματος. Λαμβάνεται μετά την θραύση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδεμάτων ή αδρανών υλικών. Δυστυχώς στην Ελλάδα η χρήση της ασβεστολιθικής παιπάλης (limestone filler) είναι περιορισμένη επειδή δεν υπάρχει ειδική μέριμνα συλλογής της και επεξεργασίας της, με συνέπεια να απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Τα ορυκτά πρόσθετα, όπως η ασβεστολιθική παιπάλη (εικόνα 3.5), βελτιώνουν τη συνοχή του σκυροδέματος λόγω της ποιότητας και της ομοιογένειας των κόκκων τους. Προτιμώνται επειδή προσδίδουν σταθερότητα στις πρώτες ύλες του ΑΣΣ, το οποίο έχει μεγάλες απαιτήσεις ειδικά στη νωπή του κατάσταση. Συγκεκριμένα η ασβεστολιθική παιπάλη λειτουργεί, μετά την διαβροχή της με νερό, ως λιπαντικό για τα αδρανή υλικά βελτιώνοντας τη ροή της τσιμεντόπαστας. Σύμφωνα με τους Baradan et al. (2006) η χρήση της ασβεστολιθικής παιπάλης μείωσε το ιξώδες και αύξησε την τάση διαρροής του ΑΣΣ.



Εικόνα 3.5: Ασβεστολιθική παιπάλη [πηγή: Google Εικόνες]

3.4.4 Σκωρία

Η σκωρία παράγεται κατά την βιομηχανική επεξεργασία του τσιμέντου ή μεταλλουργικών υλικών, συνήθως χυτοσιδήρου [Αναστασίου (2009)]. Υπάρχουν διαφορετικά είδη σκωρίας αναλόγως του αρχικού προϊόντος και του σταδίου επεξεργασίας του. Η σκωρία (slag) μοιάζει αρκετά με την ιπτάμενη τέφρα σε χημική σύσταση, όμως χρησιμοποιείται συνήθως σε μεγαλύτερες ποσότητες χωρίς να καταφέρνει να βελτιώσει στον ίδιο βαθμό την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος.

Η σκωρία, όπως τα περισσότερα πρόσθετα, προσδίδει στο σκυρόδεμα, αυξημένη τάση διαρροής και χαμηλό ιξώδες. Δεν χρησιμοποιείται στις προκατασκευές γιατί δεν επηρεάζει τις πρώιμες αντοχές που είναι και ο βασικός τους στόχος. Η μορφή των σωματιδίων της σκωρίας (εικόνα 3.6) είναι ακανόνιστη και γωνιώδης. Ανάλογα με τα χημικά και κοκκομετρικά χαρακτηριστικά της η σκωρία μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως την ασβεστολιθική παιπάλη ή ακόμα και το 15% του τσιμέντου [Shi (2002)] χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στο σκυρόδεμα. Τέλος αν είναι αρκετά λεπτή μπορεί να μειώσει το ποσοστό του απαιτούμενου νερού από το σκυρόδεμα.



Εικόνα 3.6: Σκωρία [πηγή: Google Εικόνες]

3.5 Χημικά Πρόσμικτα (admixtures)

Το σκυρόδεμα βασίζεται στη ρεολογία της νωπής του κατάστασης. Η ρεολογία εξαρτάται από τα υλικά, την κοκκομετρία και τη χρήση ισχυρών χημικών πρόσμικτων. Τα τελευταία θεωρούνται πλέον απαραίτητες ουσίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κάθε τύπου σκυροδέματος παγκοσμίως. Συγκεκριμένα το ΑΣΣ επειδή έχει ειδικές απαιτήσεις για συμπίκνωση και εργασιμότητα χρειάζεται μεγαλύτερες ποσότητες πρόσμικτων στο μίγμα του. Καθώς τα χημικά πρόσμικτα είναι ισχυρές και εξειδικευμένες ουσίες στο εμπόριο με σημαντικό κόστος, το κόστος του ΑΣΣ αυξάνεται σε σύγκριση με τα συμβατικά σκυροδέματα. Για να γίνει κατανοητή η διαφορά ποσότητας των πρόσμικτων που χρησιμοποιείται, συνίσταται από τους κανονισμούς το ΣΣ να περιέχει ποσότητα πρόσμικτων 1-2% κατά βάρους του τσιμέντου του. Το αντίστοιχο ποσοστό για το ΑΣΣ είναι γενικά άνω του 3%.

Η δραστηριότητα των χημικών πρόσμικτων εξαρτάται από τη δοσολογία τους, την προέλευσή τους, τη χημική τους σύσταση, το λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c) καθώς και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά τη σκυροδέτηση. Γενικά υπάρχουν πολλές κατηγορίες χημικών πρόσμικτων, αλλά παρακάτω θα παρουσιαστούν οι τρεις βασικότερες:

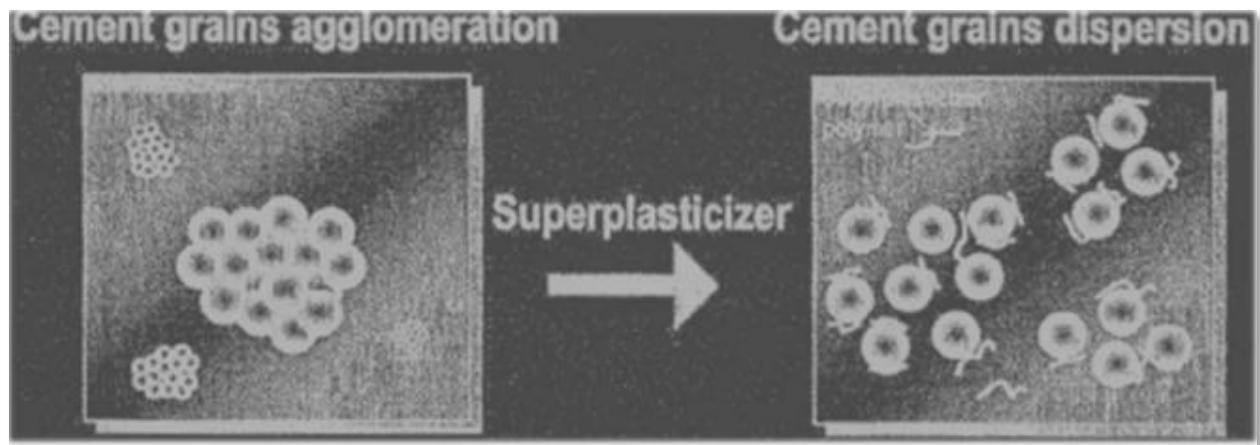
1. Υπερρευστοποιητές
2. Υδατικοί μειωτήρες
3. Ρυθμιστές ιξώδους

3.5.1 Υπερρευστοποιητές

Οι υπερρευστοποιητές αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1970 και αποτελούν το βασικό χημικό πρόσμικτο που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία του σκυροδέματος. Είναι γνωστοί και ως υψηλής κλίμακας μειωτές νερού. Μειώνουν την απαίτηση του νερού μέχρι και 30% και βελτιώνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος για χαμηλούς λόγους w/c. Η αυξημένη ρευστότητα που παρατηρείται στο νωπό σκυρόδεμα οφείλεται στην ικανότητα των υπερρευστοποιητών να διασπών τα συσσωματώματα μορίων που κυριαρχούν στην τσιμεντόπαστα μέσω αρνητικά φορτισμένων μονάδων της κύριας αλυσίδας των πολυμερών από τα οποία αποτελούνται (εικόνα 3.7). Αυτή η ικανότητα κάνει τους υπερρευστοποιητές ιδιαίτερα αποτελεσματικούς και σε διάσπαση άλλων μορίων μικροαλεσμένων ουσιών, όπως η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη. Επειδή τα μόρια των υπερρευστοποιητών έχουν εξαιρετικά μεγάλη διασπορά

επιταχύνουν το ρυθμό ενυδάτωσης, το χρόνο πήξης και τη σκλήρυνση του σκυροδέματος. Οι υπερρρευστοποιητές ως τελευταία τεχνολογία πρόσμικτων με όλες τις παραπάνω ιδιότητες τους έχουν καταρρίψει τις κακές φήμες που είχαν οι πρώτες γενιές ρευστοποιητών. Όμως πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στη δοσολογία τους στο μίγμα γιατί η υπέρμετρη χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε απόμιξη των υλικών της τσιμεντόπαστας. Μια συγκεκριμένη υποκατηγορία των υπερρρευστοποιητών που χρησιμοποιούνται ευρέως στο εξωτερικό είναι τα πολυεστερικά-πολυκαρβοξυλικά συμπυκνώματα (PC).

Η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του τσιμέντου, όπως θλιπτική και καμπτική αντοχή, είναι αντιστρόφως ανάλογη του λόγου w/c. Όπως αναφέρεται παραπάνω η χρήση υπερρρευστοποιητών μειώνει τις απαιτήσεις του ΑΣΣ σε νερό και επομένως μειώνει το λόγο w/c. Έτσι σκυροδέματα, όπως το ΑΣΣ, που χρησιμοποιούν υπερρρευστοποιητές αναπτύσσουν μεγαλύτερες πρώιμες αντοχές ειδικά σε νεαρές ηλικίες σε σχέση με τα ΣΣ. Το γεγονός αυτό αξιοποιείται και στη βιομηχανία παρασκευής προκατασκευασμένων στοιχείων από ΑΣΣ λόγω της απαίτησής τους σε ανάπτυξη υψηλών πρώιμων αντοχών.



Εικόνα 3.7: Διάσπαση κόκκων τσιμέντου με την χρήση υπερρρευστοποιητών [πηγή: Collepardi et al. (2006)]

3.5.2 Υδατικοί μειωτήρες

Οι υδατικοί μειωτήρες χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ποσότητας νερού κατά 5-10% στο σκυρόδεμα, μειώνοντας ταυτόχρονα και το λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c). Οι υδατικοί μειωτήρες βελτιώνουν γενικά την ποιότητα και τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, ενώ

μειώνουν το πορώδες του. Αν και η πρώτη γενιά των υδατικών μειωτήρων, όπως τα λιγνοσουλφονικά χρησιμοποιήθηκαν από τη δεκαετία του 1930 πλέον έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από την τελευταία γενιά που περιέχει πολυκαρβοξυλικούς αιθέρες. Αυτοί έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε χλωρίδια και αλκάλια και είναι ιδανικοί στην παραγωγή του ΑΣΣ (εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Υδατικός μειωτήρας MasterGlenium 51 από την BASF [πηγή: Google Εικόνες]

3.5.3 Ρυθμιστές ιξώδους

Τέλος οι ρυθμιστές ιξώδους (Viscosity Modifying Admixtures) χρησιμοποιούνται σε μίγματα σκυροδέματος με μικρή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά ή με ανώμαλη κοκκομετρική διαβάθμιση. Οι ρυθμιστές ιξώδους μειώνουν την ευαισθησία του μίγματος του σκυροδέματος σε μικρές μεταβολές των συστατικών του. Στο ΑΣΣ οι ρυθμιστές ιξώδους έχουν αποτελεσματική χρήση γιατί μειώνουν το ιξώδες και αυξάνουν την εργασιμότητα του. Αυτή η μείωση στο ιξώδες οφείλεται στην ικανότητα των ρυθμιστών να κρατούν ενωμένο το νερό και τα αδρανή υλικά με την τσιμεντόπαστα στη νωπή της κατάσταση. Οι πιο γνωστοί ρυθμιστές είναι οι αιθέρες κυτταρίνης και τα βιοπολυμερή.

4. Παραγωγή και χαρακτηριστικά νωπού ΑΣΣ

Το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα διαφέρει από το Συμβατικό Σκυρόδεμα καθώς έχει διαφορετικές απαιτήσεις σε ρεολογία και εργασιμότητα. Το κύριο αντικείμενο της ρεολογίας του ΑΣΣ είναι η μελέτη της ροής του υπό συνθήκες ελαστικών παραμορφώσεων. Όσο το ΑΣΣ βρίσκεται σε νωπή (υγρή) κατάσταση πρέπει να παρουσιάζει αυξημένη εργασιμότητα, δηλαδή να μπορεί να μεταφέρεται, διαστρώνεται και να συμπυκνώνεται. Η εργασιμότητα του, όπως σε όλα τα σκυροδέματα, μειώνεται με το χρόνο αφού η τσιμεντόπαστα αρχίζει να πήζει μετά την διάστρωση και να αποκτά σκληρυμένες ιδιότητες. Οι βασικοί παράμετροι που καθορίζουν τη ρεολογία, την εργασιμότητα και γενικά τις ιδιότητες του ΑΣΣ είναι:

- ❖ Η ποσότητα νερού στο μίγμα
- ❖ Το είδος και η ποσότητα των αδρανών και πρόσθετων υλικών και οι χημικές τους ιδιότητες
- ❖ Το ποσοστό του αέρα στο μίγμα
- ❖ Η παρουσία και η δράση των χημικών πρόσμικτων
- ❖ Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος
- ❖ Η διαδικασία μίξης

4.1 Τύποι ΑΣΣ

Το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα έχει μεγαλύτερο όγκο πάστας σε σχέση με το Συμβατικό Σκυρόδεμα. Έτσι οι εσωτερικές τριβές μεταξύ των αδρανών μειώνονται, η ροή της τσιμεντόπαστας είναι ανεμπόδιστη και εξαρτάται μόνο από το ίδιο της το βάρος. Αυτός ο αυξημένος όγκος δεν οφείλεται στη μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου γιατί μια τέτοια αύξηση θα ήταν αντιοικονομική, αλλά στη χρήση πρόσθετων υλικών που μειώνουν το κόστος και ενισχύουν την απαιτούμενη ρευστότητα του μίγματος δίχως να επηρεάζουν αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες του ΑΣΣ.

Το ΑΣΣ διακρίνεται σε τρεις τύπους αναλόγως της ποσότητας των πρόσθετων υλικών και των υπερρευστοποιητών που χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή του μίγματος. Σύμφωνα με τους Sonebi και Yahia (2020) οι δύο πρώτοι τύποι χρησιμοποιούνται στην Ασία και ειδικότερα στην

Ιαπωνία, ενώ ο τρίτος τύπος χρησιμοποιείται στη Βόρεια Αμερική (ACI 237). Οι τρεις τύποι του ΑΣΣ είναι:

1. **Powder type**, που βασίζεται στη χρήση μεγάλης ποσότητας πρόσθετων υλικών ($550-650 \text{ kg/m}^3$) για αντικατάσταση του τσιμέντου και ταυτόχρονα στη μειωμένη χρήση νερού ώστε τελικά ο λόγος w/c να είναι 0,3 με 0,5. Τα πρόσθετα υλικά προσδίδουν αυξημένη ρεολογία στο μίγμα του ΑΣΣ. Σε αυτόν τον τύπο γενικά χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα υπερρευστοποιητών σε σχέση με τους άλλους δύο με συνέπεια την αύξηση του κόστους.
2. **VMA type**, όπου χρησιμοποιείται μειωτές ιδώδους (**Viscosity Modifying Admixtures**) και μικρή ποσότητα πρόσθετων υλικών ($350-450 \text{ kg/m}^3$) για αντικατάσταση του τσιμέντου. Η ποσότητα του νερού είναι αυξημένη σε σχέση με το powder type ΑΣΣ και έτσι το μίγμα χαρακτηρίζεται από καλύτερη ρευστότητα.
3. **Combination type**, ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων τύπων. Η ποσότητα του νερού, του λόγου w/c και του VMA είναι χαμηλή, ενώ είναι μέτρια για τα πρόσθετα υλικά ($450-550 \text{ kg/m}^3$). Τα ΑΣΣ αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται από αυξημένη σταθερότητα του μίγματος σε αλλαγές της σύστασης του ή των ιδιοτήτων των αδρανών υλικών που περιέχει.

4.2 Διαδικασία παραγωγής νωπού ΑΣΣ

Σύμφωνα με την Τεχνική Οδηγία 5 (2014) της Επιτροπής Τεχνολογίας Σκυροδέματος το ΑΣΣ θα πρέπει να παράγεται σε πιστοποιημένες Μονάδες Παρασκευής Σκυροδέματος σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ποιότητας ISO 9001. Το προσωπικό που θα εμπλέκεται στη διαδικασία παραγωγής, ελέγχου και μεταφοράς οφείλει να έχει επαρκή εκπαίδευση πάνω στη χρήση του ΑΣΣ μιας και οι ιδιότητες τους παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία, σε σχέση με το ΣΣ, σε μεταβολές της σύστασής του κατά τη παρασκευή και τη διαδικασία ανάμιξης του.

Η διαδικασία παραγωγής νωπού ΑΣΣ ακολουθεί την διαδικασία του πίνακα 4.1 σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-06-00 (2009). Αν οι έλεγχοι των ιδιοτήτων/επιδόσεων που γίνονται στο εργαστήριο δεν συμμορφώνονται με τα Ευρωπαϊκά ή Ελληνικά πρότυπα τότε πρέπει να γίνει

επανασχεδιασμός του μίγματος με άλλα υλικά ή αναλογίες τους. Οι έλεγχοι του νοπού ΑΣΣ παρουσιάζονται στην επόμενη παραγράφους.



Πίνακας 4.1: Διαδικασία παραγωγής ΑΣΣ [πηγή: ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-06-00 (2009)]

Τα αδρανή υλικά θα πρέπει να συλλέγονται ξεχωριστά από αποθήκες μέσα στις οποίες προφυλάσσονται από την υγρασία του περιβάλλοντος και από τυχαία ανάμιξη μεταξύ τους. Οι έλεγχοι για την κοκκομετρική τους διαβάθμιση θα πρέπει να είναι συχνότεροι στο ΑΣΣ από το ΣΣ. Για το τσιμέντο, το νερό, τα πρόσθετα και τα πρόσμικτα δεν υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις και απλώς ακολουθούνται οι οδηγίες των κατασκευαστών τους.

Ο τρόπος και τα μέσα της μίξης επηρεάζουν τη ρεολογία του μίγματος, αλλά και τις τελικές ιδιότητες του σκληρυμένου ΑΣΣ. Αν και υπάρχουν αρκετοί τύποι αναμικτήρων που χρησιμοποιούνται (ελεύθερης πτώσης, βίαιας ανάμιξης κ.α), προτιμώνται οι αναμικτήρες βίαιας ανάμιξης μιας και το ΑΣΣ περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα πρόσμικτων και η διαδικασία ομογενοποίησης του μίγματος διαρκεί περισσότερο. Ο χρόνος λειτουργίας του αναμικτήρα προκύπτει μέσα από δοκιμές αναλόγως και της περιεκτικότητας του μίγματος σε νερό [Lowke et al (2005)], ωστόσο η ανάμιξη του ΑΣΣ διαρκεί συνήθως περισσότερο από την ανάμιξη του ΣΣ. Πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε να μην γίνεται υπερανάδευση του μίγματος του ΑΣΣ γιατί θα χάσει τη σχεδιασμένη ρεολογία του.

Η σειρά με την οποία θα προστεθούν τα υλικά του ΑΣΣ στον αναδευτήρα είναι καθορισμένη από τους αντίστοιχους κανονισμούς. Πρώτα τοποθετούνται στον αναμκτήρα τα αδρανή, το τσιμέντο και τα πρόσθετα. Στη συνέχεια προστίθενται τα πρόσμικτα, δηλαδή ο υπερρευστοποιητής και το VMA (αν απαιτείται η χρήση του) διαλυμένα μέσα στο νερό. Οι Olek et al. (2007) παρατήρησαν ότι η προσθήκη των χημικών πρόσμικτων σε δύο δόσεις είναι ευεργετική για τη ρεολογία και τη συνοχή του μίγματος ΑΣΣ.

Το δυσκολότερο κομμάτι της παραγωγής του ΑΣΣ είναι ο σχεδιασμός της σύστασης του μίγματος. Η δυσκολία του σχεδιασμού οφείλεται στις διαφορετικές απαιτήσεις των κατασκευαστών, στα υλικά και στην έλλειψη συγκεκριμένων προτάσεων από τους Αμερικάνικους και Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς. Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί από τα πρώτα χρόνια παραγωγής του ΑΣΣ μέχρι και σήμερα. Μερικά από αυτά τα μοντέλα είναι εμπειρικά [Okamura and Ozawa (1995)], στατιστικά [Bouziani (2013)], ενώ άλλα βασίστηκαν σε αυξημένες αντοχές [Dinakar (2012)], ρεολογία της τσιμεντόπαστας [Nielsen et al. (2003)] και οικολογία του υλικού [Alyamac et al. (2016)].

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα σύνθεσης ΑΣΣ στην Ιαπωνία, Ευρώπη και Βόρεια Αμερική σύμφωνα με τους Sonebi and Yahia (2020). Αν και τα παραδείγματα αυτά είναι τυπικά είναι μια καλή ευκαιρία για παρουσίαση της παραγωγικής φιλοσοφίας ανά τον κόσμο, αναλόγως τις απαιτήσεις των κατασκευαστών.

Από τους παρακάτω πίνακες παρατηρείται ότι στην Ευρώπη γίνεται χρήση μεγαλύτερης ποσότητας νερού, ενώ στην Αμερική τα μίγματα περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου. Οι λόγοι w/c είναι μεταξύ 0,35 και 0,70 εξαιτίας της προσθήκης των πρόσθετων (SCM ή Supplementary Cementitious Materials) για αντικατάσταση του τσιμέντου.

Στη συνολική ποσότητα των πρόσθετων που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνονται: η σκόνη ασβεστόλιθου (limestone), η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) και η σκωρία (slag). Επίσης παρατηρείται ότι σε μερικά μίγματα η άμμος (sand) ως λεπτόκοκκο αδρανές υπερτερεί των χονδρόκοκκων αδρανών (coarse aggregates). Στα πρόσμικτα περιλαμβάνονται οι ισχυροί υδατικοί μειωτήρες (high range water reducers ή HRWR) που χρησιμοποιούνται σε όλους τους τύπους ΑΣΣ και οι μειωτές ιξώδους (viscosity modifying admixtures ή VMA) που χρησιμοποιούνται μόνο στο VMA-type ΑΣΣ. Τέλος η εξάπλωση (slump flow) εξηγείται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

Constituents (kg/m ³)	J-powder type	J-combined type	J-VMA type
Water	175	165	165
Cement	530 ^a	298	220
Fly ash	70	206	–
Ground blast furnace slag	–	–	220
SCM	600	504	440
Sand	751	702	870
Coarse aggregate	789	871	825
HRWR	9.0	10.6	4.4
VMA	0	0.0875	4.1
Slump flow (mm)	625	660	600

α: Τσιμεντό χαμηλής θερμότητας

Πίνακας 4.2: Τυπική σύνθεση ΑΣΣ στην Ιαπωνία (Japan)

Constituents (kg/m ³)	E-powder type	E-combined type	E-VMA type
Water	190	192	200
Cement	280	330	310
Limestone	245	–	–
Fly ash	–	–	190
Ground blast furnace slag	–	200	–
SCM	525	530	500
Sand	865	870	700
Coarse aggregate	750	750	750
HRWR	4.2	5.3	6.5
VMA	0	0	7.5
Slump flow (mm)	600–750	600–750	600–750

Πίνακας 4.3: Τυπική σύνθεση ΑΣΣ στην Ευρώπη (Europe)

Constituents (kg/m ³)	E-powder type	E-combined type	E-VMA type
Water	174	180	154
Cement	408	357	416
Limestone	–	119	–
Fly ash	45	–	–
Ground blast furnace slag	–	–	–
SCM	525	476	416
Sand	1052	936	1015
Coarse aggregate	616	684	892
HRWR (mL)	1602	2500	2616
VMA (mL)	0	0	542
Slump flow (mm)	710	660	610

Πίνακας 4.4: Τυπική σύνθεση ΑΣΣ στη Βόρεια Αμερική (USA) [πηγή: Sonebi and Yahia (2020)]

4.3 Ιδιότητες νωπού ΑΣΣ

Πέραν της εργασιμότητας, κάθε μίγμα νωπού ΑΣΣ πρέπει να έχει τρεις άλλες σημαντικές ιδιότητες [Σφήκας (2014)]. Ο τρόπος που εξετάζονται αυτές οι ιδιότητες θα εξηγηθεί αναλυτικά στη συνέχεια του κεφαλαίου. Οι τρεις ιδιότητες είναι:

1. **Ρευστότητα**, δηλαδή η ιδιότητα του ΑΣΣ να ρέει και να καλύπτει όλα τα κενά ανεξαρτήτως της πολυπλοκότητας του οπλισμού μόνο με την επίδραση του βάρους του [Goodier (2003)]. Για να υπάρχει μεγάλη πληρότητα των κενών θα πρέπει οι κόκκοι των αδρανών του μίγματος να είναι στρογγυλεμένοι. Έτσι οι αναπτυσσόμενες τριβές των μορίων της τσιμεντόπαστας θα είναι όσο το δυνατόν μικρότερες και η ροή θα είναι σχετικά ανεμπόδιστη.
2. **Διειλεσιμότητα**, δηλαδή η ιδιότητα του ΑΣΣ να ρέει μεταξύ των κενών των ράβδων ή/και σύνθετων γεωμετρικών ξυλοτύπων δίχως να σημειώνεται εμπλοκή αδρανών και τοπική απόμιξη του μίγματος [Shi et al. (2015)]. Επηρεάζεται θετικά από τη μείωση του μέγιστου κόκκου των αδρανών υλικών και από την αύξηση του όγκου της τσιμεντόπαστας γιατί μειώνονται οι εσωτερικές τριβές.
3. **Σταθερότητα**, δηλαδή η ιδιότητα του ΑΣΣ να διατηρεί ομοιογενή τη σύσταση του με απουσία διαχωρισμού κατά τη διάστρωση μέχρι και την πήξη του. Επιτυγχάνεται είτε μέσω της χρήσης πρόσθετων υλικών είτε μέσω της χρήσης πρόσμικτων ουσιών.

Οι παραπάνω ιδιότητες είναι ιδιαίτερο σημαντικές για το ΑΣΣ. Κάθε μίγμα νωπού ΑΣΣ θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από αυτές. Οι τρεις αυτές ιδιότητες δεν είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη και αυτό θα φανεί παρακάτω από τις δοκιμές εξέτασής τους που ορίζονται από συγκεκριμένα πρότυπα.

4.4 Δοκιμές ιδιοτήτων νωπού ΑΣΣ

Για να ελεγχθεί ότι το ΑΣΣ πληροί τις τρεις ιδιότητες της προηγούμενης παραγράφου πραγματοποιούνται ορισμένες δοκιμές ελέγχου στο εργοτάξιο αμέσως μετά την παραγωγή του μίγματος του ΑΣΣ. Η διαδικασία των δοκιμών ελέγχου επεξηγείται αναλυτικά στην Ελλάδα και στην Ευρώπη από τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα που

εκδόθηκαν από την EFNARC το 2005. Για περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν επίσης και τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 12350 (2010). Για τους Αμερικάνικα μίγματα ΑΣΣ υπάρχουν τα πρότυπα ACI 237R (2007).

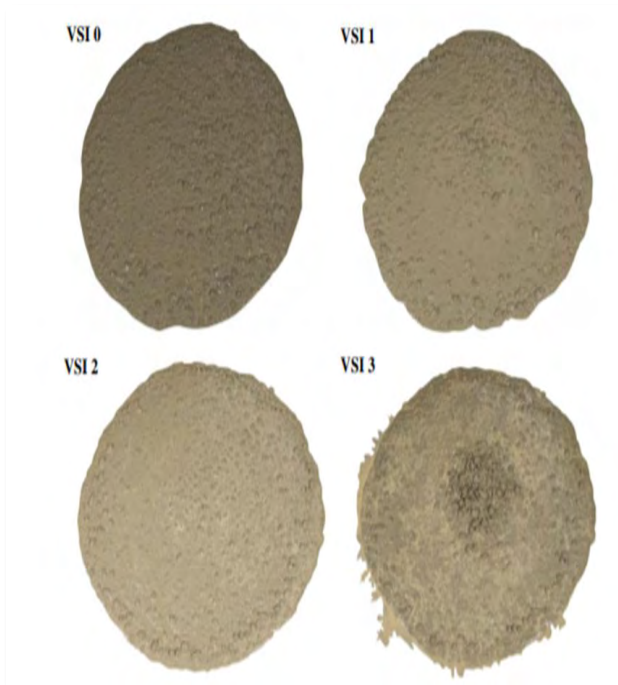
Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες δοκιμές που γίνονται στο νωπό ΑΣΣ και ποια ιδιότητα εξετάζουν.

4.4.1 Δοκιμές Ρευστότητας: Κώνος εξάπλωσης, T_{50} και Χοάνη V

Η δοκιμή κώνου εξάπλωσης (slump flow method) γίνεται για να προσδιοριστεί η ρευστότητα του νωπού ΑΣΣ σε ανεμπόδιστες συνθήκες (εικόνα 4.1). Βασίζεται στον Ευρωπαϊκό κανονισμό EN 12350-2, στους European Guidelines for SCC και στον Αμερικάνικο κανονισμό ASTM C1611/1611M και πραγματοποιείται με τις ίδιες συνθήκες όπως και για το ΣΣ. Ο Αμερικάνικος κανονισμός συστήνει να μην χρησιμοποιούνται χονδρόκοκκα αδρανή με μέγιστο κόκκο μεγαλύτερο των 25mm ώστε να μειωθούν οι πιθανότητες της απόμιξης του ΑΣΣ.

Η διαδικασία της δοκιμής εξάπλωσης είναι εύκολη και μπορεί να γίνει είτε στο εργοστάσιο παραγωγής ΑΣΣ είτε στο ίδιο το εργοτάξιο με τη βοήθεια μιας μετροταινίας, μιας επίπεδης βάσης και ενός τυποποιημένου κώνου. Στον πίνακα 4.5 φαίνονται οι αποδεκτές τιμές άρα και οι κατηγορίες εξάπλωσης του ΑΣΣ. Για τις περισσότερες κατασκευές με σύνθετα γεωμετρικά σχήματα και πυκνούς οπλισμούς, όπου χρησιμοποιείται το ΑΣΣ, είναι προτιμητέες οι κατηγορίες SF2 (slump flow 2) και SF3 (slump flow 3). Αντίθετα στην κατηγορία SF1 (slump flow 1) εμπίπτουν άοπλες ή ελαφρώς οπλισμένες κατασκευές. Τέλος στην περίπτωση επανάληψης της δοκιμής τα τελικά αποτελέσματα εξάπλωσης δεν θα πρέπει να έχουν διαφορά μεγαλύτερη των 50mm με την αρχική μέτρηση, αλλιώς απορρίπτονται και η μέτρηση επαναλαμβάνεται.

Εκτός από την μετρούμενη απόσταση της εξάπλωσης του μίγματος του ΑΣΣ πρέπει να γίνεται και οπτική παρατήρησή του. Αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια του Visual Stability Index (VSI) και εξετάζει τη διασπορά των χονδρόκοκκων αδρανών του μίγματος ΑΣΣ πάνω στην πλάκα που γίνεται η δοκιμή εξάπλωσης. Από την οπτική παρατήρηση διακρίνεται και η σταθερότητα του μίγματος. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις οπτικής παρατήρησης της εξάπλωσης των μιγμάτων (εικόνα 4.2), εκ των οποίων τα δύο τελευταία (VSI 2 και VSI 3) κρίνονται ανεπαρκή για χρήση. Οι λόγοι είναι η εμφάνιση φαινομένων έντονης απόμιξης των αδρανών στο κέντρο των μιγμάτων και εξίδρωσης του νερού περιμετρικά της τσιμεντόπαστας.



Εικόνες 4.1-4.2: Δοκιμή κώνου εξάπλωσης [πηγή: Sonebi and Yahia (2020)] και κατηγορίες σταθερότητας ΑΣΣ [πηγή: AASHTO-T-351 (2014)]

Class	Slump flow (mm)
SF1	550–650
SF2	660–750
SF3	760–850

Πίνακας 4.5: Κατηγορίες εξάπλωσης ΑΣΣ [πηγή: European Guidelines for SCC (2005)]

Η δοκιμή T_{50} πραγματοποιείται ταυτόχρονα με τη δοκιμή εξάπλωσης και μελετά το συνολικό χρόνο που απαιτείται ώστε το νωπό μίγμα ΑΣΣ να εξαπλωθεί κυκλικά σε απόσταση ίση με 50cm ή 500mm πάνω στην πλάκα του πειράματος εξάπλωσης. Για αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιείται χρονόμετρο και το τελικό αποτέλεσμα υπολογίζεται με ακρίβεια μισού δευτερολέπτου (0,5 sec). Βάσει του πίνακα 4.5 για τη συγκεκριμένη δοκιμή θεωρείται δεδομένο ότι η εξάπλωση του μίγματος ΑΣΣ θα φτάσει και θα ξεπεράσει τα 500mm με ευκολία. Σε αντίθετη περίπτωση το μίγμα

χαρακτηρίζεται από μη επιθυμητή ρευστότητα, απορρίπτεται και πρέπει να επανασχεδιαστεί. Η συγκεκριμένη δοκιμή πέρα από τη ρευστότητα εξετάζει και το ιξώδες του μίγματος. Τυπικά αποτελέσματα ολοκλήρωσης της δοκιμής από την αρχή μέτρησης της εξάπλωσης είναι τα δύο δευτερόλεπτα για μίγματα χαμηλού ιξώδους.

Τέλος η δοκιμή χοάνης V (V-funnel) , σχεδιασμένη από τον Ozawa (1995) στην Ιαπωνία, εξετάζει και αυτή τη ρευστότητα και το ιξώδες του ΑΣΣ μίγματος. Αναλυτικές οδηγίες για τον τρόπο εκτέλεσης της δοκιμής βρίσκονται στην Ευρωπαϊκή Οδηγία EN 12350-9 (2010). Σε αντίθεση με τη δοκιμή εξάπλωσης, η δοκιμή V-χοάνης (εικόνα 4.3) μελετά τη ροή του ΑΣΣ σε συνθήκες εμποδιζόμενης ροής και εκτιμάται ο βαθμός έμφραξης του μίγματος σε στενά ανοίγματα. Αν ο χρόνος ολοκλήρωσης της δοκιμής είναι μικρός τότε το μίγμα ΑΣΣ έχει μικρό ιξώδες, ενώ σε αντίθετη περίπτωση έχει μεγάλο ιξώδες.



Εικόνα 4.3: Διάταξη V-χοάνης [πηγή: Sonebi and Yahia (2020)]

Για την εγκυρότητα της δοκιμής χοάνης V είναι πολύ σημαντική η ροή να παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια. Αν υπάρχει ασυνέχεια στη ροή μπορεί να οφείλεται είτε σε χρήση αδρανών κόκκου μεγαλύτερου των 20mm που κολλάνε στο μικρό άνοιγμα είτε σε περίπτωση απόμιξης του

μίγματος ΑΣΣ. Στην τελευταία περίπτωση το μίγμα πρέπει να απορρίπτεται και να επανασχεδιάζεται. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της δοκιμής σύμφωνα με τους European Guidelines for SCC είναι 9-25 δευτερόλεπτα. Για χρόνους μικρότερους των 9 δευτερολέπτων το μίγμα ΑΣΣ χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλό ιξώδες αλλά υπάρχει κίνδυνος απόμιξης της τσιμεντόπαστας, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό.

4.4.2 Δοκιμές Διελευσιμότητας: Δοχείο L, Δακτύλιος J

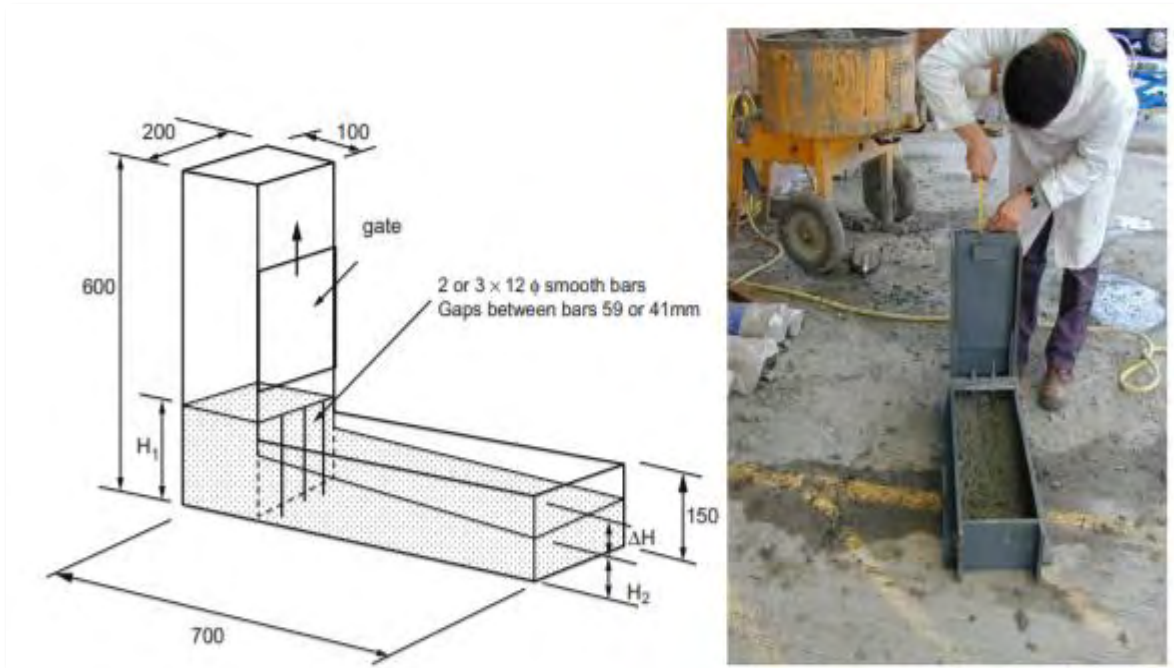
Η δοκιμή δοχείου L (L-box) περιγράφεται αναλυτικά στην Ευρωπαϊκή Οδηγία EN 12350-10 (2010). Εκτιμά τη διελευσιμότητα και το βαθμό έμφραξης των χονδρόκοκκων αδρανών του μίγματος ΑΣΣ διαμέσου πυκνών οπλισμών και στενών ανοιγμάτων, δηλαδή σε συνθήκες εμποδιζόμενης ροής.

Η δοκιμή γίνεται αρχικά με χρήση τριών ράβδων οπλισμού διαμέτρου Φ12. Στο τέλος της δοκιμής μετρούνται τα δύο ύψη του ΑΣΣ στο οριζόντιο H2 και κατακόρυφο H1 τμήμα του δοχείου (εικόνα 4.4) και υπολογίζεται ο λόγος H2/H1 (ή passing ability). Σε ειδικές περιπτώσεις όπου το μίγμα ΑΣΣ είναι αρκετά ρευστό και επιπεδώνεται από μόνο του ο λόγος H2/H1 θα είναι μοναδιαίος. Αυτή είναι και η βέλτιστη τιμή που λαμβάνεται από τη συγκεκριμένη δοκιμή, αν και τις περισσότερες φορές λαμβάνονται λόγοι κοντά στο 0,85. Μη αποδεκτό αποτέλεσμα θεωρείται ο λόγος H2/H1 να βρεθεί να είναι μικρότερος του 0,8 κάτι που σημαίνει ότι η διελευσιμότητα του μίγματος δεν είναι καλή. Το πείραμα επαναλαμβάνεται με χρήση δύο ράβδων οπλισμού διαμέτρου Φ12 και αν ο λόγος H2/H1 βρεθεί ξανά κάτω από 0,8 τότε το μίγμα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΑΣΣ.

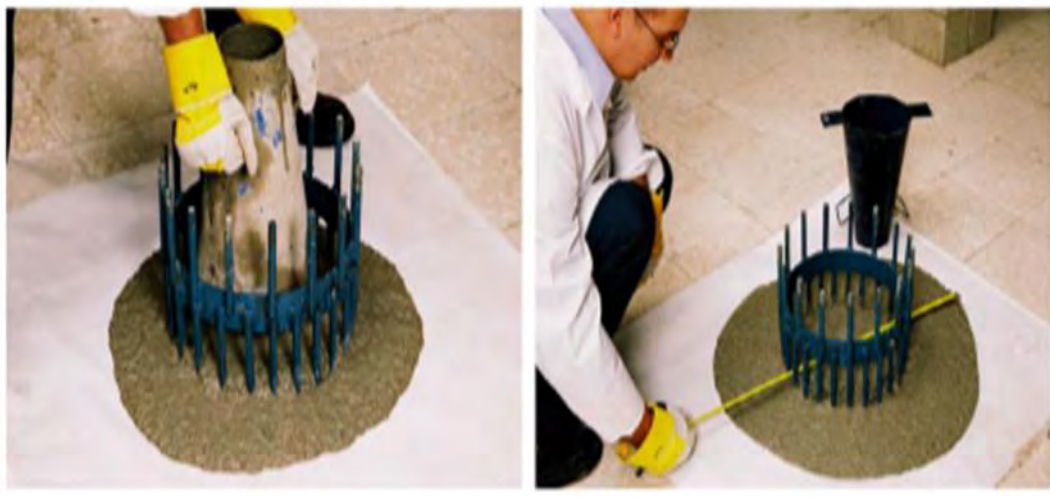
Επιπλέον μετά το τέλος της δοκιμής πραγματοποιείται οπτική εξέταση του μίγματος ΑΣΣ για πιθανή απόμιξη των λεπτόκοκκων αδρανών στο άκρο του οριζοντίου τμήματος του δοχείου και έμφραξη των χονδρόκοκκων αδρανών στις ράβδους οπλισμού [Nguyen et al. (2006)]. Εφόσον παρατηρηθούν τέτοια φαινόμενα το μίγμα ΑΣΣ πρέπει να επανασχεδιάζεται.

Μια άλλη δοκιμή που περιγράφεται από τον Ευρωπαϊκό κανονισμό EN 12350-12 (2010) ή τον Αμερικάνικο κανονισμό ASTM C1621/C1621M (2009) και μελετά τη διελευσιμότητα του ΑΣΣ είναι δοκιμή δακτυλίου J (J-ring) σε εμποδιζόμενες συνθήκες ροής. Πραγματοποιείται με τις ίδιες συνθήκες της δοκιμής εξάπλωσης, επομένως εξετάζει εμμέσως και της ρευστότητα του ΑΣΣ, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ένας οπλισμένος δακτύλιος στην περίμετρο διασποράς του

σκυροδέματος (εικόνα 4.5). Ο δακτύλιος προσομοιώνει τον πυκνό χαλύβδινο οπλισμό γύρω από τον οποίο καλείται να διέλθει το ΑΣΣ.



Εικόνα 4.4: Δοκιμή L-box [πηγή: Sonebi and Yahia (2020)]



Εικόνα 4.5: Δοκιμή J-ring [πηγή: Sonebi and Yahia (2020)]

Τα αποτελέσματα της J-ring δοκιμής υπολογίζονται και συγκρίνονται σύμφωνα με τον πίνακα 4.6 με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της δοκιμής εξάπλωσης. Η διαφορά της εξάπλωσης μεταξύ των δύο μεθόδων δεν πρέπει να ξεπερνά τα 50mm, αλλιώς η διεισσιμότητα γύρω από τους οπλισμούς

του δακτυλίου είναι χαμηλή και το μίγμα δεν θεωρείται αποδεκτό. Τέλος γίνεται και οπτική παρατήρηση του μίγματος ΑΣΣ σύμφωνα με την εικόνα 4.2 μετά την εξάπλωση και την αφαίρεση του δακτυλίου για εξέταση της σταθερότητάς του. Επομένως κατά τη διάρκεια της J-ring δοκιμής εξετάζονται και οι τρεις ιδιότητες που απαιτούνται για να χαρακτηριστεί ένα μίγμα ως ΑΣΣ.

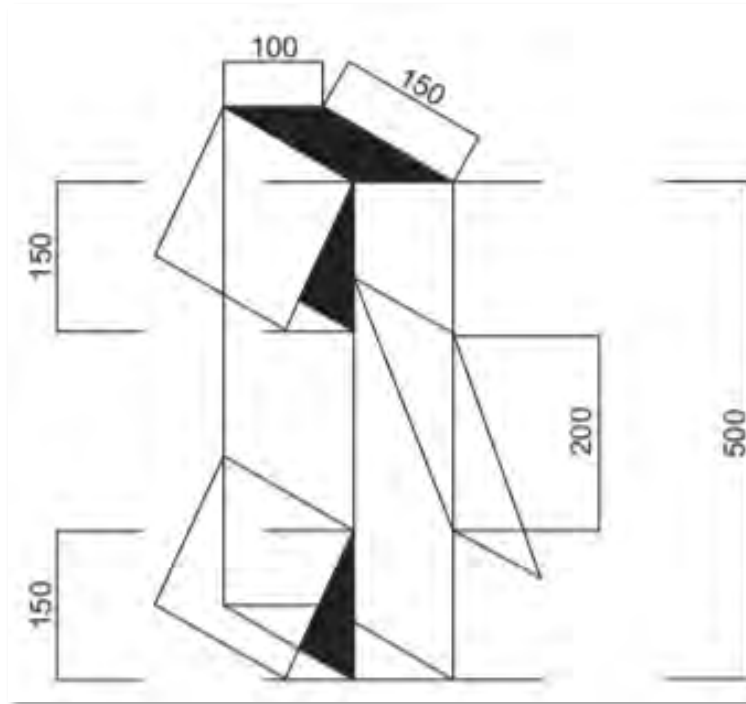
Difference between slump flow and J-Ring flow	Blocking assessment
0–25 mm	No visible blocking
25–50 mm	Minimal to noticeable blocking
>50 mm	Noticeable to extreme blocking

Πίνακας 4.6: Διαφορά στην εξάπλωση μεταξύ δοκιμών εξάπλωσης και J-ring [πηγή: ASTM C1621/C1621M (2007)]

4.4.3 Δοκιμές Σταθερότητας: Απόμιξη στήλης, Σταθερότητας μέσω κοσκίνισης

Η δοκιμή απόμιξης σε στήλη (settlement column test) αναπτύχθηκε πρώτη φορά από τους Schutter et al. (2001) στο πανεπιστήμιο του Gent του Βελγίου και εκτιμά την ικανότητα του μίγματος ΑΣΣ να αντιστέκεται σε πιθανή απόμιξη σε στατικές και δυναμικές συνθήκες (εικόνα 4.6).

Για την επίτευξη της δοκιμής χρησιμοποιείται μια ειδική στήλη με τρία πλευρικά πορτάκια που καθορίζουν και τα τρία επίπεδα της στήλης μετρώντας από πάνω προς τα κάτω. Αφού η στήλη γεμίσει με νωπό ΑΣΣ και αφηθεί για ένα λεπτό ανοίγονται κατά σειρά τα πλευρικά πορτάκια από πάνω προς κάτω και αντίστοιχα συλλέγεται η ποσότητα του ΑΣΣ που εκρέει σε διαφορετικά δοχεία. Στη συνέχεια ζυγίζονται τα πάνω και κάτω δοχεία και υπολογίζεται ο λόγος (settlement column segregation ratio ή SCR) των μαζών τους (πίνακας 4.7).



Εικόνα 4.6: Διάταξη δοκιμής απόμιξης στήλης [πηγή: Aslani et al. (2020)]

Level of segregation	SCR
No segregation	0.96 and above
Mild segregation	0.95–0.88
Notable segregation	0.87–0.72
Severe segregation	0.71 and below

Πίνακας 4.7: Βαθμός απόμιξης στο πείραμα στήλης [πηγή: Rooney (2002)]

Ομοίως η δοκιμή σταθερότητας μέσω κοσκίνισης εξετάζει την αντίσταση του μίγματος ΑΣΣ σε πιθανή απόμιξη σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία EN 12350-11 (2010). Χρησιμοποιείται ένας κουβάς γεμάτος νωπό ΑΣΣ χωρητικότητας 10 λίτρων. Ένα περιεχόμενο του κουβά αδειάζει σιγά σιγά σε ένα κόσκινο 5mm που βρίσκεται πάνω σε μια ζυγαριά. Η συνολική ποσότητα ΑΣΣ που πέφτει από τον κουβά είναι 5 κιλά ΑΣΣ. Το ζητούμενο στο συγκεκριμένο πείραμα είναι να περάσει η ελάχιστη ποσότητα τσιμεντόπαστας μέσα από το κόσκινο μιας και τα χονδρόκοκκα αδρανή θα συγκρατηθούν λόγω του μεγέθους τους. Η απόμιξη προκύπτει ως ο λόγος του βάρους της τσιμεντόπαστας που θα περάσει από το κόσκινο των 5mm προς την συνολική ποσότητα που

αφαιρείται από τον κουβά, δηλαδή τα 5 κιλά ΑΣΣ (πίνακας 4.8). Αν ο παραπάνω λόγος, που εκφράζει την αντίσταση του μίγματος σε απόμιξη, προκύψει υψηλότερος του 20% (Segregation Resistance 1) τότε το μίγμα ΑΣΣ είναι πολύ επιρρεπές σε απόμιξη και άρα ακατάλληλο για χρήση.

Class	Segregation resistance (%)
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

Πίνακας 4.8: Κατηγορίες αντίστασης στην απόμιξη [πηγή: European Guidelines for SCC (2005)]

4.5 Μεταφορά και Σκυροδέτηση νωπού ΑΣΣ

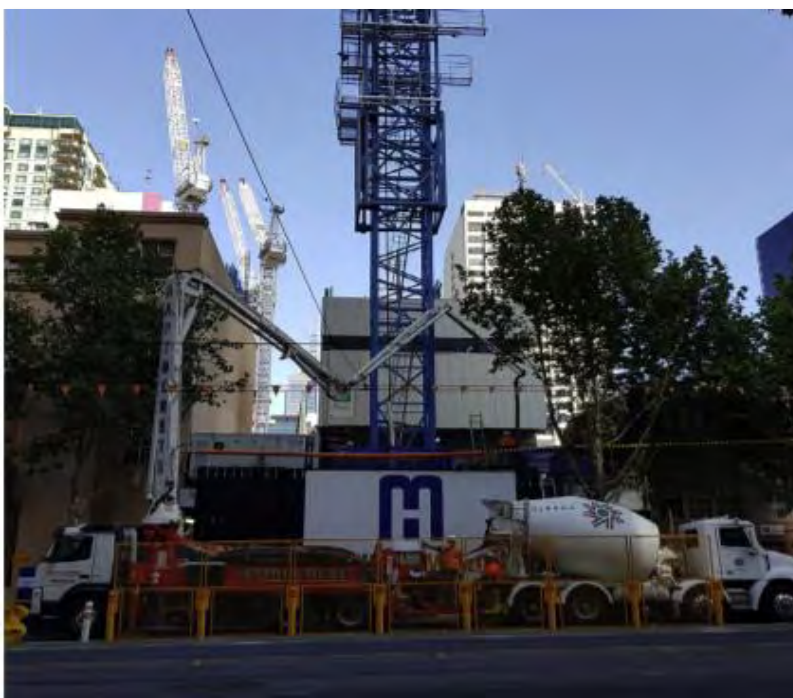
Πριν από την παραγωγή του ΑΣΣ πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κάποιοι παράγοντες από τους οποίους θα εξαρτηθεί η ολοκλήρωση του έργου. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- Η ποσότητα ΑΣΣ που μπορεί να παράγει η Μονάδα Παραγωγής Σκυροδέματος.
- Οι ανάγκες του έργου σε ΑΣΣ.
- Ο χρόνος και απόσταση που διανύουν τα οχήματα μεταφοράς (αναμικτήρες).
- Η ομαλή και διαρκής κατανάλωση του ΑΣΣ στο εργοτάξιο.
- Οι περιβαντολλογικές συνθήκες.
- Η σωστή τοποθέτηση του οπλισμού και των ξυλοτύπων

Το ΑΣΣ είναι ένα εξαιρετικά ρευστό σκυρόδεμα για αυτό και μερικές φορές τα οχήματα μεταφοράς του φορτώνονται με λιγότερη ποσότητα σε σχέση με το ΣΣ, ειδικά αν υπάρχουν ανηφορικά τμήματα στη διαδρομή, για αποφυγή της απόμιξης. Η ανάδευση του ΑΣΣ μέσα στα οχήματα μεταφοράς γίνεται με μικρούς ρυθμούς (1-2 στροφές ανά λεπτό) καθόλη τη διάρκεια της διαδρομής. Με την άφιξη του οχήματος μεταφοράς στο εργοτάξιο γίνεται ανάδευση του ΑΣΣ για μερικά λεπτά σε πλήρη ταχύτητα στροφών για επίτευξη πλήρης ομογενοποίησης του μίγματος. Στη συνέχεια το μίγμα εκφορτώνεται και πραγματοποιούνται σε σύντομο χρονικό διάστημα οι δοκιμές στο νωπό ΑΣΣ που περιγράφονται στη προηγούμενη παράγραφο. Αν το νωπό ΑΣΣ

ικανοποιεί τις επιθυμητές ιδιότητες που απαιτούνται βάσει των απαιτήσεων του κατασκευαστή και των κανονισμών τότε μπορεί να αρχίσει η διαδικασία σκυροδέτησης.

Η σκυροδέτηση (εικόνα 4.7) του ΑΣΣ γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως το ΣΣ, αν και υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις για τα ύψη έκχυσης και για τους ξυλότυπους. Για τα κατακόρυφα στοιχεία, όπως τα υποστυλώματα, η σκυροδέτηση με ΑΣΣ αρχίζει μετά την εισχώρηση του εύκαμπτου σωλήνα μέσα από το άνω ελεύθερο τμήμα του ξυλότυπου και τη σταδιακή ανύψωση του λόγω της αύξησης του όγκου της τσιμεντόπαστας. Ο σωλήνας θα πρέπει καθόλη την διάρκεια της ανύψωσης να βρίσκεται μέσα στην τσιμεντόπαστα για να αποτραπεί ο σχηματισμός φυσαλίδων αέρα, αν και μιας καλής ποιότητας ΑΣΣ μπορεί να απομακρύνει από μόνο του τέτοιες φυσαλίδες. Το συνολικό ύψος της κατακόρυφης ελεύθερης πτώσης του ΑΣΣ δεν πρέπει να ξεπερνά τα 5 μέτρα για αποφυγή απόμιξης του μίγματος. Η πίεση μέσα στον εύκαμπτο σωλήνα έκχυσης, μήκους μικρότερου από τα 300m (JSCE 2007), πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, αλλιώς παρατηρείται μείωση στην εξάπλωση και άρα στην εργασιμότητα του νωπού ΑΣΣ. Όσον αφορά τη σκυροδέτηση από τη βάση του ξυλότυπου, που δίνει γενικά πιο λείες τελικές επιφάνειες, θα πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στο στόμιο εισόδου (European Guidelines for SCC).



Εικόνα 4.7: Κατακόρυφη σκυροδέτηση σε εργοτάξιο [πηγή: Kashani et al. (2020)]

Οι ξυλότυποι ή αλλιώς καλούπια που χρησιμοποιούνται στη σκυροδέτηση του ΣΣ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο ΑΣΣ, αρκεί να είναι ισχυροί και να συμμορφώνονται στους European Guidelines for SCC (2005). Επειδή η ταχύτητα σκυροδέτησης του ΑΣΣ είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το ΣΣ, η πίεση που δέχονται οι ξυλότυποι, εξαιτίας της ταχύτερης αύξησης του όγκου της τσιμεντόπαστας που πρέπει να συγκρατήσουν, είναι μεγαλύτερη.

Επιπροσθέτως μεγάλο ρόλο στην πίεση των ξυλοτύπων έχουν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος [Kayhat et al. (2006)] και οι οπλισμοί του σκυροδέματος [Perrot et al. (2009)]. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος τόσο μικρότερες είναι οι πιέσεις που δέχονται οι ξυλότυποι, όμως για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30 °C μειώνονται η συνεκτικότητα και σταθερότητα του μίγματος ΑΣΣ, κάτι που είναι ανεπιθύμητο. Αντίθετα για μικρότερες θερμοκρασίες η ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών του σκυροδέματος καθυστερεί και οι πιέσεις στους ξυλότυπους αυξάνονται. Έτσι συστήνεται καθόλη τη διάρκεια της σκυροδέτησης η θερμοκρασία του περιβάλλοντος να είναι γύρω στους 20 °C. Αναφορικά με τον οπλισμό του ΑΣΣ ο Perrot κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αύξηση στο ποσοστό του οπλισμού μειώνει τη πίεση στους ξυλότυπους γιατί μειώνεται η απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος.

Το ΑΣΣ χαρακτηρίζεται από αυξημένη ρευστότητα και χαμηλό ιξώδες επομένως είναι πολύ σημαντικό να διασφαλίζεται η στεγανότητα στις συνδέσεις των ξυλοτύπων κατά τη μελέτη και την τοποθέτησή τους (εικόνα 4.8). Τα κόκκινα βελάκια στη συγκεκριμένη εικόνα εστιάζουν σε σημεία ελλιπούς στεγανότητας με αποτέλεσμα τη διαρροή του σκυροδέματος. Θεωρείται γνωστό ότι η δόνηση στο ΑΣΣ προκαλεί διαχωρισμό του μίγματος με καθίζηση των χονδρόκοκκων αδρανών στη βάση των ξυλοτύπων και επίπλευση των λεπτόκοκκων αδρανών στην επιφάνειά του. Λαμβάνοντας υπόψη την ήδη υπάρχουσα υψηλή πίεση που αναπτύσσει το ΑΣΣ, η δόνηση που επιφέρει επιπλέον καταπόνηση στους ξυλότυπους θα πρέπει να αποφεύγεται γιατί καθίσταται επιβλαβής στη στεγανότητά τους.

Αναλόγως των απαιτήσεων της κατασκευής μπορούν να χρησιμοποιηθούν καλούπια από διαφορετικά υλικά σε συνδυασμό με τους ξυλότυπους έχοντας λάβει υπόψη το επιπλέον βάρος και κόστος τους (εικόνα 4.9). Τέτοια υλικά είναι το μέταλλο (μεταλλότυποι) και το πλαστικό (πλαστικότυποι). Οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται ειδικά για τις δοκιδωτές πλάκες σύμφωνα με την Τεχνική Οδηγία 3 (2012).



Εικόνα 4.8: Διαρροή σκυροδέματος από ξυλότυπους [πηγή: ημερίδα ΤΕΕ Βογιατζής (2008)]



Εικόνα 4.9: Ξυλότυποι και μεταλλότυποι για κατακόρυφα στοιχεία [πηγή: Billberg et al. (2006)]

4.6 Συντήρηση ΑΣΣ

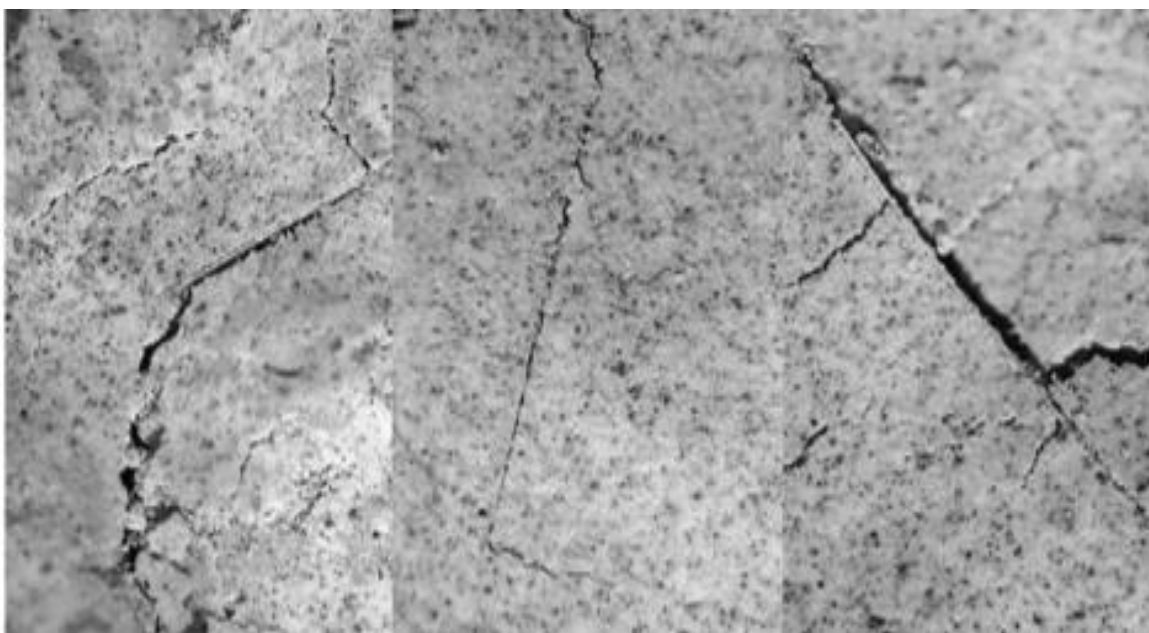
Αμέσως μετά τη σκυροδέτηση του ΑΣΣ αρχίζει η κρισιμότερη διαδικασία της συντήρησής του (εικόνα 4.10), ώστε αυτό να ωριμάσει και αναπτύξει τις μηχανικές του ιδιότητες. Η διαδικασία της συντήρησης του ΑΣΣ γίνεται σύμφωνα με κανονισμούς, όπως ο ACI 237R και ο ΚΤΣ-97 και περιλαμβάνει όλες τις δυνατές ενέργειες που μπορεί να λάβει ο εργολάβος ώστε να εξασφαλιστεί η ανάπτυξη αντοχής σε αυτό το ειδικό σκυρόδεμα. Δίχως τη συντήρηση του ΑΣΣ, η εξάτμιση του νερού από την ελεύθερη επιφάνειά του προκαλεί συρρίκνωση (shrinkage), δημιουργεί ρωγμές, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11 και επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη των αντοχών μελλοντικά [Sivaraman et al. (2016)].

Η συντήρηση ξεκινά μετά το τέλος της σκυροδέτησης ενός στοιχείου του έργου, ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις όπου απαιτείται η έναρξη της συντήρησης πριν την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης και περιγράφονται αναλυτικά από το Ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13670. Για να εξασφαλιστεί καλύτερο επίπεδο υγρασίας και θερμοκρασίας στην επιφάνεια του ΑΣΣ χρησιμοποιούνται μέθοδοι που επιβραδύνουν/απαγορεύουν την επιφανειακή εξάτμιση του νερού (μεμβράνες συντήρησης, βρεγμένες λινάτσες) ή αντικαθιστούν την εξατμιζόμενη ποσότητα (διαβροχή, πλημμύρισμα). Σε μερικές περιπτώσεις προτείνεται ο σχεδιασμός του μίγματος ΑΣΣ με μια μικρή προσαύξηση στη ποσότητα του νερού λόγω της αναμενόμενης μερικής εξάτμισής του [Kashani et al. (2020)].

Τα ΑΣΣ κινδυνεύουν περισσότερο από τα ΣΣ για εμφάνιση επιφανειακών ρωγμών λόγω μεγαλύτερης ποσότητας λεπτόκοκκων αδρανών άρα και διαχωρισμού των υλικών της τσιμεντόπαστας. Κάνοντας συντήρηση μετά τη χρήση ικανοποιητικής ποσότητας πρόσθετων και VMA μειώνονται το ιξώδες και τα κενά του αέρα, η ρευστότητα αυξάνεται και η τελική επιφάνεια του ΑΣΣ είναι καλαίσθητη συγκριτικά με το ΣΣ. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω η έλλειψη συντήρησης του ΑΣΣ θα προκαλέσει εμφάνιση ρωγμών τόσο στο εσωτερικό όσο και στην ελεύθερη επιφάνειά του σκυροδέματος, κάτι που μπορεί να βλάψει την αντοχή και την ανθεκτικότητα του υλικού. Ταυτόχρονα η ολοκλήρωση του έργου θα καθυστερήσει και θα αυξηθεί το κόστος λόγω της ανάγκης για τοπική επιδιόρθωση.



Εικόνα 4.10: Συντήρηση ελεύθερης επιφάνειας σκυροδέματος με διαβροχή [πηγή: <https://civildigital.com/curing-concrete-purpose-curing-curing-methods/>]



Εικόνα 4.11: Εμφάνιση ρωγμών στην ελεύθερη επιφάνεια λόγω κακής συντήρησης [πηγή: Google Εικόνες]

5. Χαρακτηριστικά σκληρυμένου ΑΣΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ο σχεδιασμός και ο τρόπος παραγωγής του μίγματος που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά του σκληρυμένου ΑΣΣ. Παρόλο που οι ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες ιδιότητες του ΣΣ, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκληρυμένου ΑΣΣ είναι αυτά που απασχολούν τους μηχανικούς στην πράξη. Άλλωστε η σχέση μεταξύ της σύστασης του μίγματος και των αντοχών του ΑΣΣ αποτελεί το βασικό ερώτημα των ερευνών μέχρι και σήμερα. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκληρυμένου ΑΣΣ μπορούν μέσω ρύθμισης των συστατικών του μίγματος να είναι παρόμοια, ή κατά περίπτωση καλύτερα, με τα αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΣΣ.

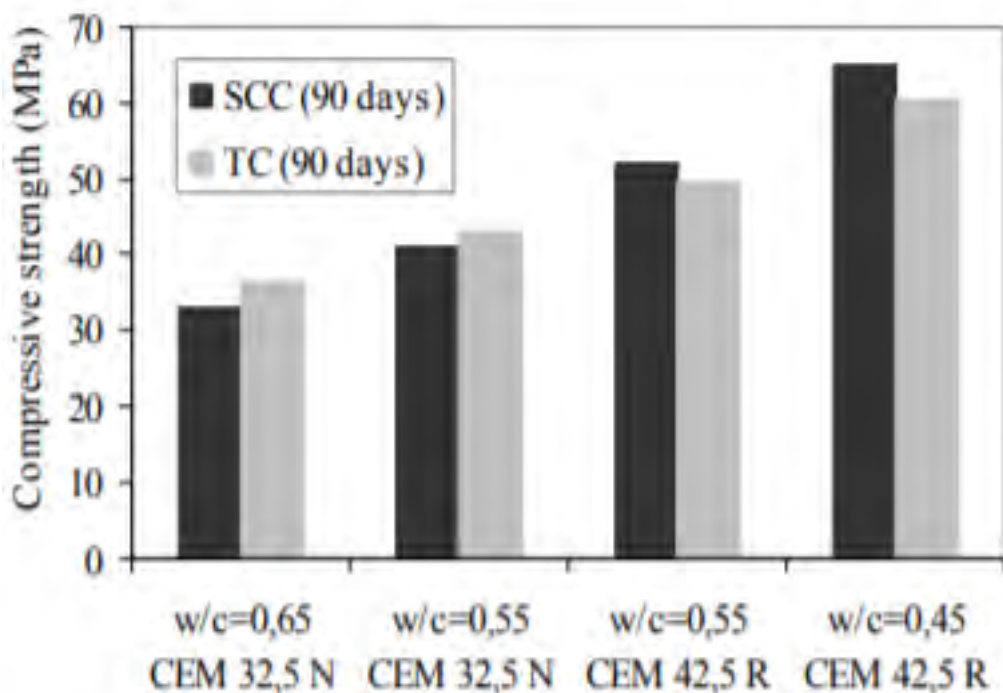
Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκληρυμένου ΑΣΣ συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΣΣ. Επίσης γίνεται αναφορά στο βαθμό επιρροής μερικών συστατικών του ΑΣΣ στις σκληρυμένες του ιδιότητες. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά που θα παρουσιαστούν κατά σειρά είναι:

1. Αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό
2. Αντοχή σε κάμψη
3. Συνάφεια με τον χαλύβδινο οπλισμό
4. Μέτρο ελαστικότητας
5. Συρρίκνωση και ερπυσμός
6. Ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης-απόψυξης
7. Ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες
8. Ανθεκτικότητα σε ενανθράκωση και χλωρίοντα

5.1 Αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό

Η αντοχή σε θλίψη είναι η σημαντικότερη ιδιότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος και αποτελεί τη χαρακτηριστική τιμή, βάσει της οποίας κατηγοριοποιείται το σκυροδέμα. Στα περισσότερα πειράματα είναι η πρώτη ιδιότητα του σκυροδέματος που μελετάται και επομένως θα παρουσιαστεί εκτενέστερα, σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του σκληρυμένου ΑΣΣ.

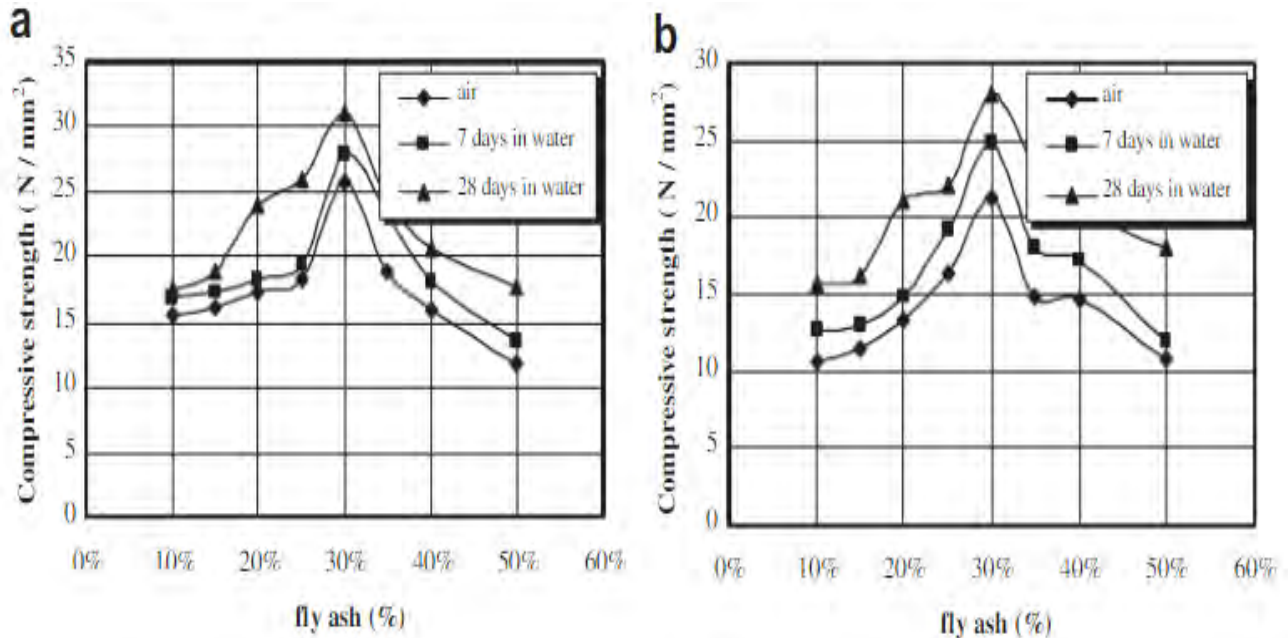
Στη περίπτωση που το μίγμα ΑΣΣ έχει παρόμοια αναλογία υλικών και ίδιο λόγο w/c με το μίγμα ΣΣ, τότε η θλιπτική του αντοχή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη εξαιτίας της βελτιωμένης συμπίκνωσης της τσιμεντόπαστας, της απουσίας δόνησης και της χρήσης των πρόσθετων και των πρόσμικτων (European Guidelines for SCC). Η αυξημένη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ σε σχέση με το ΣΣ (σχήμα 5.1) έχει παρατηρηθεί σε πολλά πειράματα όπως των Parra et al. (2007).



Σχήμα 5.1: Σύγκριση θλιπτικής αντοχής μεταξύ SCC και TC (traditional concrete) [πηγή: Parra et al. (2007)]

Ο ρόλος των πρόσθετων και πρόσμικτων στην αύξηση της συνοχής και κατά συνέπεια της θλιπτικής αντοχής του ΑΣΣ θα αιτιολογηθεί με παρουσίαση των παρακάτω πειραμάτων.

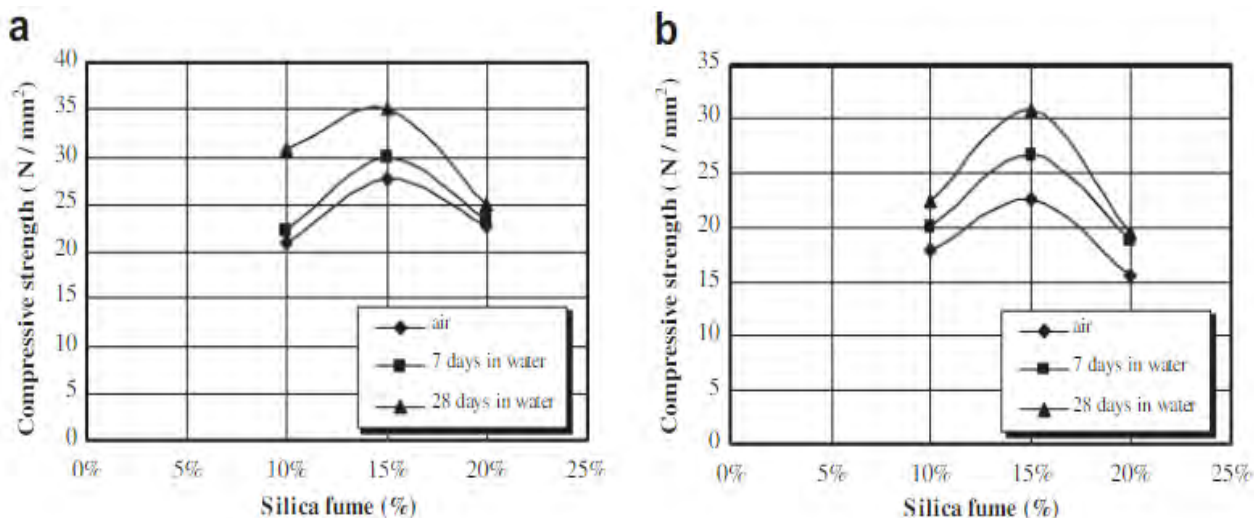
Η Mohamed (2011) παρουσίασε την εργασία της με αντικείμενο την επίδραση των πρόσθετων ως αντικαταστάτες τσιμέντου και συγκεκριμένα της ιπτάμενης τέφρας και της πυριτικής παιπάλης στη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ.



Σχήμα 5.2: Θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ με χρήση ιπτάμενης τέφρας για αντικατάσταση τσιμέντου 550kg/m^3 [a] και 450kg/m^3 [b] [πηγή: Mohamed (2011)]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2 η χρήση ιπτάμενης τέφρας επιδρά θετικά στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής του ΑΣΣ ύστερα από 7 και 28 μέρες, ανεξαρτήτως της συνολικής ποσότητας τσιμέντου του μίγματος. Η μεγιστοποίηση της αύξησης συμβαίνει για αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 30%, ωστόσο περαιτέρω αντικατάσταση μειώνει την θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ.

Όπως και με την ιπτάμενη τέφρα, η πυριτική παιπάλη (σχήμα 5.3) αυξάνει την θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ και μάλιστα για μικρότερο ποσοστό (15%) αντικατάστασης του τσιμέντου. Μάλιστα αν συγκριθούν τα δύο πρόσθετα υλικά τότε η αντικατάσταση του τσιμέντου με πυριτική παιπάλη προκαλεί αύξηση θλιπτικής αντοχής κοντά στο 10% σε σχέση με την ιπτάμενη τέφρα.



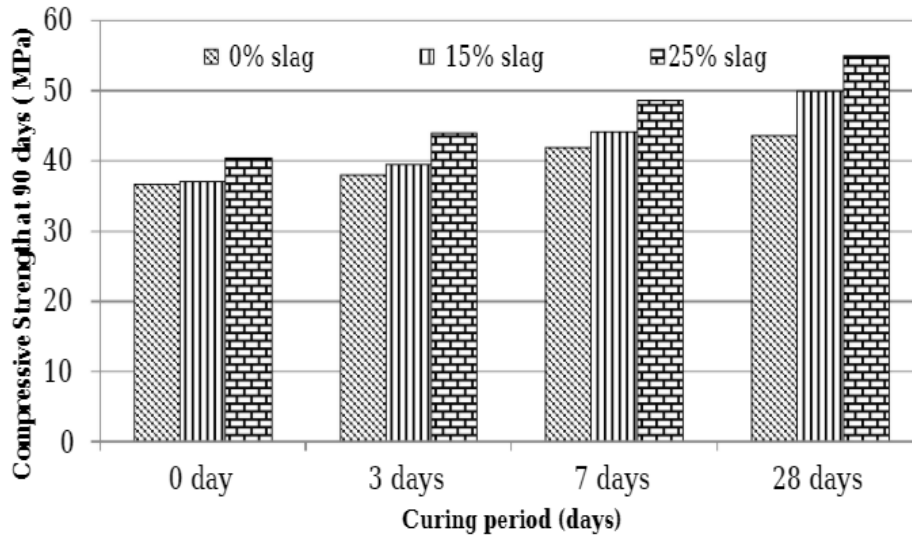
Σχήμα 5.3: Θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ με χρήση πυριτικής παιπάλης για αντικατάσταση τσιμέντου 550kg/m³ [a] και 450kg/m³ [b] [πηγή: Mohamed (2011)]

Οι Kenai et al. (2016) ερεύνησαν την επιρροή της σκωρίας, ως αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό 15 ή 25%, στη θλιπτική αντοχή δοκιμών ΑΣΣ κατά τη περίοδο συντήρησής τους (curing period) υπό διαφορετικές συνθήκες. Συγκεκριμένα παρατήρησαν ότι εφόσον η συντήρηση του ΑΣΣ γίνεται υπό συνθήκες χαμηλής υγρασίας (50-60%) και υψηλών θερμοκρασιών (35-40°C) τότε η θλιπτική του ΑΣΣ μειώνεται ανεξαρτήτως της αντικατάστασης του τσιμέντου με σκωρία. Ο λόγος οφείλεται στην ταχεία εξάτμιση του νερού και στην ελλιπή ενυδάτωση της σκωρίας με αποτέλεσμα την απουσία συνοχής της με την τσιμεντόπαστα.

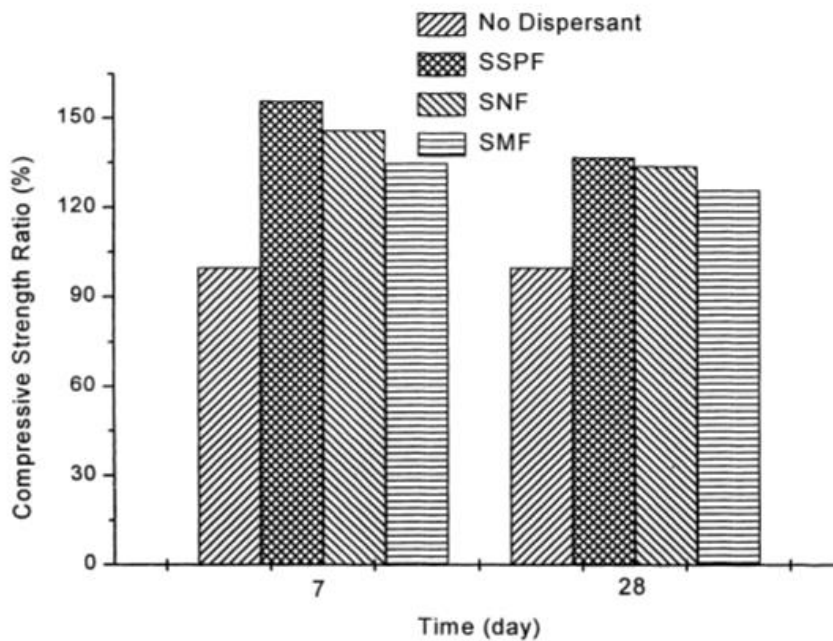
Αντιθέτως η συντήρηση των δοκιμών σε συνθήκες πλήρης υγρασίας και σε θερμοκρασία δωματίου ενισχύει τη θλιπτική τους αντοχή. Η μακροχρόνια συντήρηση του σκυροδέματος υπό τις παραπάνω συνθήκες επιδρά θετικά στην ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος [Zhao et al. (2012)]. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών ηλικίας 90 ημερών αναλόγως του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου με σκωρία και των ημερών συντήρησης σε συνθήκες πλήρης υγρασίας.

Σχετικά με την επίδραση των υπερρυστοποιητών στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής του ΑΣΣ ο Pei (2000) παρατήρησε ότι χρήση τους είναι ευεργετική. Έτσι αποδεικνύεται η συνεισφορά των υπερρυστοποιητών στις μηχανικές ιδιότητες του ΑΣΣ πέραν των ρεολογικών χαρακτηριστικών που του προσδίδουν. Η χρήση υπερρυστοποιητών, σύμφωνα με τις ποσότητες που προτείνουν οι

κανονισμοί, στο μίγμα ΑΣΣ οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής του αντοχής για τις πρώτες 7 και 28 μέρες σε ποσοστό περίπου 30 με 50% (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.4: Επίδραση ποσοστού σκωρίας και χρόνου συντήρησης στη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ [πηγή: Zhao et al. (2012)]



Σχήμα 5.5: Ποσοστιαία αύξηση θλιπτικής αντοχής με χρήση διαφόρων υπερρρευστοποιητών [πηγή: Pei (2000)]

Όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή του ΑΣΣ, αυτή συνδέεται με τη θλιπτική του αντοχή αλλά δεν απασχολεί σε μεγάλο βαθμό τους μελετητές. Αυτό συμβαίνει γιατί το σκυρόδεμα διαθέτει μικρή αντοχή στον εφελκυσμό και οι εφελκυστικές τάσεις παραλαμβάνονται κυρίως από τον χαλύβδινο οπλισμό. Η εφελκυστική αντοχή ισούται περίπου με 5% με 10% αντίστοιχα της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος αναλόγως της κατηγορίας του. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά μοντέλα μέσω των οποίων υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή με ακριβέστερο αυτό που προτείνει ο Αμερικάνικος Κανονισμός ACI 318/318R (2008). Σύμφωνα με την EFNARC το ΑΣΣ παρουσιάζει την ίδια αντοχή με το ΣΣ καθώς δεν υπάρχει σημαντική επίδραση της πάστας του στον εφελκυσμό.

Οι Roziere et al. (2005) συμπέραναν ότι η εφελκυστική αντοχή του ΑΣΣ είναι ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με το ΣΣ λόγω μεγαλύτερου όγκου πάστας. Αντιθέτως οι Parra et al. (2007) κατέληξαν στο ότι η χρήση πρόσθετων, όπως ιπτάμενη τέφρα και πυριτική παιπάλη, μειώνει την εφελκυστική αντοχή του ΑΣΣ σε σχέση με την αντίστοιχη του ΣΣ. Τα διαφορετικά συμπεράσματα μπορεί να οφείλονται σε διαφορετική δοσολογία υπερρευστοποιητών και πρόσθετων υλικών, κοινώς για διαφορετικό μίγμα ΑΣΣ. Δυστυχώς εξαιτίας της πολυπλοκότητας της δομής του ΑΣΣ αντίστοιχα συμβάντα μπορούν να συμβούν και σε άλλα πειράματα που μελετούν αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά του.

5.2 Αντοχή σε κάμψη

Οι πειραματικές διατάξεις που μελετούν τη κάμψη του ΑΣΣ είναι περιορισμένες. Σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό ACI 237R η καμπτική αντοχή του ΑΣΣ εξαρτάται από το λόγο w/c, το ποσοστό του μίγματος σε χονδρόκοκκα αδρανή και την ποιότητα σύνδεσης μεταξύ τσιμεντόπαστας και αδρανών. Ο ίδιος κανονισμός συστήνει η μέτρηση της καμπτικής αντοχής να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 78 ή C 293. Πάντως σε πειραματική μελέτη με ίδια αναλογία υλικών οι Sonebi και Bartos (2001) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η καμπτική αντοχή του ΑΣΣ είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη καμπτική αντοχή του ΣΣ. Επιπλέον οι Manju et al. (2017) εξέτασαν τη συμπεριφορά σε πείραμα κάμψης 4 σημείων σε δοκούς ΑΣΣ με διαφορετικές ποσοστιαίες αντικαταστάσεις του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα. Παρατήρησαν ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό 35% με ιπτάμενη τέφρα έχει μια μικρή θετική επίδραση στην καμπτική αντοχή του ΑΣΣ ίση με 6%.

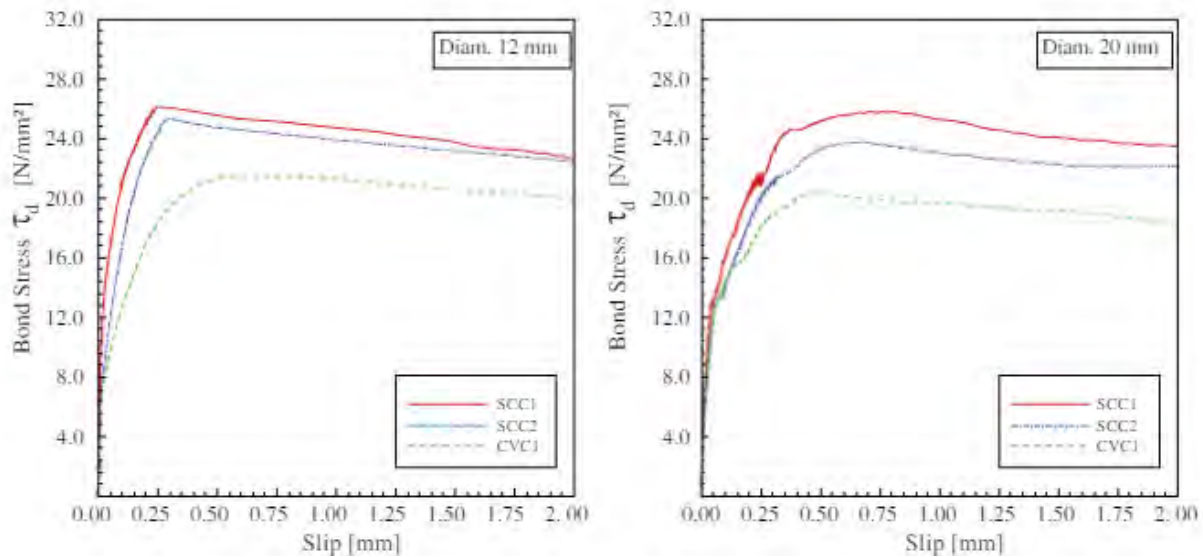
5.3 Συνάφεια με το χαλύβδινο οπλισμό

Οι ολοένα και αυστηρότερες απαιτήσεις των νέων κανονισμών, όπως ο EN 1992-1-1 (2004), σε πυκνότητα οπλισμών καθιστούν δύσκολη τη χρήση του ΣΣ. Ο κύριος λόγος που καθιστά το ΣΣ προβληματικό είναι η αδυναμία του να καλύψει επαρκώς τους οπλισμούς λόγω της χαμηλής ρευστότητας του δημιουργώντας κενά αέρα μέσα στη κατασκευή. Η δημιουργία τέτοιων κενών αέρα αντιμετωπίζεται συνήθως με τη χρήση δονητών, αλλά είναι πολύ δύσκολο να τοποθετηθούν καταλλήλως δονητές μέσα στο νωπό σκυρόδεμα ενός στοιχείου εξαιτίας της πυκνότητας των οπλισμών. Ως συνέπεια των παραπάνω η συνάφεια με τους οπλισμούς είναι κακή, η ποιότητα και η αντοχή του έργου μειώνονται.

Ο βασικός λόγος χρήσης του ΑΣΣ είναι να εγκιβωτίσει, μετά τη διάστρωσή του, τους χαλύβδινους οπλισμούς μιας κατασκευής αξιοποιώντας στο έπακρο τις ρεολογικές ιδιότητές του που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για να γίνει κατανοητή η υπεροχή του ΑΣΣ έναντι του ΣΣ ως προς τη συνάφεια με το χαλύβδινο οπλισμό θα παρουσιαστούν κανονισμοί και πειράματα που έχουν εξετάσει ορισμένους παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια όπως η σύνθεση του σκυροδέματος, η διάμετρος και θέση του οπλισμού.

Σχετικά με τη σύνθεση του σκυροδέματος και κατά πόσο επηρεάζει τη συνάφεια του με τους χαλύβδινους οπλισμούς υπάρχουν πολλές εργασίες, στις οποίες συμπεραίνεται η ξεκάθαρη υπεροχή του ΑΣΣ λόγω των καλύτερων ρεολογικών του χαρακτηριστικών, συγκεκριμένα της διελευσιμότητάς του και της αντίστασής του σε απόμιξη του μίγματος. Μερικά παραδείγματα τέτοιων εργασιών είναι των Chan et al. (2003), Castel et al. (2006), Valcuende et al. (2009), Sfikas and Trezos (2012). Ο Ponmalar (2018) επισημαίνει στην εργασία του, που δημοσιεύτηκε στο SSP-Journal of Civil Engineering, ότι το ΑΣΣ έχει καλύτερη αντοχή σε συνάφεια εξαιτίας της καλύτερης αντίστασης και ομοιογένειας του μίγματος του έναντι του ΣΣ.

Οι Taerwe et al. (2010) εξέτασαν έναν από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια, δηλαδή τη διάμετρο των ράβδων οπλισμού. Παρατηρήθηκε ότι για μεγάλες διαμέτρους ράβδων (20 mm) η συνάφεια με το σκυρόδεμα είναι ελαφρώς καλύτερη όταν χρησιμοποιούμε ΑΣΣ έναντι ΣΣ. Αντιθέτως για μικρότερες διαμέτρους ράβδων (12 mm) η συνάφεια με το ΑΣΣ είναι εμφανέστατα καλύτερη. Επίσης το πείραμα περιλάμβανε μελέτη της συνάφειας με το ΣΣ και το ΑΣΣ για διάμετρο ράβδων έως και 40 mm. Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων ακολουθεί παρακάτω.

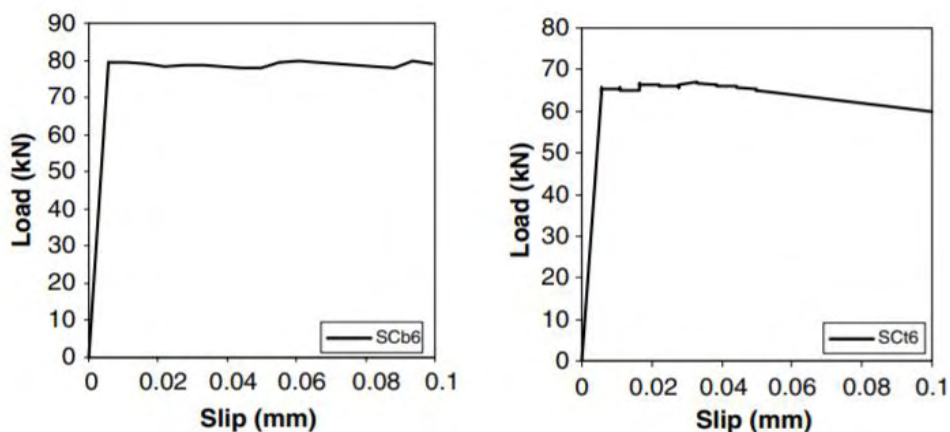


Σχήμα 5.6: Τάση-ολίσθηση ράβδων διαμέτρου 12mm (αριστερά) και 20mm (δεξιά) [πηγή: Taerwe et al. (2010)]

Σύμφωνα με το σχήμα 5.6 η τάση που απαιτείται για την ολίσθηση των ράβδων μέσα στα δοκίμια ΑΣΣ που αναπαρίστανται με μπλε και κόκκινη γραμμή είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη τάση που απαιτείται για ολίσθηση των ράβδων μέσα στο δοκίμιο ΣΣ που αναπαρίσταται με πράσινη γραμμή. Συνεπώς η συνάφεια στο ΑΣΣ είναι καλύτερη από ότι στο ΣΣ. Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη για την ολίσθηση των ράβδων μέσα στο σκυρόδεμα, συνεπώς η συνάφεια με το χαλύβδινο οπλισμό στο ΑΣΣ είναι καλύτερη από ότι στο ΣΣ. Τέλος ένα ακόμα συμπέρασμα των ερευνητών ήταν ότι για ίδιους λόγους w/c, το ΑΣΣ έχει υψηλότερη θλιπτική αντοχή και καλύτερη αντοχή σε συνάφεια σε σύγκριση με το ΣΣ.

Όσον αφορά τη θέση του οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα οι Esfahani et al. (2008) μελέτησαν τοπικά την αντοχή σε συνάφεια μεταξύ δοκιμίων ΑΣΣ και ΣΣ. Για την κατασκευή των ορθογωνίων δοκών που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν μίγματα σκυροδέματος με ίδιο λόγο w/c και σχεδιασμένη θλιπτική αντοχή ίση με 60MPa σε 28 ημέρες. Οι ερευνητές αφότου αφαίρεσαν με δοκιμές εξόλκευσης τις ράβδους που επίτηδες εξείχαν από το σκυρόδεμα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θέση των οπλισμών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή σε συνάφεια. Συγκεκριμένα η αντοχή σε συνάφεια του ΑΣΣ με τους άνω οπλισμούς υστερεί σε σχέση με την αντίστοιχη συνάφεια του ΑΣΣ με τους οπλισμούς που είναι τοποθετημένοι στη μέση και

στο κάτω μέρος των δοκών (σχήμα 5.7). Το φαινόμενο της μείωσης της αντοχής της συνάφειας στους άνω οπλισμούς σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό ACI 237R καλείται top-bar effect και παρατηρείται σε όλα τα σκυροδέματα. Ωστόσο ο καλός σχεδιασμός του ΑΣΣ οδηγεί στη μεγαλύτερη μείωση αυτού του φαινομένου σε σχέση με το ΣΣ.



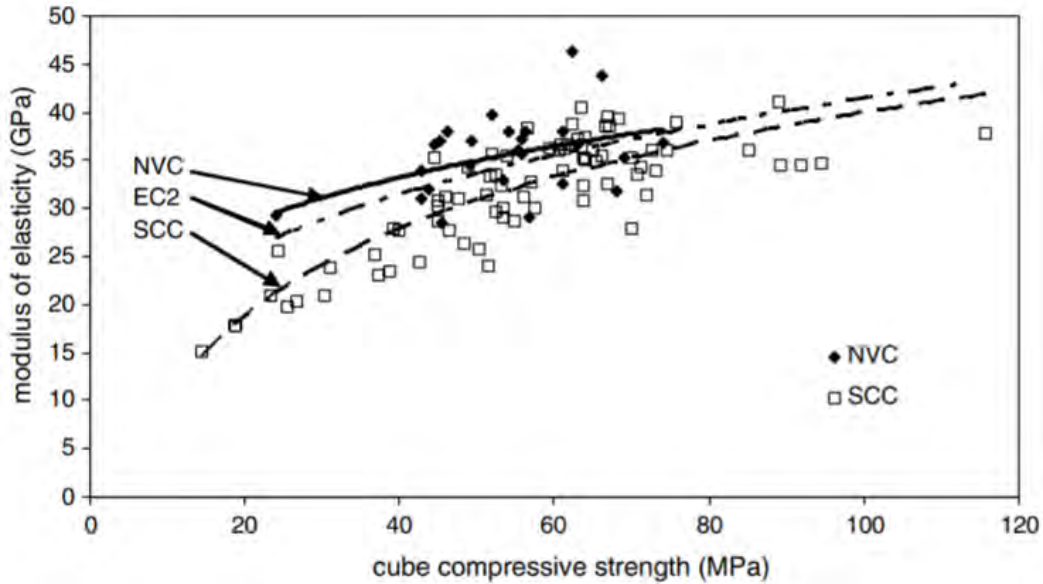
Σχήμα 5.7: Δύναμη ολίσθησης για κάτω ράβδο (αριστερά) και άνω ράβδο (δεξιά) στο ίδιο δοκίμιο ΑΣΣ [πηγή: Esfahani et al. (2008)]

5.4 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας εκφράζει την αντίσταση ενός υλικού σε ελαστική παραμόρφωση. Στο σκυροδέμα συνδέεται άμεσα με τη θλιπτική του αντοχή, την αναλογία των αδρανών και τον όγκο της τσιμεντόπαστας σύμφωνα με τους κανονισμούς ACI 318 και EN 1992. Θεωρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας του ΑΣΣ είναι ελαφρώς μικρότερο του ΣΣ. Ο λόγος είναι ότι το ΑΣΣ έχει μεγαλύτερο όγκο τσιμεντόπαστας, χρησιμοποιεί μικρότερη ποσότητα χονδρόκοκκων αδρανών και ο μέγιστος κόκκος αυτών των αδρανών είναι επίσης μικρότερος σε σχέση με το ΣΣ. Τα παραπάνω επιβεβαίωσαν στις εργασίες τους οι Klug et al. (2002) και Georgiadis et al. (2007) που συνέκριναν το μέτρο ελαστικότητας του ΑΣΣ και ΣΣ σε δοκίμια ίδιας θλιπτικής αντοχής.

Ο Domone (2007) παρατήρησε ότι η διαφορά μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ στο μέτρο ελαστικότητας αυξάνει μέχρι και 40% για χαμηλές θλιπτικές αντοχές. Αντιθέτως για υψηλής αντοχής σκυροδέματα η διαφορά του μέτρου ελαστικότητας πέφτει στο 5%. Η διασπορά στις τιμές του

μέτρου ελαστικότητας κρίνεται φυσιολογική εξαιτίας των διαφορετικών τύπων και αναλογιών αδρανών στα μίγματα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.8 η σχέση μεταξύ μέτρου ελαστικότητας και θλιπτικής αντοχής που προτείνει ο EN 1992, προσεγγίζεται καλύτερα από το ΣΣ (NVC).



Σχήμα 5.8: Μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με Θλιπτική Αντοχή [πηγή: Domone (2007)]

5.5 Συρρίκνωση και Ερπυσμός

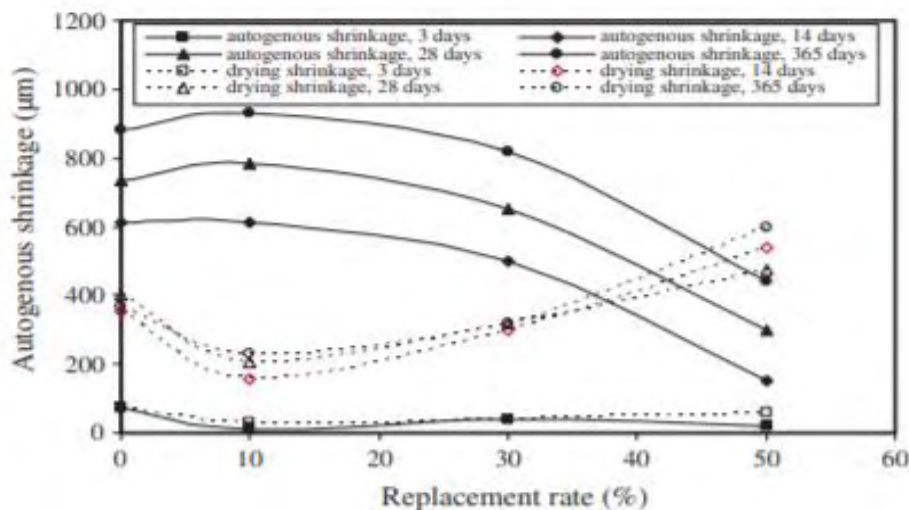
Το φαινόμενο της συρρίκνωσης στο σκυρόδεμα είναι το άθροισμα της αυτογενούς συρρίκνωσης και της συστολής ξήρανσης. Συμβαίνει κατά τη πρώιμη ηλικία του σκυροδέματος, όταν αυτό δεν έχει αναπτύξει ακόμα τις σκληρυμένες του αντοχές, και οφείλεται στην εξάτμιση του νερού της τσιμεντόπαστας. Η εξάτμιση του νερού αφήνει πίσω της πορώδη κενά που καθιστούν το σκυρόδεμα ευαίσθητο σε ρηγμάτωση, ειδικά σε περιοχές μεγάλης καταπόνησης όπως οι κόμβοι στα υποστυλώματα. Η συρρίκνωση είναι γενικά ανεπιθύμητη στο σκυρόδεμα γιατί πέραν της αντοχής του επηρεάζει αρνητικά και την ποιότητα ενός έργου.

Η αυτογενής συρρίκνωση συμβαίνει σε όλα τα σκυροδέματα, ειδικά σε αυτά με χαμηλό λόγο w/c όπως το ΑΣΣ, μετά τη διάστρωση τους λόγω της εξάτμισης του νερού. Η εξάτμιση αυτή προκαλεί τη μείωση του όγκου της τσιμεντόπαστας. Οι Jiang et al. (2014) μελέτησαν την επιρροή της ιπτάμενης τέφρας και της σκωρίας στην αυτογενή συρρίκνωση σκυροδεμάτων υψηλών αντοχών. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση ιπτάμενης τέφρας στο μίγμα μειώνει το βαθμό της

αυτογενούς συρρίκνωσης, ενώ η χρήση σκωρίας τον ενισχύει. Σε κάθε περίπτωση η αυτογενής συρρίκνωση μπορεί να αντιμετωπιστεί με σωστή συντήρηση του σκυροδέματος.

Στο σκυρόδεμα η συστολή ξήρανσης ξεκινά μετά την αυτογενή συρρίκνωση. Προκύπτει από την εξάτμιση νερού σε βάθος χρόνου που εμπεριέχει η τσιμεντόπαστα ή τα αδρανή με ταυτόχρονη εμφάνιση μικρορωγμών στην επιφάνεια του σκυροδέματος εξαιτίας αύξησης των εσωτερικών πιέσεων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.11 του προηγούμενου κεφαλαίου. Η εξάτμιση του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τη σχετική υγρασία. Το ΑΣΣ έχει μεγαλύτερο όγκο τσιμεντόπαστας άρα έχει και μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης από το ΣΣ.

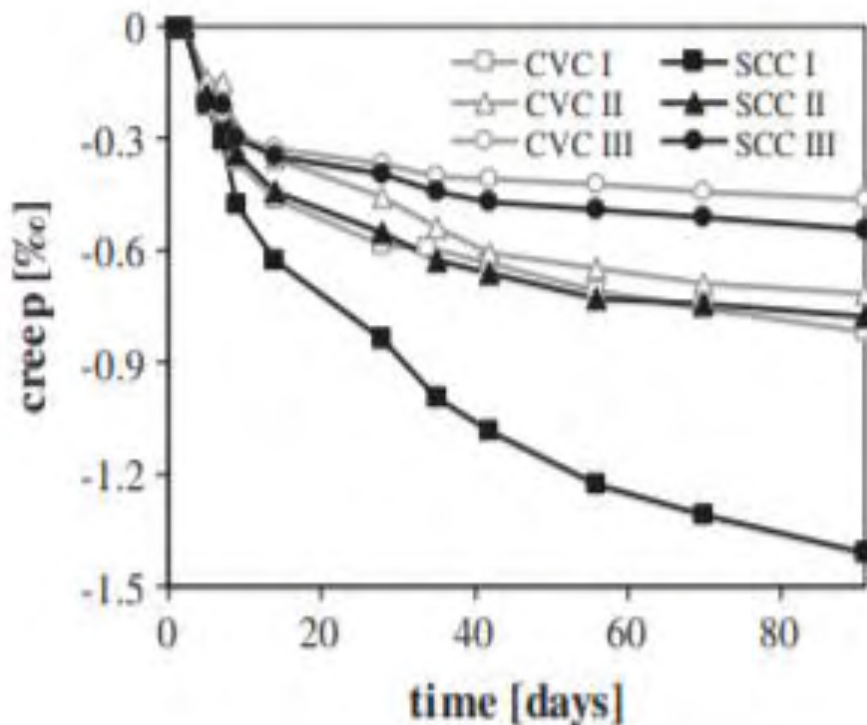
Οι İtim et al. (2011) μελέτησαν την επίδραση της σκωρίας στην αυτογενή συρρίκνωση και συστολή ξήρανσης σε δοκίμια ΣΣ. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του ποσοστού της σκωρίας έχει θετική επίδραση στη μείωση της αυτογενούς συρρίκνωσης των δοκιμίων που σε κάθε περίπτωση παραμένει μεγαλύτερη της συστολής ξήρανσης (εικόνα 5.9). Για τη συστολή ξήρανσης παρατήρησαν μείωση όταν η αντικατάσταση του ποσοστού τσιμέντου με σκωρία είναι 10%. Από το σχήμα 5.9 φαίνεται ότι η αυτογενής συρρίκνωση (συνεχόμενες γραμμές) είναι μεγαλύτερη της συστολής ξήρανσης (διακεκομμένες γραμμές) για ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με σκωρία μικρότερο από 30%, ενώ για μεγαλύτερο ποσοστό αντικατάστασης ισχύει το αντίθετο.



Σχήμα 5.9: Επίρροή της σκωρίας στην αυτογενή συρρίκνωση και συστολή ξήρανσης [πηγή: İtim et al. (2011)]

Ο ερπυσμός είναι η αύξηση της παραμόρφωσης ενός φορέα σε συνάρτηση με το χρόνο λόγω της μακροχρόνιας επίδρασης ενός φορτίου. Συνδέεται με τη συρρίκνωση και εξετάζεται μαζί της καθώς και τα δύο φαινόμενα εξαρτώνται από τις ίδιες παραμέτρους. Στο σκυρόδεμα η δυσκαμψία των αδρανών αντιστέκεται στον ερπυσμό. Συγκεκριμένα τα αδρανή του ΑΣΣ είναι λιγότερο δύσκαμπτα εξαιτίας μικρότερης διαμέτρου και μεγέθους από τα αδρανή του ΣΣ. Συνεπώς ο ερπυσμός στο ΑΣΣ είναι μεγαλύτερος σε σχέση με το ΣΣ [Naito et al. (2005)].

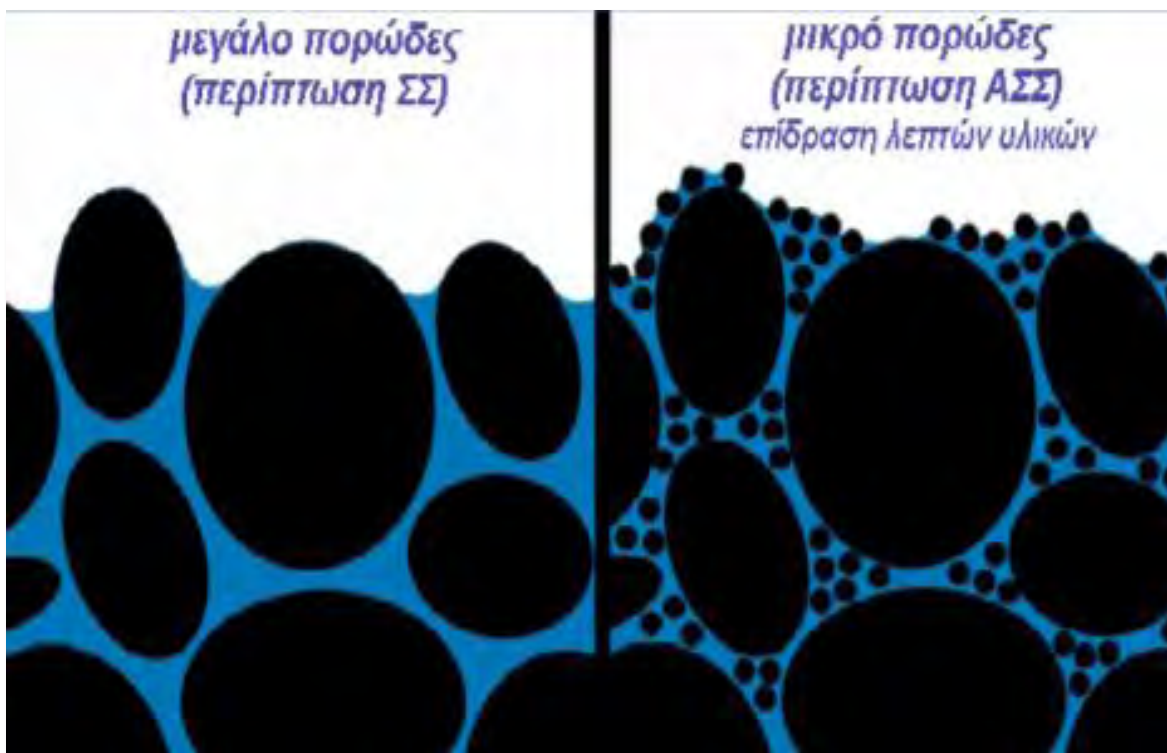
Οι Leemann et al. (2010) συνέκριναν τον ερπυσμό σε δοκιμια ΑΣΣ και ΣΣ με τον ίδιο λόγο w/c και επιβεβαίωσαν την ευαισθησία του ΑΣΣ σε ερπυσμό. Ωστόσο στο πείραμα τους η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων ΑΣΣ ήταν γενικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων ΣΣ, λόγω της χρήσης διαφορετικών αδρανών υλικών στο μίγμα. Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.10 ο ερπυσμός των δοκιμίων ΑΣΣ (μαύρες γραμμές) είναι μεγαλύτερος από τον ερπυσμό των δοκιμίων ΣΣ (λευκές γραμμές), ειδικά στην πρώτη ομάδα δοκιμίων.



Σχήμα 5.10: Ερπυσμός σε συνάρτηση με το χρόνο [πηγή: Leemann et al. (2010)]

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί η ανθεκτικότητα του ΑΣΣ σε διάφορους διαβρωτικούς παράγοντες. Ως ανθεκτικότητα ορίζεται η αντίσταση ενός υλικού στη μείωση της ποιότητας και της λειτουργικότητας του κάτω από επίδραση εξωτερικών παραγόντων. Το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανθεκτικότητα και έτσι προσδίδει μεγάλο χρόνο ζωής στις κατασκευές. Η υψηλή του ανθεκτικότητα οφείλεται κυρίως στη μικρή διαπερατότητα της εξωτερικής του επιφάνειας, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη σύσταση του σκυροδέματος, διαδικασία παραγωγής, διάστρωσης, συντήρησης και από το πορώδες.

Στο ΑΣΣ η χρήση των λεπτών πρόσθετων υλικών λειτουργεί ευεργετικά στη μείωση των κενών στο εσωτερικό του σε σχέση με το ΣΣ (εικόνα 5.1). Εκτός από το πορώδες το ΑΣΣ δεν χρειάζεται δόνηση που συνήθως προκαλεί ανομοιογένεια στη συμύκνωση και δυνατότητα εισροής μικροσωματιδίων, όπως μόρια νερού και χλωριόντα, μέσω μικρορωγμών στη τελική επιφάνεια. Συμπερασματικά το ΑΣΣ έχει την ίδια ή και υψηλότερη ανθεκτικότητα σε σχέση με το ΣΣ.



Εικόνα 5.1: Διαφορά στο πορώδες μεταξύ ΣΣ και ΑΣΣ [πηγή: Αναγνωστόπουλος (2009)]

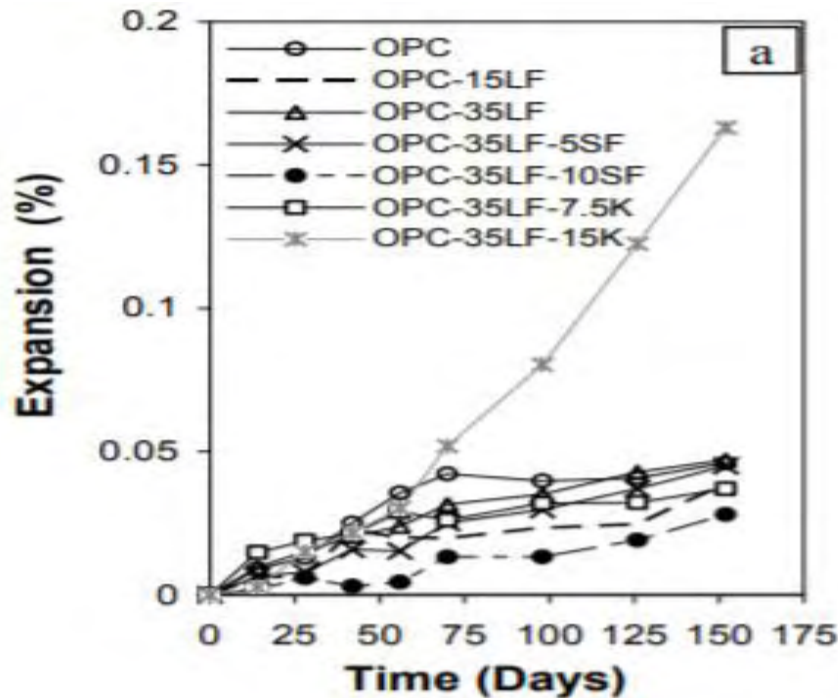
5.6 Ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης-απόψυξης

Σύμφωνα με τη Τεχνική Οδηγία 5 (2014) το ΑΣΣ έχει ικανοποιητική αντίσταση σε κύκλους ψύξης-απόψυξης λόγω των αδρανών του και του συστήματος εξαερισμού του. Πειραματικά την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ σε κύκλους ψύξης-απόψυξης μελέτησαν οι Sonebi και Bassuoni (2010). Βασίστηκαν στην υπόθεση ότι η αύξηση του ρυθμού των κύκλων ψύξης-απόψυξης σε μικρό διάστημα μπορεί να αντικατοπτρίσει επαρκώς την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ σε πραγματικές συνθήκες έκθεσης στο περιβάλλον.

Η διαδικασία του πειράματος άρχισε με τη κατασκευή κυβικών δοκιμίων και πρισμάτων ΑΣΣ που περιείχαν ίδιο λόγο w/c, αλλά διαφορετικές ποσότητες λεπτών πρόσθετων, μεταξύ των οποίων πυριτική παιπάλη, ασβεστολιθική παιπάλη και μετακαολίνη. Μετά τη παραγωγή τους όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν σύμφωνα με τους κανονισμούς για 28 ημέρες σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια με βάση τον Αμερικάνικο Κανονισμό ASTM C666, που περιγράφει αναλυτικά τους ελέγχους για ψύξη-απόψυξη του σκυροδέματος, τα δοκίμια εισήλθαν σε ειδικό θάλαμο για 270 κύκλους ψύξης-απόψυξης. Ο συνολικός χρόνος παραμονής των δοκιμίων στον ειδικό θάλαμο ήταν 5 μήνες.

Μετά την έλευση των 5 μηνών τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από το θάλαμο ψύξης-απόψυξης για οπτική παρατήρηση και μέτρηση των διαστάσεων τους. Σύμφωνα με την οπτική παρατήρηση δεν υπήρχε σημαντική επιδείνωση της ποιότητας ούτε σημαντική διαστολή των δοκιμίων ΑΣΣ, εκτός από εκείνα στα οποία έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου κατά 50%. Η συγκεκριμένη αντικατάσταση του τσιμέντου έγινε κατά 35% με ασβεστολιθική παιπάλη και κατά 15% με μετακαολίνη (σχήμα 5.11). Για τα συγκεκριμένα δοκίμια παρατηρήθηκε εμφάνιση ρωγμών στις γωνίες τους.

Στα υπόλοιπα δοκίμια όπου η αντικατάσταση του τσιμέντου δεν ξεπέρασε το 45% η διαστολή ήταν ελαφρά μεγαλύτερη συγκριτικά με το δοκίμιο σύγκρισης στο οποίο δεν χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα υλικά. Το ΑΣΣ γενικά είχε εξαιρετική ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης-απόψυξης και η διαστολή των δοκιμίων δεν ξεπέρασε το 0,05% του αρχικού τους μεγέθους. Για δοκίμια ανάλογου μεγέθους οι ερευνητές θεώρησαν ότι διαστολή άνω του 0.1% θα οδηγούσε σε πτώση 25% της θλιπτικής αντοχής του υλικού.



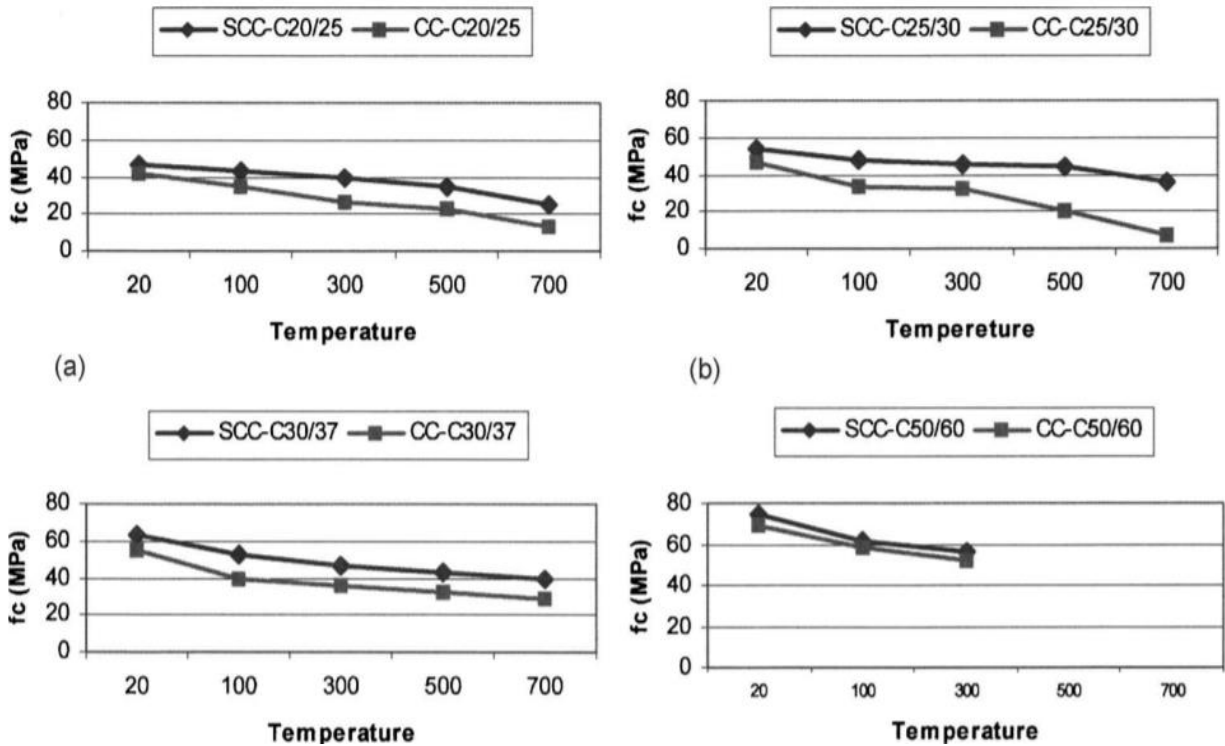
Σχήμα 5.11: Διαστολή δοκιμίων ΑΣΣ [πηγή: Sonebi and Bassuoni (2010)]

5.7 Ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών πειραμάτων. Σύμφωνα με τους European Guidelines for SCC (2005) το σκυρόδεμα είναι άφλεκτο δομικό υλικό, δεν εκλύει τοξικά αέρια κατά την έκθεση του σε υψηλές θερμοκρασίες και προστατεύει για μεγάλο διάστημα το χαλύβδινο οπλισμό στο εσωτερικό του. Η σύγκριση της ανθεκτικότητας του ΑΣΣ και του ΣΣ σε υψηλές θερμοκρασίες έχει δώσει αμφιλεγόμενα αποτελέσματα στο παρελθόν [Persson (2004), Stegmaier (2006)] γιατί τα δοκίμια του ΑΣΣ που χρησιμοποιήθηκαν δεν είχαν κατασκευαστεί με ίδιους λόγους w/c με το ΣΣ και επομένως δεν υπήρχε σωστή βάση σύγκρισης.

Αντίθετα πορεύτηκε ο Σίδερης (2007) στην εργασία του, η οποία αφορά σύγκριση κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων ΑΣΣ και ΣΣ με διαφορετικές κατηγορίες θλιπτικής αντοχής και με όμοιους λόγους w/c. Μετά τη σκυροδέτηση και συντήρηση για 120 ημέρες τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ειδικό θάλαμο που ανέβαζε τη θερμοκρασία του αέρα κατά 5 °C/min μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό όριο των 100, 300, 500 και 700 °C αντίστοιχα. Στη συνέχεια τα δοκίμια αφήνονταν να

κρυώσουν μέχρι να φτάσουν σε θερμοκρασία δωματίου. Έπειτα πραγματοποιήθηκε δομική θλίψη για τα κυβικά δοκίμια τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω (σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.12: Θλιπτική αντοχή ΑΣΣ και ΣΣ σε υψηλές θερμοκρασίες [πηγή: Σίδερης (2007)]

Σε όλες τις κατηγορίες θλιπτικής αντοχής τα δοκίμια ΑΣΣ είχαν υψηλότερες τιμές έναντι των αντίστοιχων δοκιμών ΣΣ. Στα δοκίμια κατηγορίας C20/25 και C25/30 η πτώση της θλιπτικής αντοχής του ΣΣ και του ΑΣΣ είναι γραμμική μέχρι τους 700 °C. Στα περισσότερα δοκίμια κατηγορίας C30/37 και σε όλα τα δοκίμια κατηγορίας C50/60 παρατηρήθηκε αστοχία λόγω επιφανειακού θρυμματισμού (spalling) του σκυροδέματος μετά τους 300 °C, ωστόσο μέχρι και εκείνο το σημείο η πτώση της θλιπτικής αντοχής ήταν γραμμική. Το θρυμματίσμα της εξωτερικής επιφάνειας προήλθε από αυξημένη πίεση των πόρων στο εσωτερικό του σκυροδέματος εξαιτίας της εξάτμισης του υπάρχοντος νερού. Ειδικότερα το ΑΣΣ είναι πιο ψαθυρό από το ΣΣ σε θρυμματισμό γιατί το μικρό πορώδες που το χαρακτηρίζει δεν επιτρέπει την εκτόνωση της πίεσης που δημιουργείται στο εσωτερικό του.

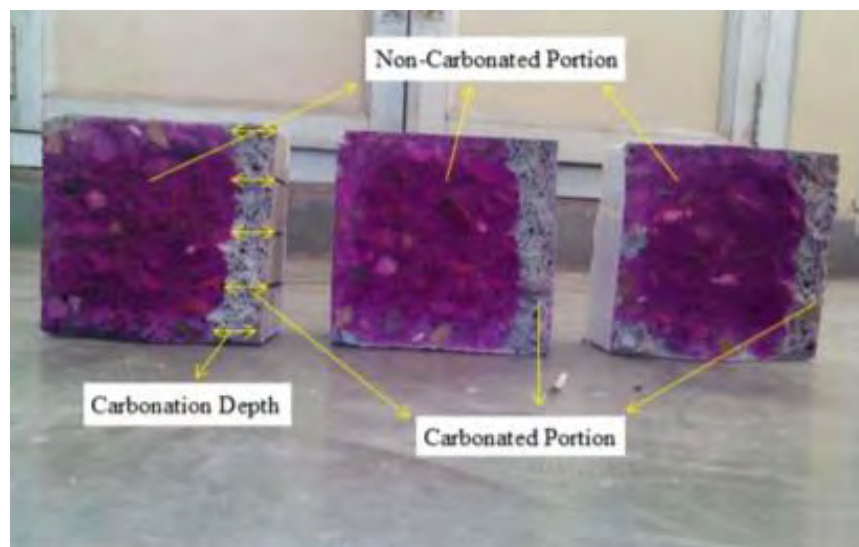
5.8 Ανθεκτικότητα σε ενανθράκωση και χλωριόντα

Η ενανθράκωση είναι μια χημική αντίδραση που συμβαίνει καθόλη τη διάρκεια της ζωής του σκυροδέματος. Οφείλεται στη μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που αποτελεί χημικό συστατικό του σκυροδέματος σε ανθρακικό ασβέστιο CaCO_3 με ταυτόχρονη δημιουργία H_2O , χάρη στο διοξείδιο του άνθρακα CO_2 που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα. Έτσι η αλκαλικότητα του νερού του σκυροδέματος μειώνεται με το χρόνο από $\text{pH}=12$ σε τιμές $\text{pH}<9$ σε βάθος χρόνου. Η αλλαγή στο pH δεν επηρεάζει αρνητικά το ίδιο το σκυρόδεμα μιας και η μετατροπή του υδροξειδίου σε ανθρακικό ασβέστιο αυξάνει τη θλιπτική του αντοχή. Όμως υπάρχει πρόβλημα με τους χαλύβδινους οπλισμούς του σκυροδέματος οι οποίοι κινδυνεύουν με διάβρωση λόγω της επαφής τους με το νερό και το οξυγόνο. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος ενανθράκωσης μέσα στο σκυρόδεμα τόσο πιθανότερη είναι η διάβρωση των οπλισμών από τους παραπάνω παράγοντες. Για αυτό και στο σκυρόδεμα είναι επιθυμητό το μεγάλο πάχος επικάλυψης των οπλισμών ώστε η καλή ανθεκτικότητα που προσφέρουν τα ΣΣ και τα ΑΣΣ σε ενανθράκωση να αξιοποιείται.

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε ενανθράκωση, ο ρυθμός της οποίας εξαρτάται από την υγρασία, τη θερμοκρασία, τη θέση και το λόγο w/c που το χαρακτηρίζει. Ειδικά για τη γεωγραφική θέση επισημαίνεται ότι το σκυρόδεμα στις πόλεις έρχεται σε επαφή με μεγαλύτερες ποσότητες CO_2 που εκλύονται από τη χρήση των αυτοκινήτων. Σύμφωνα με τους Shi et al. (2009) η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας ως αντικατάσταση τσιμέντου σε ποσοστό 30% μειώνει το βάθος ενανθράκωσης του σκυροδέματος. Από την άλλη οι Waller et al. (2007) συνέκριναν την ανθεκτικότητα σε επιταχυνόμενο ρυθμό ενανθράκωσης του ΑΣΣ και του ΣΣ. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενανθράκωση των σκυροδεμάτων ήταν ίδια, αν και το βάθος της στο ΑΣΣ ήταν μεγαλύτερο στις περιπτώσεις όπου προστέθηκε πυριτική παιπάλη στο μίγμα.

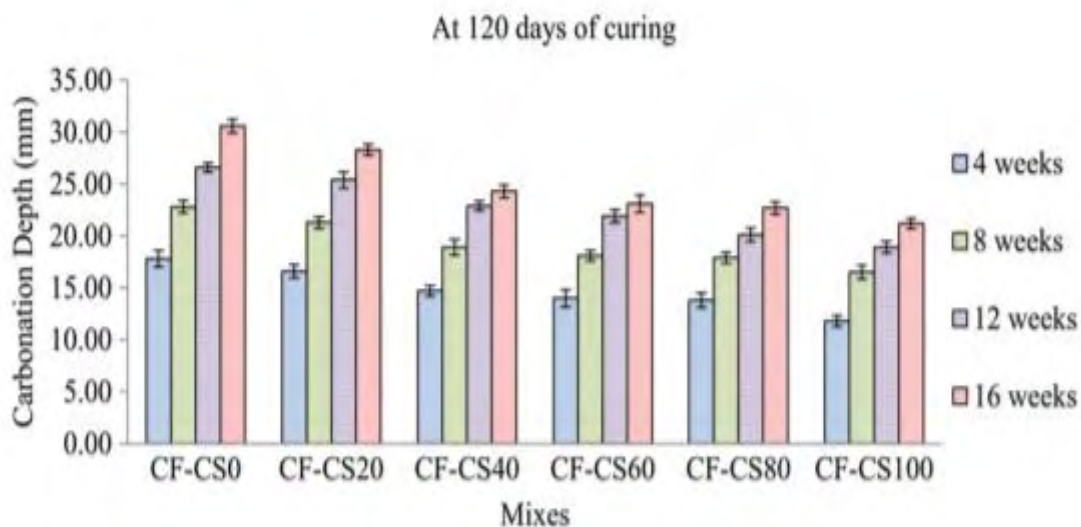
Πρόσφατα οι Sharma και Khan (2020) μελέτησαν την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ σε ενανθράκωση χρησιμοποιώντας ίδια ποσότητα ιπτάμενης τέφρας και διαφορετικές ποσότητες σκωρίας χαλκού (copper slag) ως αντικατάστατα του τσιμέντου. Τα δοκίμια ΑΣΣ, μετά τη κατασκευή και συντήρηση για 28 και 120 ημέρες, τοποθετήθηκαν σε ειδικό θάλαμο που περιείχε αέρα με ποσοστό 4% CO_2 για την επίτευξη επιταχυνόμενης ενανθράκωσης. Η διάρκεια της παραμονής των δοκιμίων μέσα στο θάλαμο ήταν από 4 μέχρι και 16 εβδομάδες. Για την οπτική παρατήρηση του

βάθους ενανθράκωσης (εικόνα 5.2) χρησιμοποιήθηκε φαινολοφθαλεΐνη. Αυτή η ουσία χρωμάτισε με μωβ χρώμα το τμήμα του σκυροδέματος στο οποίο δεν είχε προχωρήσει ακόμα η ενανθράκωση.



Εικόνα 5.2: Βάθος ενανθράκωσης με χρήση φαινολοφθαλεΐνης [πηγή: Sharma and Khan (2020)]

Παρατήρησαν ότι η ποσοστιαία αντικατάσταση του τσιμέντου με σκωρία χαλκού μειώνει γραμμικά το βάθος ενανθράκωσης και άρα αυξάνει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ανεξαρτήτως της περιόδου παραμονής των δοκιμίων μέσα στον ειδικό θάλαμο (σχήμα 5.13). Επίσης τα δοκίμια με μεγαλύτερο διάστημα συντήρησης (120 ημέρες) είχαν μικρότερα βάθη ενανθράκωσης λόγω καλύτερης συνοχής του σκληρυμένου ΑΣΣ από τα δοκίμια με μικρότερο διάστημα συντήρησης (28 ημέρες).



Σχήμα 5.13: Βάθος ενανθράκωσης σε δοκίμια ΑΣΣ [πηγή: Sharma and Khan (2020)]

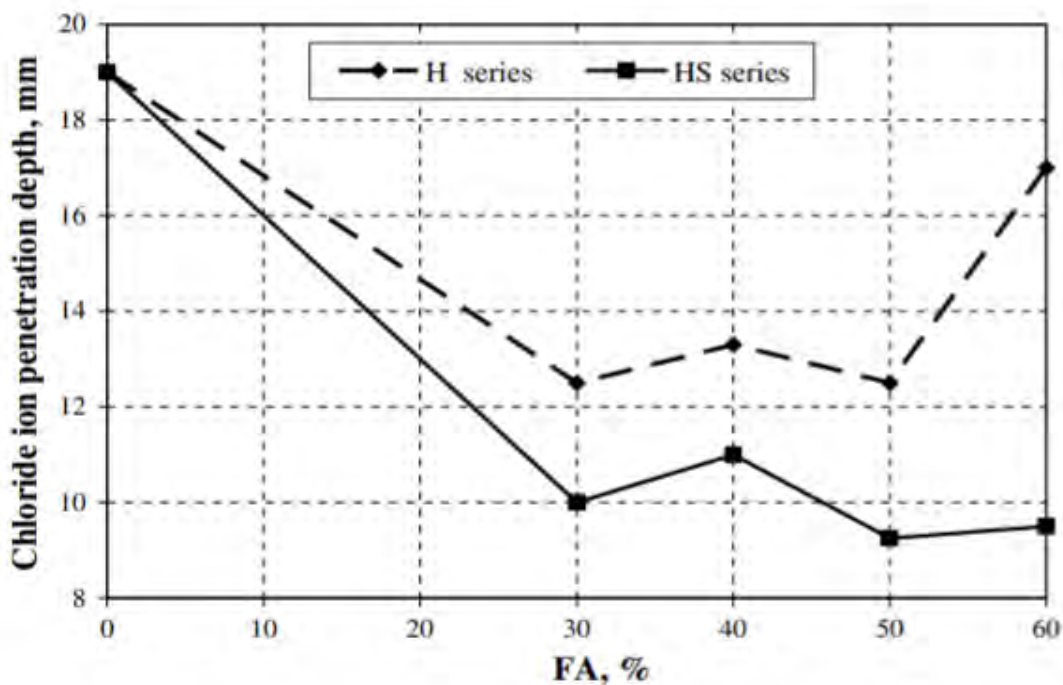
Ανάλογες ουσίες που μπορούν να διαβρώσουν το χαλύβδινο οπλισμό του σκυροδέματος είναι τα χλωριόντα. Όπως η ανθεκτικότητα σε ενανθράκωση έτσι και η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα εξαρτάται από το τύπο τσιμέντου, το λόγο w/c, τα αδρανή και τη χρήση πρόσθετων υλικών.

Σύμφωνα με τους Taylor et al. (1999) το τσιμέντο Portland και τα πρόσθετα υλικά έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν ένα μέρος των ιόντων χλωριδίου ενός έντονα διαβρωτικού περιβάλλοντος, όπως οι παραθαλάσσιες περιοχές. Όμως τα ιόντα που δεν δεσμεύονται είναι ελεύθερα να διαβρώσουν το χαλύβδινο οπλισμό αν διεισδύσουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Ο κανονισμός ACI 318 έχει ορίσει τη μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στη διείσδυση των χλωριόντων ασφαλίζει τον οπλισμό και κατά συνέπεια τη ποιότητα και τον αυξημένο χρόνο ζωής ενός έργου. Επίσης η χρόνια προστασία του οπλισμού μειώνει σε μεγάλο βαθμό τις δαπάνες συντήρησής του, οι οποίες περιορίζονται μόνο στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος. Συνεπώς η μελέτη αυτής της ανθεκτικότητας παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, αν και οι βιβλιογραφικές μελέτες για το ΑΣΣ είναι λίγες.

Οι περισσότερες μελέτες μέχρι σήμερα ασχολήθηκαν με τη τροποποίηση του μίγματος του ΑΣΣ για καλύτερη ανθεκτικότητα στη διείσδυση των χλωριόντων και όχι με την απευθείας σύγκριση με την αντίστοιχη ανθεκτικότητα του ΣΣ.

Οι Nehdi et al (2004) αξιολόγησαν την ανθεκτικότητα μιγμάτων σκληρυμένου ΑΣΣ στα οποία αντικατέστησαν μέρος του τσιμέντου με διαφορετικούς συνδυασμούς πρόσθετων υλικών, όπως η σκωρία, η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη. Παρατήρησαν ραγδαία μείωση της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου στα δοκίμια όπου η αντικατάσταση της ποσότητας του τσιμέντου έφτανε το 50%.

Ο Yazici (2008) χρησιμοποίησε διαφορετικά ποσοστά ιπτάμενης τέφρας και πυριτικής παιπάλης για αντικατάσταση του τσιμέντου εξετάζοντας σε όλες τις περιπτώσεις την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ στα ιόντα χλωρίου. Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.14 η διείσδυση των ιόντων ελαχιστοποιείται όταν η χρήση ιπτάμενης τέφρας στο τελικό μίγμα αγγίζει το 50%. Επιπλέον στα δοκίμια (HS series) που χρησιμοποιήθηκε σαν πρόσθετο υλικό μια συγκεκριμένη ποσότητα πυριτικής παιπάλης το βάθος διείσδυσης ήταν ακόμα μικρότερο, ανεξαρτήτως του ποσοστού της ιπτάμενης τέφρας.



Σχήμα 5.14: Επίδραση ιπτάμενης τέφρας στο βάθος διείσδυσης χλωριόντων [πηγή: Yazici (2008)]

Τέλος οι Kannan et al. (2014) μελέτησαν τη χρήση πρόσθετων υλικών, συγκεκριμένα της μετακαολίνης και της τέφρας φλοιού ρυζιού, στο ΑΣΣ. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η

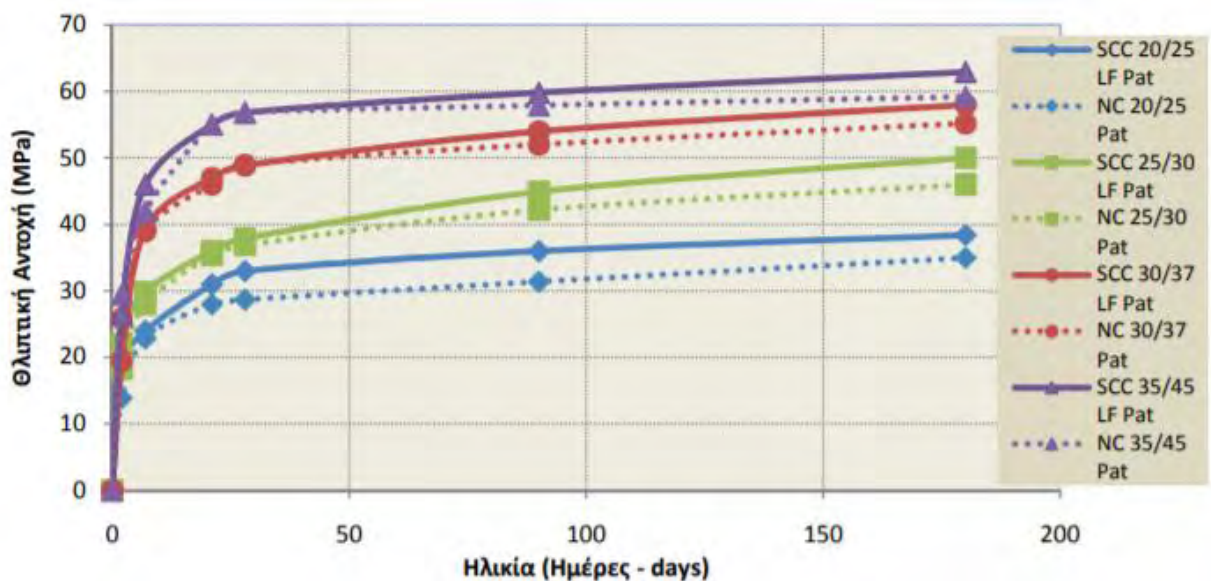
αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό 40% με μίξη αυτών των δύο πρόσθετων υλικών έχει σημαντική επίδραση στη μείωση της διείσδυσης των ιόντων χλωριδίου στο εσωτερικό του ΑΣΣ.

5.9 Συμπεράσματα σκληρυμένου ΑΣΣ

Ανακεφαλαιώνοντας το ΑΣΣ έχει υψηλότερη θλιπτική αντοχή και καλύτερη ανθεκτικότητα σε βάθος χρόνου από το ΣΣ, όταν παράγεται από τσιμέντο ίδιας κατηγορίας και για ίδιο λόγο w/c. Το ΑΣΣ βασίζεται σε διαφορετικές αναλογίες λεπτόκοκκων υλικών (αδρανή/πρόσθετα) και πρόσμικτων που δημιουργούν μια πυκνότερη δομή με συνοχή και με μικρότερο πορώδες. Ωστόσο απαιτείται προσεκτική επιλογή αυτών των υλικών για τη σύνθεση του μίγματος γιατί το καθένα επηρεάζει διαφορετικά τα χαρακτηριστικά του σκληρυμένου ΑΣΣ σύμφωνα με τα παραπάνω πειράματα. Ταυτόχρονα αυτά τα υλικά επηρεάζουν το κόστος που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή και χρήση του ΑΣΣ από τον κατασκευαστή.

6. Παραγωγή και κόστος του ΑΣΣ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν στοιχεία για το νωπό και για το σκληρυμένο ΑΣΣ. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται λόγος για την παραγωγή και το κόστος του, κυρίως στον Ελλαδικό χώρο. Ο Σίδερης (2008) αναφέρει σε ανακοίνωσή του, κατά τη διάρκεια ημερίδας που διοργανώθηκε από το ΤΕΕ, ότι το ΑΣΣ που κατασκευάζεται από ελληνικά προϊόντα είναι μηχανικά ισοδύναμο ή καλύτερο από το ΣΣ. Ανέφερε επίσης μερικά άλλα πλεονεκτήματα της χρήσης του ΑΣΣ σε ένα έργο, όπως η ταχύτητα σκυροδέτησης, η απουσία δόνησης και η καλύτερη τελική ποιότητα. Σε συνέχεια των παραπάνω ο Αναγνωστόπουλος (2009) επιβεβαίωσε αυξημένη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ ηλικίας 180 ημερών χρησιμοποιώντας υλικά από την περιοχή της Πάτρας (σχήμα 6.1)



Σχήμα 6.1: Σύγκριση θλιπτικής αντοχής ΑΣΣ και ΣΣ με ελληνικά προϊόντα [πηγή: Αναγνωστόπουλος (2009)]

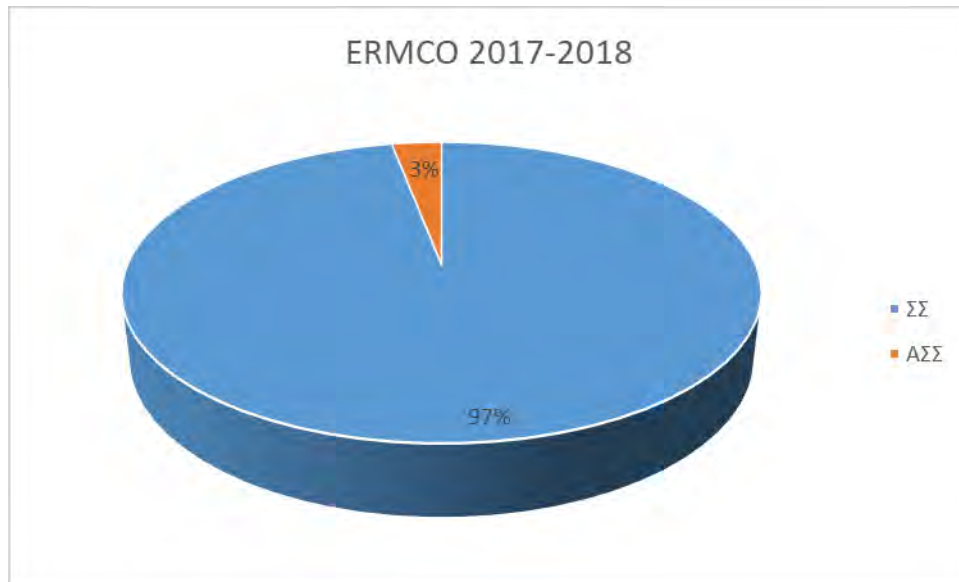
Στη συνέχεια μέσα από επακόλουθη εργασία του ο Σίδερης συμπέρανε ότι το κόστος παραγωγής του ΑΣΣ είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος του ΣΣ [Σίδερης (2009)]. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν οι Αναγνωστόπουλος (2009), Γεωργιάδης (2010) και Καφφετζάκης (2014), παρόλο που ο τελευταίος μελέτησε το Αυτοσυμπυκνούμενο Κιτσηρόδεμα (ΑΣΚ). Οι λόγοι για το υψηλό κόστος του ΑΣΣ στην Ελλάδα είναι μεταξύ άλλων η χαμηλή παραγωγή, τα υλικά σύνθεσης, οι εντατικοί έλεγχοι και τα καλούπια που χρησιμοποιούνται.

6.1 Παραγωγή στον Ευρωπαϊκό και Ελληνικό Χώρο

Καθώς δεν υπάρχει συγκεκριμένο μοντέλο παραγωγής οι μεγαλύτερες παγκοσμίως τιμεντοβιομηχανίες παράγουν η κάθε μία το δικό της μίγμα έτοιμου ΑΣΣ, το οποίο στη συνέχεια και πουλιέται και χρησιμοποιείται στην Ευρώπη. Μερικά παραδείγματα από τις πιο γνωστούς παραγωγούς ΑΣΣ είναι η BASF (Master Builders Solution), η SIKA AG (Sika ViscoFlow), η Cemex (Evolution) και η Breedon Group (BreedonFlow). Σύμφωνα με στοιχεία από την ERMCO (European Ready Mixed Concrete Organization) η παραγωγή του ΑΣΣ (κατηγορία F6) αγγίζει σημαντικά ποσοστά σε χώρες όπως η Δανία, το Ισραήλ και η Ολλανδία (σχήμα 6.2). Το ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό παραγωγής στη Δανία οφείλεται στη παραγωγή μιγμάτων ΑΣΣ που μοιάζουν αρκετά με το ΣΣ εξαιτίας της χαμηλής τους εξάπλωσης και χρήσης σε προκατασκευασμένα στοιχεία [Sfikas (2017)]. Συνοπτικά καλύτερη σύγκριση της παραγωγής του ΑΣΣ σε σχέση με τη συνολική παραγωγή ΣΣ κατά τα χρόνια 2017-2018 γίνεται στο σχήμα 6.3, σύμφωνα με το οποίο το ποσοστό παραγωγής του ΑΣΣ είναι 3%.

Country	% Production by consistence class							
	S1 (F1)		S2 - S3 (F2 - F3)		S4 - S5 (F4 - F5)		SCC (F6)	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
AT-Austria	5,7	6,3	60,4	56,3	31,6	35,5	2,3	1,9
BE-Belgium	8,0	7,0	34,0	30,0	55,0	60,0	3,0	3,0
CY-Cyprus	-	-	-	-	-	-	-	-
CZ-Czech Republic	19,0	22,0	57,0	45,0	21,0	28,0	3,0	5,0
DK-Denmark	5,0	5,0	45,0	45,0	20,0	20,0	30,0	30,0
FI-Finland	2,0	2,0	55,0	60,0	41,0	36,0	2,0	2,0
FR-France	7,0	6,0	65,0	70,0	23,0	20,0	5,0	4,0
DE-Germany	8,8	9,9	72,8	71,4	16,2	16,5	2,2	2,2
IE-Ireland	18,0	18,0	70,0	70,0	11,0	11,0	1,0	1,0
IT-Italy	0,0	0,0	7,0	7,0	92,0	92,0	1,0	1,0
NL-Netherlands	1,0	1,0	43,0	39,0	50,0	54,0	6,0	6,0
PL-Poland	5,0	7,6	72,0	75,3	22,0	16,1	1,0	1,0
PT-Portugal	0,0	0,2	88,0	86,3	12,0	12,5	0,0	0,2
SK-Slovakia	10,0	10,0	36,0	46,0	54,0	44,0	1,0	0,0
ES-Spain	2,0	-	5,0	-	92,0	-	1,0	-
SE-Sweden	-	-	-	-	-	-	-	-
UK-United Kingdom	8,0	8,0	70,0	70,0	20,0	20,0	2,0	2,0
Average EU	6,2	6,3	52,1	51,8	37,2	28,8	2,7	2,4
IL-Israel	0,0	0,0	0,0	0,0	90,0	90,0	10,0	10,0
NO-Norway	1,0	1,0	1,0	1,0	93,0	93,0	5,0	5,0
CH-Switzerland	-	-	-	-	-	-	-	-
TR-Turkey	1,0	1,0	43,0	41,0	54,0	56,0	2,0	2,0
Average ERMCO	4,4	4,8	48,6	48,2	43,2	37,2	2,5	2,3
RU-Russia	3,0	3,0	10,0	10,0	85,0	85,0	2,0	2,0
USA-United States	-	-	-	-	-	-	-	-
SA-South America	-	-	-	-	-	-	-	-
JP-Japan	0,0	0,0	40,6	23,7	57,4	73,6	2,0	2,7

Σχήμα 6.2: Κατανομή παραγωγής σκυροδεμάτων ανά χώρα [πηγή: ERMCO]

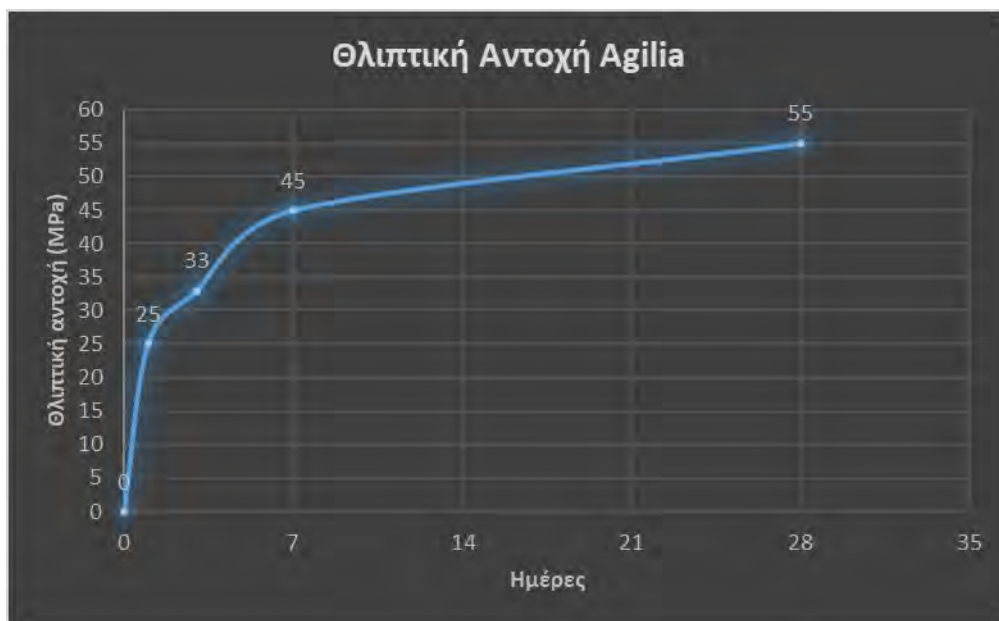


Σχήμα 6.3: Ποσοστό παραγωγής ΑΣΣ κατά τη περίοδο 2017-2018 στην Ευρώπη [πηγή: ERMCO με ίδια τροποποίηση]

Στην Ελλάδα αντίστοιχα η παραγωγή και χρήση του ΑΣΣ είναι αρκετά περιορισμένη. Μέχρι σήμερα ΑΣΣ παράγουν οι εταιρείες ET Beton (Χάλυψ Δομικά Υλικά), Inter Beton (όμιλος TITAN) και Lafarge Beton (όμιλος ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ-Lafarge). Συγκεκριμένα η παραγωγή του ΑΣΣ με εμπορική ονομασία Agilia από τη Lafarge Beton ξεκίνησε το 2008 και τη τελευταία δεκαετία δεν ξεπέρασε τα 1400 m³ ή λιγότερο από το 1% της συνολικής παραγωγής σκυροδέματος και δεν έχει παρατηρηθεί αυξητική τάση τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με τη Lafarge το Agilia κατηγορίας C30/37 έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μέγιστος κόκκος αδρανών 16mm και ελάχιστη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αδρανή 500kg/m³
- Λόγος w/c=0,5
- Περιεκτικότητα σε χλωριόντα 0,10%
- Καλύπτει τις προδιαγραφές για προεντεταμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ 2016)
- Δοκιμή κώνου εξάπλωσης 670-700mm κατηγορία Slump Flow 2 διατήρηση για 2 ώρες
- Δοκιμή V-χοάνης διάρκεια 6 με 12 δευτερόλεπτα, ιξώδες κατηγορίας VS2/VF2
- Δοκιμή δοχείου L>85% Passing ability 2 με 3 ράβδους σπλισμού

Επιπροσθέτως η ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής του Agilia C30/37 φαίνεται στο σχήμα 6.4 για τις πρώτες 28 ημέρες.



Σχήμα 6.4: Agilia C30/37 [πηγή: Lafarge με ίδια τροποποίηση]

6.2 Κόστος ΑΣΣ

Σύμφωνα με την εισαγωγή του κεφαλαίου και τις αναφορές από τους ερευνητές το ΑΣΣ είναι πιο ακριβό από το ΣΣ. Ωστόσο είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί η ποσοστιαία διαφορά του κόστους τους μιας και ο τρόπος παραγωγής του ΑΣΣ δεν είναι ίδιος και τόσο οι ερευνητές όσο και οι τσιμεντοβιομηχανίες χρησιμοποιούν διαφορετικές αναλογίες υλικών για την παραγωγή του μίγματος. Το μόνο σίγουρο είναι ότι ενώ η χρήση των πρόσθετων υλικών μειώνει το κόστος γιατί είναι πιο φτηνά από το τσιμέντο που αντικαθιστούν, εντούτοις δεν αρκεί για να αντισταθμίσει το επιπλέον κόστος από την εισαγωγή των πρόσμικτων στο νωπό σκυρόδεμα, ειδικά των ρυθμιστών ιξώδους και των υπερρευστοποιητών.

Σύμφωνα με τη Lafarge το ΑΣΣ είναι 30% ακριβότερο από το ΣΣ για τις ίδιες κατηγορίες αντοχής. Το επιπλέον κόστος οφείλεται στις πρώτες ύλες και στις αυξημένες απαιτήσεις του Agilia που αναφέρονται παραπάνω καθώς και στον προσεκτικό σχεδιασμό του μίγματος. Αυτός με τη σειρά του βασίζεται πρωτευόντως στην κοκκομετρική ανάλυση και στη χρήση πρόσθετων υλικών, όπως η ασβεστολιθική παιπάλη που προσδίδει καλή εργασιμότητα στο μίγμα, και δευτερευόντως στη χρήση ισχυρών ρυθμιστών ιξώδους (Viscosity Modifying Admixtures ή VMA).

Εκτός από το κόστος παραγωγής ο κατασκευαστής πρέπει να λάβει υπόψη και το κόστος ενός έργου στο οποίο χρησιμοποιείται το ΑΣΣ. Μερικοί από τους παράγοντες που χαρακτηρίζουν το ΑΣΣ και αυξάνουν το κόστος ενός έργου στο οποίο αυτό χρησιμοποιείται είναι:

- Η ακρίβεια των πρώτων υλών
- Η χαμηλή ζήτηση και παραγωγή του
- Η δύσκολη και κοστοβόρα διάθεση του σε απομακρυσμένες περιοχές
- Η χρήση τύπων που διασφαλίζουν στεγανότητα (εικόνες 6.1 και 6.2)
- Οι συχνές δοκιμές ελέγχου και ο απαραίτητος εξοπλισμός τους



Εικόνα 6.1: Χρήση υλικών περίσφιξης στους ξυλότυπους του ΑΣΣ [πηγή: Γεωργιάδης (2009)]



Εικόνα 6.2: Χρήση βαζελίνης (κόκκινο βέλος) και μεταλλικών ελασμάτων για στεγανότητα των ξυλοτύπων σε ανισόπεδο κόμβο στη Νέα Εθνική Οδό Αθηνών-Πατρών [πηγή: Lafarge]

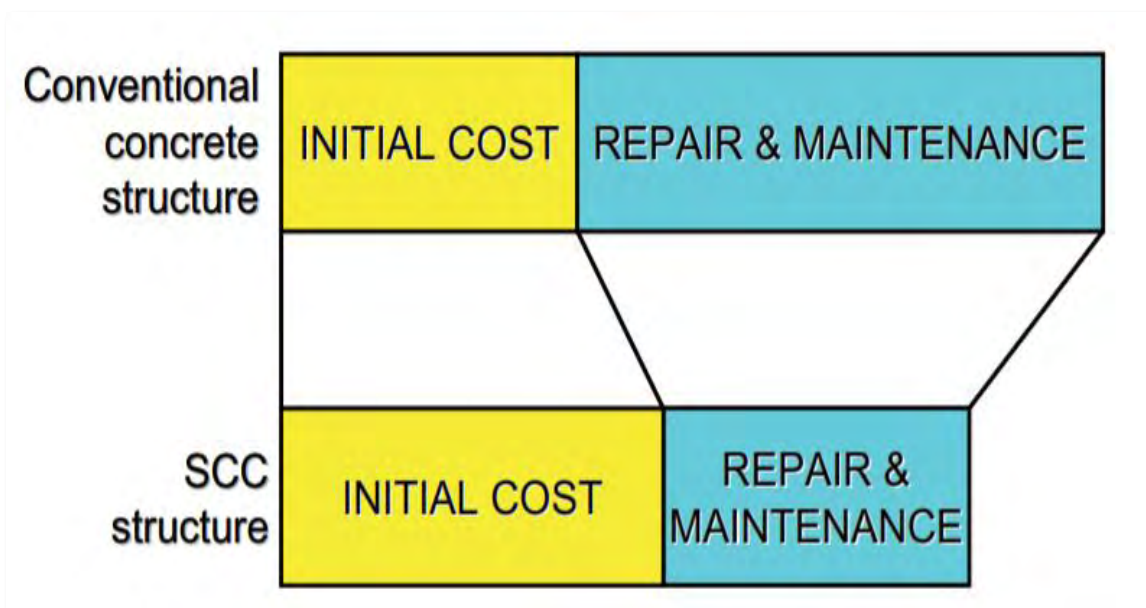
Από την άλλη παράγοντες που επηρεάζουν θετικά το κόστος ενός έργου με ΑΣΣ είναι:

- Η υψηλότερη αντοχή και ανθεκτικότητα του υλικού
- Το χαμηλότερο κόστος συντήρησης ως συνέχεια του παραπάνω
- Ο ταχύτερος ρυθμός σκυροδέτησης και ολοκλήρωσης του έργου
- Η απουσία δόνησης και επομένως η αναγκαιότητα του προσωπικού

Σχετικά με τον ταχύτερο χρόνο σκυροδέτησης ο Repette (2007) παρατήρησε ότι η παραγωγικότητα, δηλαδή τα κυβικά ανά ώρα ανά εργατικό προσωπικό, είναι αρκετά μεγαλύτερη στο ΑΣΣ σε σχέση με το ΣΣ μελετώντας σκυροδέτηση οριζόντιων δομικών στοιχείων.

Σύμφωνα με τον Αναγνωστόπουλο (2009) όσο καλύτερη ανθεκτικότητα έχει ένα υλικό τόσο περισσότερο επιδρά θετικά στο χρόνο ζωής μιας κατασκευής. Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε εκτενής αναφορά στην ανθεκτικότητα του ΑΣΣ και κατά πόσο καλύτερη είναι από το ΣΣ. Συνοπτικά το ΑΣΣ προστατεύει καλύτερα τους χαλύβδινους οπλισμούς από τους σοβαρότερους κινδύνους διάβρωσης, όπως είναι η ενανθράκωση και η διείδυση χλωριόντων. Μια από τις φιλοσοφίες της χρήσης του σκυροδέματος στις κατασκευές είναι η επίτευξη ενός μεγάλου και οικονομικά βιώσιμου χρόνου ζωής. Επομένως το ΑΣΣ θα πρέπει να θεωρείται εξαιρετική επιλογή για χρήση.

Οι Maekawa et al. (2008) θεώρησαν ότι η απουσία δόνησης δεν μπορεί να καλύψει τη διαφορά κόστους στις πρώτες ύλες μεταξύ ΑΣΣ και ΣΣ. Παγκοσμίως η οικονομική κρίση του 2007-2008 ανάγκασε τον κατασκευαστικό κλάδο να στραφεί σε μείωση του κόστους παραγωγής. Αυτό ήταν ικανό να προκαλέσει καχυποψία στη χρήση του ΑΣΣ σε ένα μεγάλο μερίδιο του κλάδου και ειδικότερα στην Ιαπωνία που για εκείνη τη περίοδο το ΑΣΣ ήταν ακριβότερο από το ΣΣ κατά 50%. Δυστηχώς σε πολλές περιπτώσεις το αποτέλεσμα ήταν να μην λαμβάνεται υπόψη το μακροχρόνιο κόστος επισκευής και συντήρησης του ΑΣΣ που σύμφωνα με τους ερευνητές είναι μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος επισκευής του ΣΣ. Ιδανικά σύμφωνα με την εικόνα 6.3 το κόστος των πρώτων υλών του ΑΣΣ, που όπως αναφέρθηκε είναι μεγαλύτερο, μπορεί να αντιμετωπιστεί σε βάθος χρόνου από μικρότερες δαπάνες για επισκευή και συντήρηση.



Εικόνα 6.3: Μακροχρόνιο όφελος χρήσης του ΑΣΣ [πηγή: Maekawa et al. (2008)]

7. Έργα εφαρμογής του ΑΣΣ στην Ελλάδα

Γενικά θα πρέπει να τονιστεί ότι όλα τα ΑΣΣ που παράγονται στην Ελλάδα συμμορφώνονται με το Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 206. Επομένως οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση ταυτίζονται με όσα έχουν περιγραφεί στο 4^ο και 5^ο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας. Προτού γίνει η παρουσίαση μερικών εφαρμογών του ΑΣΣ στην Ελλάδα θα πρέπει να γίνει κατανοητό σε ποια στοιχεία μιας κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό το ειδικό σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τη Lafarge και την Et Beton το ΑΣΣ, ως νέο υλικό στην Ελλάδα, εφαρμόζεται σε ιδιαίζουσες περιπτώσεις, έχει περιορισμένες εφαρμογές μέχρι και σήμερα και έχει χρησιμοποιηθεί για σκυροδέτηση των ακόλουθων δομικών στοιχείων:

- Πλάκες
- Δάπεδα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου
- Κολώνες
- Δοκοί
- Τοιχεία ανωδομής και υπογείου
- Πεδιλοδοκοί
- Σημεία με πυκνό οπλισμό (κόμβοι)
- Ενισχύσεις υφιστάμενων στοιχείων για σύνθετες αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες
- Προκατασκευασμένα στοιχεία

7.1 Κτήριο γραφείων/καταστημάτων στην Αθήνα

Μία από τις πρώτες εφαρμογές του ΑΣΣ στην Ελλάδα έγινε το 2009 σε κτήριο που στεγάζει γραφεία και καταστήματα στο κέντρο της Αθήνας κοντά στη πρεσβεία της Σουηδίας. Χρησιμοποιήθηκε συνολική ποσότητα 1500 m³ ΑΣΣ στις πλάκες και στα τοιχεία του υπόγειου του κτηρίου, με σκοπό τη μείωση του κόστους στεγάνωσής του. Σύμφωνα με τον εργολάβο, αντί για 3 αποστραγγιστικές μεμβράνες που θα χρειαζόνταν για την υδρομόνωση αν εφαρμοζόταν ΣΣ, χρησιμοποιήθηκε μόνο μία, ενώ πιθανότατα δεν χρειαζόταν καμία για τη προστασία του οπλισμού [πηγή: Lafarge]. Η χρήση του ΑΣΣ βασίστηκε στην ικανότητα του να πληρώσει επαρκώς τον οπλισμό και να μην αφήσει κενά αέρα ή πορώδες μέσα στο οποίο θα μπορούσαν να εισέλθουν υδρατμοί ή υπόγεια νερά.

7.2 Ενίσχυση θεμελίωσης και σκυροδέτηση δώματος

Επόμενη εφαρμογή του ΑΣΣ έγινε σε στατική ενίσχυση οικοδομής κατασκευασμένης κατά τη δεκαετία του 1970 στην Κυψέλη. Πραγματοποιήθηκε ενίσχυση θεμελίωσης με γενική κοιτόστρωση πάχους 90 εκατοστών με πυκνό οπλισμό σε κάτοψη υπογείου διάστασης 120 m² (εικόνα 7.1). Αποφασίστηκε η χρήση συνολικής ποσότητας περίπου 100m³ ΑΣΣ κατηγορίας C25/30 που παρασκευάστηκε από την Et Beton [Βογιατζής (2008)] για ταχύτερη σκυροδέτηση που δεν θα προκαλούσε παρεμπόδιση της κυκλοφορίας στον δρόμο. Παρόμοια εφαρμογή ήταν η κατασκευή δώματος σε μονοκατοικία στον Πειραιά με ΑΣΣ (εικόνα 7.2).



Εικόνα 7.1: Χαλύβδινος οπλισμός πριν από τη σκυροδέτηση [πηγή: Βογιατζής (2008)]



Εικόνα 7.2: Πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την αφαίρεση των ξυλοτύπων [πηγή: Βογιατζής (2008)]

7.3 Σκυροδέτηση δαπέδου με Agilia Horizontal

Για τη σκυροδέτηση δαπέδου έξω από γυμναστήριο στο Γαλάτσι εφαρμόστηκε Agilia Horizontal κατηγορίας C25/30. Αυτό το ΑΣΣ είναι ειδικά κατασκευασμένο για χρήση σε οριζόντια στοιχεία, όπως τα δάπεδα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιοι ξυλότυποι με το ΣΣ έχοντας λάβει υπόψη την ανάγκη για στεγανότητα και σταθερότητα. Ο χρόνος πήξης του Agilia Horizontal σύμφωνα με τη Lafarge ήταν αντίστοιχος του ΣΣ. Εξαιτίας των εξαιρετικών ρεολογικών του χαρακτηριστικών η δόνηση αποφεύχθηκε μιας και ο χαλύβδινος οπλισμός της πλάκας καλύφθηκε πλήρως χωρίς τη βοήθεια της. Επίσης το Agilia Horizontal διασφάλισε καλή πρόσφυση με ήδη προϋπάρχοντα στοιχεία του γύρω χώρου.

Η επιπέδωση της τελικής επιφάνειας όσο το σκυρόδεμα ήταν ακόμα νωπό, έγινε με ελαφρή κυματισμό από ειδική μπάρα (ανάστροφο Π) σε δύο κατευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Τέτοια εργασία για μικρές επιφάνειες συνήθως πραγματοποιούνται από έναν μόνο εργάτη μειώνοντας το κόστος της διαδικασίας σκυροδέτησης. Τέλος η εξωτερική επιφάνεια της πλάκας συντηρήθηκε αμέσως μετά το τέλος της σκυροδέτησης από το εργατικό προσωπικό που φορούσε αναπνευστική μάσκα και ψεκάσε την επιφάνεια με νερό και στη συνέχεια με ειδικό στεγανοποιητικό που δεν επέτρεψε την επιφανειακή εξάτμιση του νερού(εικόνα 7.3).



Εικόνα 7.3: Συντήρηση (αριστερά) και τελική επιφάνεια (δεξιά) δαπέδου ΑΣΣ στο Γαλάτσι

[πηγή: Lafarge]

7.4 Ενίσχυση υποστυλωμάτων και γέμισμα κόμβου με Agilia Vertical

Η Lafarge για τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία, όπως είναι τα υποστυλώματα και τα τοιχεία, έχει παράξει το Agilia Vertical. Πρόκειται για ΑΣΣ που, όπως και το Horizontal, χαρακτηρίζεται από μεγάλη ρευστότητα και ταχύτητα ροής, χωρίς να χάνει την ομοιογένεια του. Παράγεται με ελάχιστη κατηγορία αντοχής του C25/30, αλλά η επιλογή της κατηγορίας που θα προτιμηθεί εξαρτάται από τις απαιτήσεις του έργου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση υφιστάμενων στοιχείων και για προκατασκευές. Επίσης σαν σκυρόδεμα διακρίνεται από υψηλές ικανότητες πλήρωσης, διέλευσης και επαρκούς επικάλυψης του οπλισμού. Θυμίζεται ότι το ΑΣΣ δεν απαιτεί δόνηση επομένως η χρήση του μειώνει την όχληση, το χρόνο σκυροδέτησης και το εργατικό κόστος.

Σχετικά με τα καλούπια η Lafarge συνιστά να είναι απαλλαγμένα από νερό και άλλες ακαθαρσίες. Σε διαφορετική περίπτωση η τελική επιφάνεια δεν θα είναι λεία και θα μειώνεται η αισθητική της. Όπως ειπώθηκε και στην παράγραφο 4.5 μπορούν να χρησιμοποιηθούν οποιαδήποτε καλούπια που συμμορφώνονται στους κανονισμούς αρκεί να διασφαλίζεται η στεγανότητα και η σταθερότητα τους. Για κατακόρυφα στοιχεία με ύψος μεγαλύτερο από 3 μέτρα προτείνεται η σκυροδέτηση με χρήση του Agilia Vertical να γίνεται σε στρώσεις. Η κάθε νέα στρώση προστίθεται όταν η προηγούμενη έχει χάσει την εργασιμότητά της, χωρίς όμως να έχει σκληρυνθεί εντελώς. Έτσι διασφαλίζεται ότι η ανάπτυξη της πίεσης στους ξυλότυπους θα εξομαλυνθεί και δεν θα υπάρξουν διαρροές σκυροδέματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής του Agilia Vertical σε ενίσχυση υποστυλωμάτων με οπλισμένους μανδύες στη Θεσσαλονίκη (εικόνα 7.4)



Εικόνα 7.4: Ενίσχυση υποστυλωμάτων στη Θεσσαλονίκη [πηγή: Lafarge]

Μια άλλη εφαρμογή του Agilia Vertical σε μεγάλο οδικό έργο ήταν το γέμισμα φορέα σε ανισόπεδο κόμβο της Νέας Εθνικής Οδού Αθηνών-Πατρών (εικόνα 7.5). Όπως φάνηκε από την εικόνα 6.2 οι ξυλότυποι ήταν ιδιαίτερα πυκνοί μιας και η πίεση που δέχονταν από το σκυρόδεμα ήταν μεγάλη. Το συγκεκριμένο οδικό δίκτυο εξυπηρετεί ένα μεγάλο μέρος του επιβατικού κοινού της χώρας και τόσο η κατασκευή όσο και η συντήρηση του γίνεται με γνώμονα το μεγάλο χρόνο ζωής του.

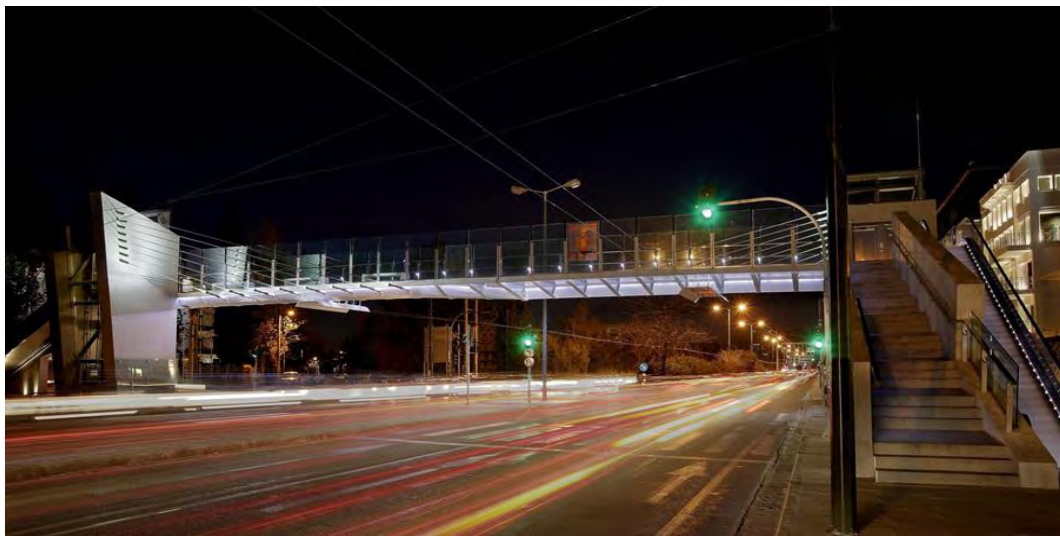


Εικόνα 7.5: Γέμισμα φορέα σε ανισόπεδο κόμβο Νέας Εθνικής Οδού Αθηνών-Πατρών [πηγή: Lafarge]

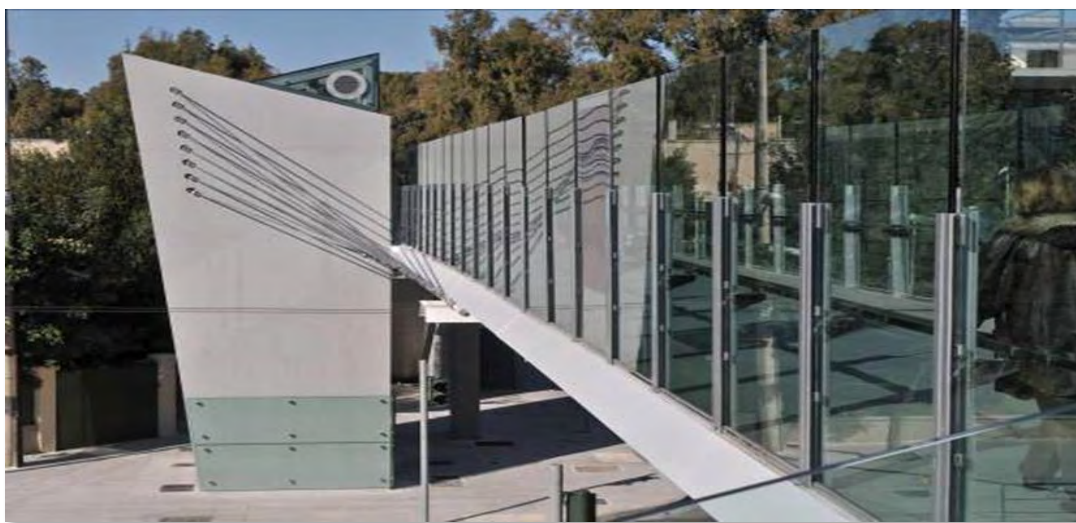
7.5 Πεζογέφυρα Λεωφόρου Κηφισίας

Η πιο γνωστή εφαρμογή του ΑΣΣ στην Ελλάδα έγινε με την κατασκευή της πεζογέφυρας της Κηφισίας το 2011 (εικόνα 7.6). Αφορμή για το συγκεκριμένο έργο στάθηκε το δυστύχημα που οδήγησε στο θάνατο ενός μαθητή που διέσχισε το δρόμο. Οι δαπάνες του έργου καλύφθηκαν με δωρεές από συγγενείς, φίλους, συμμαθητές και απόφοιτους των Κολλεγίων Αθηνών και Ψυχικού.

Η συγκεκριμένη καλωδιωτή γέφυρα έχει συνολικό μήκος 40 μέτρα, δύο πυλώνες κατασκευασμένους από σκυρόδεμα και κατάστρωμα κατασκευασμένο από μέταλλο και γυαλί. Μεταξύ άλλων διαθέτει κλιμακοστάσια, φρεάτια ασανσέρ και ράμπες για ΑΜΕΑ. Η κατασκευαστική εταιρεία ΕΡΕΤΒΟ ΑΕ και ο στατικός μηχανικός απευθύνθηκαν στη Lafarge διότι η κατασκευή των πυλώνων (εικόνα 7.7) δεν μπορούσε να γίνει με ΣΣ, εξαιτίας των σύνθετων γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών, του πυκνού τους οπλισμού και της ανάγκης για σκυροδέτηση από μεγάλο ύψος. Αποφασίστηκε η χρήση του Agilia Vertical συνολικής ποσότητας περίπου 80m³ με ικανοποιητικό τελικό αποτέλεσμα της επιφάνειας και χωρίς χρήση δονητών.



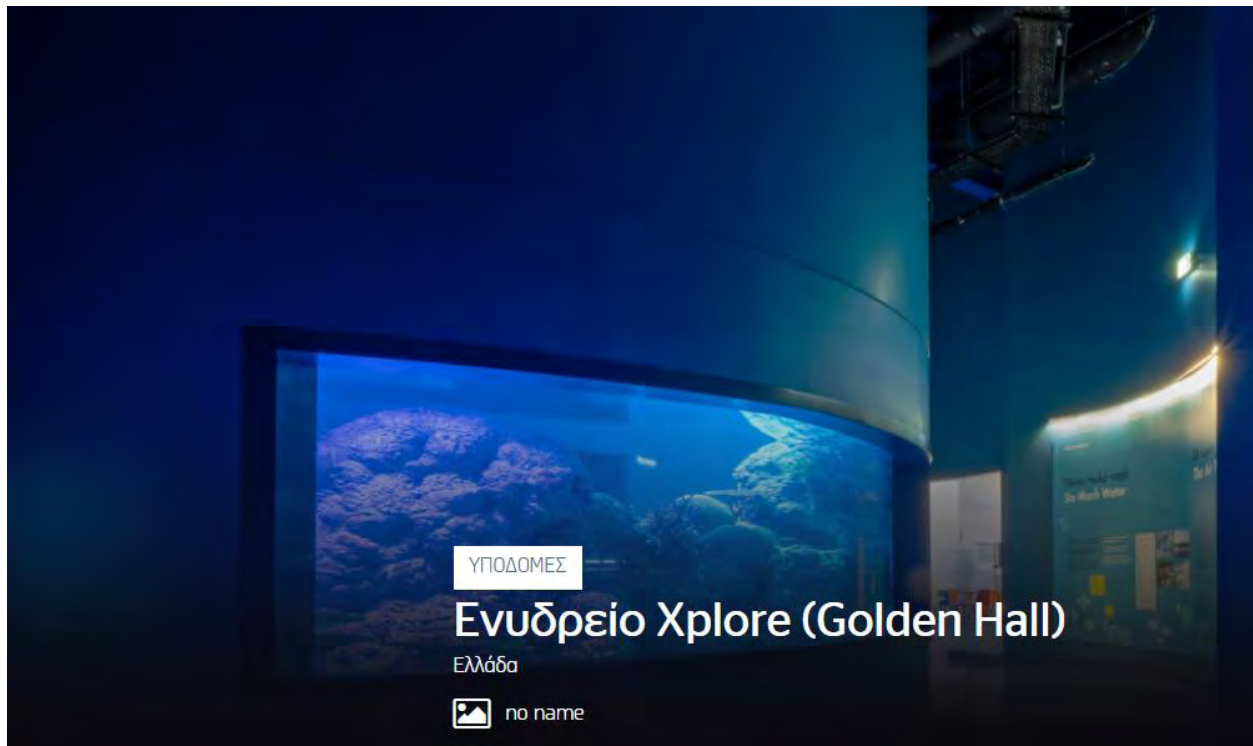
Εικόνα 7.6: Πεζογέφυρα Κηφισίας [πηγή: Lafarge]



Εικόνα 7.7: Πυλώνες από Agilia Vertical στην πεζογέφυρα Κηφισίας [πηγή: Lafarge]

7.6 Πρόσφατες εφαρμογές

Μεταξύ καλοκαιριού και φθινοπώρου του 2019 ολοκληρώθηκε η επέκταση του εμπορικού καταστήματος Golden Hall, που βρίσκεται στην Αθήνα, με την κατασκευή νέου χώρου ψυχαγωγίας στον οποίο περιλαμβάνεται και το ενυδρείο Xplore. Ανάδοχοι του έργου ήταν οι κατασκευαστικές εταιρείες ΜΕΤΚΑ και ΑΡΧΙΚΟΝ. Εξαιτίας του πυκνού οπλισμού και των ειδικών αρχιτεκτονικών σχεδίων αποφασίστηκε η χρήση ειδικής σύνθεσης ΑΣΣ για 3 δεξαμενές νερού. Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση σε αντίθεση με τις άλλες δεξαμενές οι οποίες κατασκευάστηκαν από ΣΣ και των οποίων ο μέσος όρος σκυροδετήσεων ανά δεξαμενή ήταν 2, οι δεξαμενές από ΑΣΣ χρειάστηκαν σκυροδέτηση σε 3 στρώσεις/φάσεις για την εξομάλυνση της πίεσης που δημιουργήθηκε στους ξυλοτύπους.



Εικόνα 7.8: Δεξαμενή ενυδρείου Xplore [πηγή: ΜΕΤΚΑ]

Τέλος ένα ακόμα παράδειγμα υπό εξέλιξη συμβαίνει κατά τη περίοδο συγγραφής της παρούσης εργασίας. Σύμφωνα με τη Lafarge κατασκευάζεται διώροφη μονοκατοικία στην περιοχή της Φιλοθέης στην Αθήνα με χρήση ΑΣΣ Agilia Vertical (εικόνα 7.9)



Εικόνα 7.9: Χρήση ΑΣΣ σε διώροφη μονοκατοικία στην Κυψέλη [πηγή: Lafarge]

Όπως φάνηκε από αυτό το κεφάλαιο η χρήση του ΑΣΣ είναι μέχρι στιγμής περιορισμένη και δικαιολογεί τη μικρή παραγωγή αυτού του υλικού στην Ελλάδα, σύμφωνα με τα στοιχεία του προηγούμενου κεφαλαίου. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι, παρόλο που η παρασκευή και χρήση του ΑΣΣ προοριζόταν για μεγάλα έργα, ως νέο υλικό στη χώρα μας έχει εφαρμογές κυρίως σε μικρά έργα. Σε μεγαλύτερα έργα το υψηλό του κόστος παραμένει αποτρεπτικός παράγοντας και η χρήση του ΑΣΣ περιορίζεται σε ιδιαίζουσες περιπτώσεις, όπως οι τοπικές επισκευές με σκοπό την εκμετάλλευση της ανθεκτικότητας αυτού του υλικού σε βάθος χρόνου. Δυστηχώς λείπουν από τη χώρα μας η ενημέρωση, οι εφαρμογές και τα δεδομένα που θα πείσουν τον καταναλωτή και τον κατασκευαστή ώστε να προτιμήσουν αυτό το συγκεκριμένο δομικό υλικό. Απώτερος στόχος στο μέλλον είναι να πάψει να θεωρείται το ΑΣΣ ως ένα άλλο σκυρόδεμα με εξειδικευμένη χρήση.

8. Πρόσφατες εξελίξεις, συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ανακεφαλαιώνοντας σε αυτή τη διπλωματική εργασία παρουσιάζεται το ΑΣΣ, ένα σκυρόδεμα με πάνω από 30 χρόνια ιστορίας γεννημένο στην Ιαπωνία από τον καθηγητή Okamura. Έχει τη δυνατότητα να ρέει κάτω από το ίδιο του το βάρος και να πληρώνει σύνθετους γεωμετρικά τύπους ανεξαρτήτως της ποσότητάς τους σε χαλύβδινο οπλισμό χωρίς τη χρήση δονητών. Έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σημαντικών έργων του κατασκευαστικού κλάδου σε παγκόσμια κλίμακα. Τα υλικά παραγωγής του ΑΣΣ δεν διαφέρουν από αυτά του ΣΣ, το μόνο που διαφέρει είναι η σύνθεση των μιγμάτων τους, εξαιτίας των πρόσθετων και πρόσμικτων ουσιών. Ειδικότερα η μεγαλύτερη χρήση πρόσμικτων και οι απαιτήσεις για διαφορετική κοκκομετρία οδηγούν στο αυξημένο κόστος παραγωγής του ΑΣΣ, που είναι και το μεγαλύτερο του μειονέκτημα.

Σε νωπή κατάσταση το ΑΣΣ διαφέρει αρκετά από το ΣΣ. Χαρακτηρίζεται από υψηλή ρευστότητα, διελευσιμότητα και σταθερότητα. Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται στο εργοτάξιο είναι πιο σύνθετοι και απαιτητικοί γιατί το συγκεκριμένο είδος σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε αλλαγή της σύνθεσης των υλικών του. Η μεταφορά και σκυροδέτηση γίνονται με αυστηρότερα κριτήρια σε σχέση με το ΣΣ, αλλά η ταχύτητα σκυροδέτησης είναι πιο γρήγορη και πραγματοποιείται με λιγότερο προσωπικό. Μπορεί να χρησιμοποιήσει τους ίδιους τύπους που χρησιμοποιούνται για τα ΣΣ, αρκεί να διασφαλίζεται η στεγανότητα και η σταθερότητά τους. Αν δεν δοθεί προσοχή είναι αρκετά πιθανό το ΑΣΣ να διαρρεύσει ή ο τύπος να αστοχήσει εξαιτίας της ανάπτυξης μεγάλων πιέσεων, ειδικά σε μεγάλα κατακόρυφα στοιχεία. Η καλή συντήρηση του ΑΣΣ είναι απαραίτητη στην ανάπτυξη των πρώιμων αντοχών του και τη διασφάλιση της ποιότητας της τελικής επιφάνειας.

Σε σκληρυμένη κατάσταση το ΑΣΣ δείχνει να είναι καλύτερο σε θέματα αντοχής και ειδικότερα στη θλιπτική αντοχή που είναι μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες ενός σκυροδέματος. Επίσης το ΑΣΣ φαίνεται να έχει καλύτερη καμπτική αντοχή και συνάφεια με το χαλύβδινο οπλισμό, ενώ μικρή είναι η υστέρηση του στο μέτρο ελαστικότητας, στη συρρίκνωση και στον ερπυσμό έναντι του ΣΣ. Ωστόσο το ΑΣΣ είναι πιο ανθεκτικό από το ΣΣ σε κύκλους ψύξης-απόψυξης, σε υψηλές θερμοκρασίες, σε ενανθράκωση και σε διείδυση χλωριόντων. Αυτή η ανθεκτικότητα οφείλεται κυρίως στο μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών του μίγματός του που εξασφαλίζεται

μικρότερο πορώδες στη σκληρυμένη κατάσταση. Έτσι προστατεύει καλύτερα τους χαλύβδινους οπλισμούς από εξωτερικούς παράγοντες. Σε συνδυασμό με την επιπέδωση της εξωτερικής του επιφάνειας απαιτεί λιγότερο κόστος επισκευής και συντήρησης.

Η παραγωγή του ΑΣΣ αγγίζει περίπου το 3% του συνόλου της παραγωγής του ΣΣ στον Ευρωπαϊκό χώρο, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό στην Ελλάδα είναι λιγότερο από 1% και δεν δείχνει να αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Έχουν υπάρξει παραδείγματα εφαρμογών αυτού του ειδικού σκυροδέματος στη χώρα μας, αλλά η τεχνολογία του δεν έχει αξιοποιηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό μέχρι και σήμερα.

8.1 Πρόσφατες εξελίξεις

Σύμφωνα με τον Sfikas (2017) τα τελευταία χρόνια έχουν παρασκευαστεί νέα είδη ΑΣΣ για τα οποία η αυτοσυμπύκνωση θεωρείται δεδομένη χωρίς να χρειάζεται δόνηση, αλλά ταυτόχρονα έχουν κληθεί να αντιμετωπίσουν νέα προβλήματα στο χώρο των κατασκευών και του μηχανικού. Τα νέα αυτά είδη (εικόνα 8.1) αποτελούν, μαζί με το ΑΣΣ, αντικείμενο έρευνας καθώς αποτελούν τις τελευταίες εξελίξεις αυτής της οικογένειας σκυροδεμάτων. Αρκετές εργασίες που έχουν γίνει σχετικά με αυτά τα νέα σκυροδέματα παρουσιάστηκαν στο 9^ο συνέδριο για το ΑΣΣ που διοργανώθηκε από τη RILEM στη Δρέσδη της Γερμανίας.

HSSCC High-strength	L(W)SCC Lightweight	H(W)SCC Heavyweight	SFRSCC Steel-fibre reinforced	Rubberised
RCA SCC Recycled aggregates	Nano-SCC Nanoparticles	UHPSCC Ultra-high performance	PAC-SCM Preplaced aggregates with mortar	RFC-SCC Rock-filled concrete
SC-SIFCON S/C slurry infiltrated fiber concrete	HPFRCC High-performance, fibers	UW-SCC Underwater	SLC Self-levelling	Self-compacting mortars

Εικόνα 8.1: Ειδικά ΑΣΣ [πηγή: Sfikas (2017)]

Ίσως το πιο γνωστό είναι το Αυτοσυμπυκνούμενο Ελαφροσκυρόδεμα (ΑΣΕΣ ή Lightweight SCC) που εκμεταλλεύεται το χαμηλό ίδιο βάρος με συνέπεια την ανάπτυξη χαμηλότερων πιέσεων στους ξυλότυπους. Το ΑΣΕΣ μέχρι και σήμερα έχει εφαρμογή κυρίως σε προκατασκευασμένα στοιχεία. Στη χώρα μας, σύμφωνα με τη Τεχνική Οδηγία 5 (2014) συστηματική μελέτη για τη χρήση και παραγωγή του ΑΣΕΣ γίνεται στο Πανεπιστήμιο Πατρών με χρήση κίσηρης ή ελαφρόπετρας που συναντάται αρκετά στον Ελλαδικό χώρο. Εξίσου γνωστό θεωρείται και το Ινοπλισμένο Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (Fiber-Reinforced SCC). Η χρήση των ινών στοχεύει στην αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος και στον περιορισμό της ρηγμάτωσής του. Οι ίνες μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά, όπως χάλυβας, γυαλί και πολυπροπυλένιο.

Μερικά από τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στο 9^ο συνέδριο της RILEM για το ΑΣΣ είναι:

1. Influence of Waste Tire Rubber on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Rubberized Concrete [Busic et al. (2019)]
2. Rheology and Build-Up of Fresh SCC Pastes Evaluated with the Mini-slump Cone Test [Palomar et al. (2019)]
3. Comparative Study on the Effect of Mixer Type on Properties of Self-compacting Mortar [Craeye et al. (2019)]
4. Experimental Study of Formwork Tightness as a Function of Rheological Properties of SCC [Chibulu et al. (2019)]
5. Effects of Nano clays on SCC Paste Rheology [Varela et al. (2019)]
6. Utilization of Copper Slag in Self-compacting Concrete - Strength and Permeation Properties [Gupta et al. (2019)]

8.2 Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα για το ΑΣΣ παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μειώνει το χρόνο ολοκλήρωσης του έργου λόγω της αυξημένης ταχύτητας σκυροδέτησης
- Χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα
- Καλύπτει επαρκώς το χαλύβδινο οπλισμό ανεξαρτήτως πυκνότητας
- Δεν απαιτεί επιπλέον προσωπικό για τη δόνηση
- Δεν υπάρχει συγκεκριμένη σύνθεση μίγματος για την παραγωγή του

- Η αντικατάσταση του τσιμέντου με πρόσθετα υλικά έχει ευεργετικές συνέπειες
- Πρέπει να ελέγχεται διεξοδικά κατά τη παραγωγή, μεταφορά, σκυροδέτηση και συντήρηση εξαιτίας της ευαισθησίας σου
- Είναι ακριβότερο από το ΣΣ σε παραγωγή
- Έχει μικρή εφαρμογή στην Ελλάδα παρά τη διαρκή εξέλιξη και χρήση του στο εξωτερικό

8.3 Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες

Το ΑΣΣ έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι του ΣΣ που δεν έχουν εκτιμηθεί σε μεγάλο βαθμό, εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων από τη μελέτη και τη χρήση του. Ωστόσο οι μελλοντικές έρευνες πρέπει να εστιάσουν στην αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων του ΑΣΣ με κύριο και βασικότερο το υψηλό κόστος παραγωγής του. Για να αντιμετωπιστούν οι αμφιβολίες από το υψηλότερο κόστος παραγωγής του ΑΣΣ πρέπει να γίνουν αναλυτικές μελέτες σε υφιστάμενες εφαρμογές του. Αυτές πρέπει να εστιάσουν στην εύρεση του χρόνου ζωής που μπορεί να προσδώσει το ΑΣΣ στα στοιχεία ενός έργου ξεχωριστά και σε άλλους παράγοντες, όπως το κόστος των πρώτων υλών, το κόστος των ξυλοτύπων, το κόστος επισκευής και συντήρησης.

Είναι αρκετά σημαντικό να επιβεβαιωθεί το μακροχρόνιο οικονομικό συμφέρον του ΑΣΣ έναντι του ΣΣ. Πρέπει να γίνουν οικονομικές μελέτες που να συγκρίνουν δύο, όσο το δυνατόν γίνεται, παρόμοια έργα, το ένα κατασκευασμένο από ΣΣ και το άλλο κατασκευασμένο από ΑΣΣ. Η βάση σύγκρισης των δύο κτηρίων θα πρέπει να είναι το συνολικό κόστος παραγωγής τους και το κόστος συντήρησης που απαιτούν σε βάθος ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος, όπως για παράδειγμα για μια δεκαπενταετία (15ετία).

Χρήσιμη θα είναι και η διεξοδική μελέτη των μοντέλων για την παραγωγή του ΑΣΣ, ώστε μελλοντικά η διαδικασία να απλοποιηθεί. Περαιτέρω μελέτες πρέπει να γίνουν για τη ακριβή σύγκριση των αντοχών των σκληρυμένων ΑΣΣ και ΣΣ με ίδιες βάσεις, ήτοι με ίδια υλικά παραγωγής, ίδια κατηγορία αντοχής τσιμέντου και ίδιου λόγου w/c. Εξίσου σημαντικές είναι και οι μελέτες που θα εστιάσουν στη χρήση περισσότερων βιομηχανικών παραπροϊόντων για πιθανή αντικατάσταση του τσιμέντου, δίχως το τελικό μίγμα να χάσει μέρος των αντοχών και της ανθεκτικότητας του.

Αν γίνουν αυτές οι μελέτες και υπάρχει επαρκής ενημέρωση θα αποτελέσουν τους βασικούς πυλώνες για τη διάδοση αυτού του υλικού στη χώρα μας.

9. Βιβλιογραφία

Πρότυπα και Κανονισμοί

- AASHTO T 351 Standard Method of Test for Visual Stability Index (VSI) of Self-Consolidating Concrete (SCC) (2014)
- ACI 237R Self-Consolidating Concrete American Concrete Institute (2007)
- ACI 318/318R Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (318R) American Concrete Institute Farmington Hills, USA (2008)
- ASTM C78 / C78M - 18 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) (2018)
- ASTM C293 / C293M - 16 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading) (2016)
- ASTM C666 / C666M - 15 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing (2015)
- ASTM C 1611/ 1611M Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete (2009)
- ASTM C 1621/ 1621M Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring (2007)
- Best Practices Guidelines for Self-Consolidating Concrete RMCAO (2009)
- EN 197-1 Cement - Part 1: Composition, specification, and conformity criteria for common cements European Committee for Standardization (2000)
- EN 206 Concrete - Part 1: Specification, performance, production, and conformity. European Committee for Standardization (2013)
- EN 450-1 Fly ash for concrete European Committee for Standardization (2012)
- EN 1008 Mixing water for concrete (2002)
- EN 1992-1-1: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (2004)
- EN 12350-8 Testing fresh concrete Part 8:Self-compacting concrete-Slump-flow test European Committee for Standardization (2010)
- EN 12350-9 Testing fresh concrete Part 9:Self-compacting concrete-V-funnel test European Committee for Standardization (2010)
- EN 12350-10 Testing fresh concrete Part 10:Self-compacting concrete-L-box test European Committee for Standardization (2010)
- EN 12350-11 Testing fresh concrete Part 11:Self-compacting concrete-Sieve segregation test European Committee for Standardization (2011)
- EN 12350-12 Testing fresh concrete Part 12:Self-compacting concrete-J-Ring test European Committee for Standardization (2010)
- EN 12620 Aggregates for concrete (2013)

- EN 13670 Execution of concrete structures European Committee for Standardization (2009)
- ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-01-01-06-00 Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή για Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυροδέμα (2009)
- ISO 9001 Quality management systems - Requirements (2008)
- Japan Society of Civil Engineers Standard Specifications for Concrete Structures (2007)
- JSCE State of the Art-Report on Self-Compacting Concrete, Concrete Engineering Series, n. 15. Japan Society of Civil Engineers (1996)
- JSCE Recommendation for practical application of self-compacting concrete, Concrete Library, n. 93. Japan Society of Civil Engineers (1998)
- Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΚΤΣ-97 (1997)
- Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete EFNARC (2002)
- The European Guidelines for Self-Compacting Concrete EFNARC (2005)
- Τεχνική Οδηγία 3 Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος (2012)
- Τεχνική Οδηγία 5 Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος (2014)
- Τεχνική Οδηγία 7 Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος (2016)

Ξενόγλωσσες Αναφορές

- Alyamac KE, Ghafari E, Ince R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. J Clean Prod.144 pp.192–202 (2017)
- Aslani, F., Ma, G., Wan, D.L.Y., Muselin, G., Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules (2018)
- Baradan et al. “The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars” Cement and Concrete Research 36 pp.1719–1726 (2006)
- Billberg P., “Form pressure generated by self-compacting concrete – Influence of thixotropy and structural behavior at rest”, Division of Concrete Structures, Royal Institute of Technology, Stockholm (2006)
- Bouziani T. Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach. Construct Build Mater 49 pp.308–314 (2013)
- Castel A, Vidal T, François R. Effect of Reinforcing Bar Orientation and Location on Bond with Self-Consolidating Concrete. ACI Structural Journal 103(4):559- 567 (2006)
- Chan Y-W, Chen Y-S, Liu Y-S. Development of bond strength of reinforcement steel in self-consolidating concrete. ACI Structural Journal 100(4):490-498 (2003)
- Collepardi, M., Valente, M., “Recent Developments in Superplasticizers”, Special Publication, vol. 239, pp.1-14 (2006)
- Dinakar P. Design of self-compacting concrete with fly ash. Mag Concr Res.64 pp 401–409 (2012)
- Domone PL. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. Cement & Concrete Composites vol.29 pp.1-12 (2007)
- Esfahani MR, Lachemi M, Kianush MR. Top-bar effect of steel bars in self-consolidating concrete. Cement & Concrete Composites vol.30 pp.52-60 (2008)

- Gagne R, Pigeon M, Aïtcin PC. Deicer salt scaling resistance of high-performance concrete. Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, SP-122, ACI (1989)
- Georgiadis, Anagnostopoulos, Sideris “Mechanical characteristics of self-compacting concretes produced with different filler materials” Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete (2007)
- Goodier, Development of self-compacting concrete. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, pp.405-414 (2003)
- Itim A., Ezziane K., “Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions” Construction and Building Materials vol.25, pp.3603-3609 (2011)
- Jiang C., Yang Y., “Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures” Construction and Building Materials vol.61 pp.260-269 (2014)
- Kannan V., Ganesan K., “Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin” Construction and Building Materials Vol. 51,pp 225-234 (2014)
- Kashani Alizera , Tuan Ngo. Production and placement of self-compacting concrete. Self-Compacting Concrete: Materials, Properties, and Applications (2020)
- Kenai S., Yahiaoui W., “Effect of Granulated Blast Furnace Slag on The Durability of Self Compacting Concrete In Hot Environment” Proceedings of the International RILEM Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering (2016)
- Khayat, K. H., Assaad, J., “Effect of Viscosity-Enhancing Admixtures on Formwork Pressure and Thixotropy of Self-Consolidating Concrete,” ACI Materials Journal, V. 103, No. 4, pp 280-287 (2006)
- Klug Y., Holschemacher, K., ”A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC”,LACER, No 7, pp 123-132 (2002)
- Leemann A., Loser R., Lura P., “Shrinkage and creep of SCC – The influence of paste volume and binder composition” Construction and Building Materials vol.25 pp.2283-2289 (2011)
- Lowke, D., Schiessl, P., “Effect of mixing energy on fresh properties of SCC”, Proceedings of the 4th International RILEM Symposium on SCC (2005)
- Maekawa, K., Okamura, H., K., Ozawa, K., High-Performance Concrete, Gihodo Publishing, 1993
- Maekawa, K., Noguchi, T., “Self-Compacting Concrete in Japan” 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete (2008)
- Manju R., Shanthi R., Flexural Behavior of Self Compacting Concrete Beams International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 8, Issue 9 pp. 305–318 (2017)
- Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M., “Concrete: Structure, Properties and Materials”, McGraw-Hill, third edition (2006)
- Mohamed HA. “Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions” Ain Shams Engineering Journal 2 pp.79-86 (2011)

- Naito, C., Brunn, G., Parent, G., and Tate, T., “Comparative Performance of High Early Strength and Self-Consolidating Concrete for Use in Precast Bridge Beam Construction,” ATLSS Report 05-03. Lehigh University, Bethlehem, PA (2005)
- Nehdi M, Pardhanb M, Koshowskic S. “Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. Cement and Concrete Research 34 pp.2103-2112 (2004)
- Nguyen, T.L.H., Roussel, N., Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid (2006)
- Nielsson I, Olafur O, Wallevik H. Mix design of HS-SCC and practical application. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavik, Iceland: RILEM Publications SARL, pp.506–513 (2003)
- Olek J., Bonen D., Lange D. “Robustness of Self-Consolidating Concrete” 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Ghent, Belgium (2007)
- Ouchi, M., Nakamura, S., Osterberg, T., Hallberg, S., Lwin, M., “Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States” ISHPC (2003)
- Ouchi, M. “Self-Compacting Concrete Development, Applications and Investigations (2003)
- Okamura H., Maekawa K., Ozawa K. “High Performance Concrete” Gihodo Publishing (1993)
- Okamura H., Ozawa K., “Mix design for self-compacting concrete” Concr Lib JSCE 25 pp.107–120 (1995)
- Okamura H, Ouchi M. Self-Compacting Concrete Journal of Advanced Concrete Technology 1(1) pp.5-15 (2003)
- Ozawa K., Maekawa K., Kunishima M., Okamura H., Development of high-performance concrete based on the durability design of concrete structures. Proceedings of the 2nd East-Asia & Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), 1, 445-450 (1989)
- Ozawa K., Evaluation of self-compatibility of fresh concrete using the funnel test, Proceedings of JSCE vol.25 pp.59-75 (1995)
- Parra, C., Valcuende, M., Benlloch, J., “Mechanical Properties of Self-Compacting Concretes”, Proceedings of the 5th International Rilem Symposium for SCC, Ghent Belgium, pp. 645-650 (2007)
- Pei, M., Wang, D., Hu, X., Xu, D., “Synthesis of sodium sulfanilate-phenol-formaldehyde condensate and its application as superplasticizer in concrete”, Cement and Concrete Research, vol.30, pp.1841-1845 (2000)
- Perrot, A., Amziane, S., Ovarlez, G., Roussel, N., “SCC formwork pressure: Influence of steel rebars”, Cement and Concrete Research, vol 39, issue 6, pp 524-528 (2009)
- Ponmalar P., Bond behavior of self-compacting concrete Journal of Civil Engineering 13(s1):95-105 (2018)
- Repette, L. W., “Self-Compacting Concrete- A Labor Cost Evaluation when Used to Replace Traditional Concrete in Building Construction”, Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium, pp.1001-1006 (2007)
- Rooney M. Assessment of the Properties of Fresh Self-Compacting Concrete with Reference to Aggregate Segregation. PhD thesis. University of Paisley, Paisley, Scotland, pp.347 (2002)

- Roziere, E., Turcry, P., Loukili, A., and Cussigh, F., “Influence of paste volume, addition content and addition type on shrinkage cracking of self-compacting concrete,” Proceedings of the 4th International RILEM Conference Chicago (2005)
- Sfikas IP, Trezos KG. Impact of water to binder ratio and silica fume content on bond properties of self-compacting concrete cube specimens, 4th International Symposium: Bond, Anchorage, Detailing RILEM University of Brescia, Italy (2012)
- Sfikas IP Self-Compacting Concrete: History & Current Trends Article in Concrete London (2017)
- Sharma R., Khan R., “Carbonation Resistance of Self-Compacting Concrete Incorporating Copper Slag as Fine Aggregates American Society of Civil Engineers (2020)
- Shi, Xu, Zhou “Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high-performance concrete” Construction and Building Materials Vol. 23, Issue 5, pp.1980-1985 (2009)
- Shi, Wu “A review on mixture design methods for self-compacting concrete” Construction and Building Materials Volume 84 Pages 387-398 (2015)
- Sideris KK., Mechanical Characteristics of Self-Consolidating Concretes Exposed to Elevated Temperatures J. Mater. Civ. Eng. vol. 19, pp.648-654 (2007)
- Sivaraman K., Kandasami S., “The effect of controlled permeable formwork liner on the mechanical and durability properties of self-compacting concrete” Construction and Building Materials vol.118 pp. 319-326 (2016)
- Sonebi M., Bartos P.J.M., “Performance of Reinforced Columns Cast with Self-Compacting Concrete” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, pp. 415-431 (2001)
- Sonebi M., Bassuoni M.T., “Effect of Freezing-Thawing Cycles on the Resistance of Self-Consolidating Concrete to Sulfate Attack” (2010)
- Sonebi M., Yahia A., “Mix design procedure, tests and standards” Self-Compacting Concrete: Materials, Properties, and Applications (2020)
- Schutter D., Poppe A.M., “Self-Compacting Concrete: fundamental and applied research” Bouwkroniek pp.28-33 (2001)
- Taerwe L., Desnerck P, De Schutter G. A local bond stress-slip model for reinforcing bars in self-compacting concrete. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete Structures Korea Concrete Institute, Seoul (2010)
- Taylor PC, Whiting DA, Nagi MA. Threshold Chloride Content for Corrosion of Steel in Concrete: A Literature Review. PCA R&D Serial No. 2169, Portland Cement Association. 1999
- Valcuende M, Parra C. Bond behavior of reinforcement in self-compacting concretes. Construction and Building Materials vol.23 pp.162-170 (2009)
- Waller, V., Assie, S., Escadeillas, G., “Estimates of self-compacting concrete potential durability”, Construction and Building Materials, vol. 21, pp 1909-1917 (2007)

- Yazici Halit “The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete” Construction and Building Materials 22 pp.456–462 (2008)
- www.rilem.net
- www.basf.com
- www.selfconsolidatingconcrete.org/mixdesign.html
- https://assets.master-builders-solutions.com/en-us/project_profile-scc-overpass.pdf
- <https://www.construction.basf.us/resources/project-profiles/title/trump-international-hotel-tower>
- <https://civildigital.com/curing-concrete-purpose-curing-curing-methods/>
- <https://ermco.eu/new/statistics-2003-2018/>
- Rheology and Processing of Construction Materials 9th RILEM conference for SCC (2019)

Ελληνικές Αναφορές

- Αναγνωστόπουλος, Ν., “Μηχανικά Χαρακτηριστικά και Ανθεκτικότητα Αυτοσυμπυκνούμενων Σκυροδεμάτων (ΑΣΣ) Παρασκευασμένα με Ελληνικά Υλικά”, Διδακτορική Διατριβή, ΔΠΘ (2009)
- Αναστασίου Ε.Κ., “Αξιοποίηση Σκωρίων Χαλυβουργίας και Ιπτάμενων Λιγνιτικών Τεφρών στην Παραγωγή Ειδικών Σκυροδεμάτων” ,Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ (2009)
- Βογιατζής, Χ., “Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα Εφαρμογές-Λύσεις και Προβλήματα από την Χρήση του”, Et Beton, Ημερίδα ΤΕΕ, Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (2008)
- Γεωργιάδης, Α.Σ., “Βελτιστοποίηση σχεδιασμού, παραγωγής και χρήση μειγμάτων ΑΣΣ σε βιομηχανική κλίμακα στην Ελλάδα”, Διδακτορική Διατριβή, ΔΠΘ (2010)
- Καφφετζάκης, Μ.Ι., “Συστηματική μελέτη Αυτοσυμπυκνούμενου Κιτσηροδέματος” , Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών (2014)
- Κοσμάς Κ. Σίδηρης, Παναγιώτα Μανίτα Χρήση Σκωρίων Χαλυβουργίας ως λεπτό υλικό πλήρωσης ΑΣΣ Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΙΠΑΡ,Θεσσαλονίκη (2012)
- Κοσμάς Κ. Σίδηρης, Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα και Ελληνική πραγματικότητα: Παρούσα κατάσταση και προοπτικές εξέλιξης (2008)
- Σφήκας, Ι.Π., “Διερεύνηση ιδιοτήτων Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυροδέματος”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ (2014)
- Τριανταφύλλου Α.Χ “Δομικά Υλικά” 10^η έκδοση σελ 17-262 (2013)