



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



**ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΝΕΡΟ ΚΑΙ**  
**ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗ**  
**ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ**  
**ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ**  
**ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΤΟΥ

**Τσιάρα Βασιλείου-Ορφέα**

Επιβλέπων:

Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης | Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2022

ΕΟΣ ΔΕ 2022/02

Τσιάρας Β.Δ. (2022).  
Διαπερατότητα σε νερό και πυραντίσταση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με  
εναλλακτικά πληρωτικά υλικά  
Διπλωματική Εργασία ΕΟΣ ΔΕ 2022/02  
Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Tsiaras V. Dim. (2022).  
Self compacting concrete  
Diploma Thesis ΕΟΣ ΔΕ 2022/02  
Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

# Πίνακας Περιεχομένων

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	ii
Abstract .....	iii
1 Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ).....	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Συστατικά ΑΣΣ .....	6
1.2.1 Λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά .....	6
1.2.2 Εναλλακτικά λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά .....	7
1.2.3 Αδρανή υλικά .....	8
1.2.4 Τσιμέντο .....	9
1.2.5 Χημικά πρόσμικτα.....	9
1.3 Ρεολογικά χαρακτηριστικά ΑΣΣ .....	11
1.3.1 Ρεολογικά χαρακτηριστικά ΑΣΣ με πρόσθετα - Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	12
1.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά ΑΣΣ - Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	28
1.5 Φυσικές ιδιότητες ΑΣΣ .....	44
1.5.1 Υδατοπερατότητα.....	44
1.5.2 Αυτογενής συστολή.....	50
1.5.3 Συστολή ξήρανσης .....	50
1.5.4 Πλαστική συστολή .....	53
1.5.5 Ερπυσμός.....	54
1.5.6 Παραμόρφωση.....	54
1.6 Θερμικά χαρακτηριστικά ΑΣΣ .....	54
2 Πειραματικό μέρος.....	57
2.1 Υλικά και συνθέσεις ΑΣΣ .....	57
2.2 Δοκιμές χαρακτηρισμού μηχανικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών ΑΣΣ.....	62
2.2.1 Δοκιμή θλιπτικής αντοχής.....	62
2.2.2 Δοκιμή εφελκυστικής αντοχής έναντι διάρρηξης.....	64
2.2.3 Δοκιμή καμπτικής αντοχής.....	65
2.2.1 Δοκιμή μέτρησης μέτρου ελαστικότητας .....	67
2.3 Δοκιμές χαρακτηρισμού φυσικών ιδιοτήτων .....	68
2.3.1 Οπτικός δείκτης σταθερότητας.....	68
2.3.2 Δοκιμή συστολής ξήρανσης .....	69
2.3.3 Υδατοπερατότητα.....	69
2.4 Αξιολόγηση πυραντίστασης ΑΣΣ.....	71
2.4.1 Θλιπτική αντοχή κατόπιν θερμικής καταπόνησης.....	71
2.4.2 Δοκιμή ταχύτητας διέλευσης υπερήχων σε υψηλές θερμοκρασίες .....	72
2.4.3 Απώλεια βάρους λόγω θερμικής καταπόνησης.....	73
3 Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	74
3.1 Δοκιμές νωπού σκυροδέματος .....	74
3.2 Αποτελέσματα δοκιμών σκληρυμένου ΑΣΣ .....	75
3.2.1 Συστολή ξήρανσης .....	75
3.2.2 Απώλεια μάζας δοκιμών ΑΣΣ, λόγω ξήρανσης .....	76
3.2.3 Θλιπτική αντοχή.....	77
3.2.4 Μέτρο Ελαστικότητας.....	78
3.2.5 Αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης .....	79
3.2.6 Καμπτική αντοχή.....	80
3.2.7 Θλιπτική αντοχή μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες .....	81
3.2.8 Απώλεια μάζας λόγω θερμικής καταπόνησης .....	83
3.2.9 Ταχύτητα διέλευσης υπερήχων (UPV-test) κατόπιν θερμικής καταπόνησης.....	85
3.2.10 Διαπερατότητα σε νερό .....	87

4	Κόστος υλικών και εργασιών ΑΣΣ.....	90
4.1	Κόστος Υλικών .....	90
4.2	Κόστος κατασκευής ΑΣΣ.....	90
5	Συμπεράσματα.....	94

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα	1	Υπερρευστοποιητής	ANHYDRON
.....			11
Εικόνα 2	Διατάξεις δοκιμής ελεύθερης εξάπλωσης .....		13
Εικόνα 3	Παραδείγματα βαθμονόμησης ΟΔΣ σε εξαπλωμένα μίγματα.....		15
Εικόνα 4	Εργαστηριακή διάταξη δοκιμής χοάνης V .....		16
Εικόνα 5	Συσκευή δοκιμής δοχείου L .....		17
Εικόνα 6	Χαρακτηριστικά δοχείου U-box δοκιμής U .....		18
Εικόνα 7	Διατάξεις δοκιμής δακτύλιου J.....		19
Εικόνα 8	Πειραματική διάταξη για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε αέρα του ΑΣΣ με τη μέθοδο εξισορρόπησης της πίεσης.....		21
Εικόνα 9	Προσδιορισμός ρεολογικών ιδιοτήτων νωπού ΑΣΣ.....		60
Εικόνα 10	Ανάμιξη των συστατικών του ΑΣΣ και χύτευση του νωπού ΑΣΣ σε μεταλλικές μήτρες τυποποιημένων διαστάσεων.....		62
Εικόνα 11	Συσκευή προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής.....		63
Εικόνα 12	Μορφές αστοχίας κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων σε θλίψη.....		63
Εικόνα 13	Τυπική διάταξη υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης.....		64
Εικόνα 14	Διαδικασία προσδιορισμού εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμίων ΑΣΣ.....		65
Εικόνα 15	Τυπική διάταξη υπολογισμού καμπτικής αντοχής σε φόρτιση 3 σημείων.....		66
Εικόνα 16	Συσκευή για τον υπολογισμό της αντοχής σε κάμψη τριών σημείων πρισματικών δοκιμίων ΑΣΣ.....		67
Εικόνα 17	16 Συμπιεσόμετρο για τον προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας και του λόγου Poisson.....		68
Εικόνα 19	Μετρητικές διατάξεις για τον προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας δοκιμίων ΑΣΣ.....		68
Εικόνα 20	Κυβικά δοκίμια 150X150X150 mm στη συσκευή ελέγχου υδατοπερατότητας.....		70
Εικόνα 21	Μανομετρικές ενδείξεις κατά τη δοκιμή ελέγχου υδατοπερατότητας.....		70
Εικόνα 22	Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της αντοχής κυβικών δοκιμίων ΑΣΣ σε Υδατοπερατότητα.....		71
Εικόνα 23	Εισαγωγή κυβικών δοκιμίων ΑΣΣ σε ειδικό κλίβανο για θερμική καταπόνηση σε διαδικασίες υψηλών θερμοκρασιών.....		72
Εικόνα 24	Εκρηκτική αποφλοίωση δοκιμίων ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης στους 3000C και 4000C.....		82
Εικόνα 25	Εκρηκτική αποφλοίωση δοκιμίων ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης στους 8000C.....		85
Εικόνα 26	Προσδιορισμός βάθους διείσδυσης κυβικών δοκιμίων ΑΣΣ κατά την πρότυπη δοκιμή Υδατοπερατότητας.....		89

## Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών υλικών και άμμων.....	25
Σχήμα 1.2 Αποτελέσματα καμπτικών δοκιμών συνθέσεων σε ηλικίες 7 και 14 ημερών.....	31
Σχήμα 1.3 Τιμές της θλιπτικής αντοχής και της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης σε MPa για διάφορα ποσοστά προσθήκης CKD. ....	33
Σχήμα 1.4 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ΑΣΣ σε ηλικία 1, 7 και 28 ημερών. ....	34
Σχήμα 1.5 Αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας συνθέσεων ΑΣΣ.....	35
Σχήμα 1.6 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ΑΣΣ σε MPa σε συνάρτηση με την ηλικία τους σε ημέρες. ....	37
Σχήμα 1.7 Εξέλιξη της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης των συνθέσεων ΑΣΣ σε MPa σε συνάρτηση με την ηλικία τους σε ημέρες. ....	37
Σχήμα 1.8 Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής ( MPa ) των συνθέσεων που περιέχουν μόνο FA σε διάφορες ηλικίες. ....	39
Σχήμα 1.9 Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής ( MPa ) των συνθέσεων που περιέχουν FA και CS σε διάφορες ηλικίες. ....	39
Σχήμα 1.10 Αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης ( MPa ) των συνθέσεων που περιέχουν μόνο FA σε διάφορες ηλικίες. ....	40
Σχήμα 1.11 Αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης ( MPa ) των συνθέσεων που περιέχουν FA και CS σε διάφορες ηλικίες.....	41
Σχήμα 1.12 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ΑΣΣ σε MPa σε συνάρτηση με την ηλικία τους σε ημέρες. ....	42
Σχήμα 1.13 Εξέλιξη της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης των συνθέσεων ΑΣΣ σε MPa σε συνάρτηση με την ηλικία τους σε ημέρες. ....	43
Σχήμα 1.14 Βάθος διείδυσης ύδατος σε συνάρτηση με τον λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T) 45	
Σχήμα 1.15 Βάθος διείδυσης ύδατος σε συνάρτηση με την θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου.....	45
Σχήμα 1.16 Βάθος διείδυσης ύδατος σε πρότυπη δοκιμή υδατοπερατότητας.....	47
Σχήμα 1.17 Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της πρότυπης δοκιμής ελέγχου σε Υδατοπερατότητα.....	49
Σχήμα 1.18 Διάγραμμα συστολής ξήρανσης σε σχέση με την ηλικία των συνθέσεων για λόγο N/T=0.44.....	52
Σχήμα 1.19 Διάγραμμα συστολής ξήρανσης σε σχέση με την ηλικία των συνθέσεων για λόγο N/T=0.33.....	52
Σχήμα 1.20 Διάγραμμα ολικής συστολής πρισματικών δοκιμών σε σχέση με την ηλικία.....	53
Σχήμα 1.21 Θλιπτική αντοχή μίγματος σε διαφορετικές θερμοκρασίες.....	55
Σχήμα 2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση τσιμέντου και λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών.....	58
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα εξέλιξης συστολής ξήρανσης συνθέσεων ΑΣΣ σε σχέση με την ηλικία τους σε ημέρες.....	76
Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση της συνολικής απώλειας μάζας συνθέσεων ΑΣΣ. ....	77
Σχήμα 3.3 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής συνθέσεων ΑΣΣ σε διάφορες ηλικίες ( MPa )......	78
Σχήμα 3.4 Σχηματική απεικόνιση Μέτρου Ελαστικότητας συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμών ηλικίας 28 ημερών. ....	79
Σχήμα 3.5 Σχηματική καταγραφή αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμών ηλικίας 90 ημερών. ....	80
Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση της καμπτικής αντοχής συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμών ηλικίας 90 ημερών. ....	81
Σχήμα 3.7 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής συνθέσεων ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών ( MPa ). ....	82
Σχήμα 3.8 Σχηματική καταγραφή της απώλειας μάζας συνθέσεων ΑΣΣ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. ....	84

Σχήμα 3.9 Σχηματική απεικόνιση όμως μεταβολής όμως ταχύτητας δέσμης υπερήχων διαμέσου δοκιμίων ΑΣΣ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. .... 87

## Πίνακες

Πίνακας 1.1 Κυριότερες δοκιμές προσδιορισμού της ρεολογικής συμπεριφοράς νωπού σκυροδέματος και χαρακτηριστικά όρια κατά τα πρότυπα. EN 206 – 9 : 2010 .....	11
Πίνακας 1.2 Κατηγορίες εξάπλωσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8:2010.....	13
Πίνακας 1.3 Κατηγορία ιξώδους $T_{500}$ (sec).....	14
Πίνακας 1.4 Οπτικός δείκτης σταθερότητας – Ερμηνεία και κριτήρια επιλογής .....	14
Πίνακας 1.5 Κατηγορίες δοκιμής χοάνης $V$ (sec).....	16
Πίνακας 1.6 Κατηγορίες διελυσσιμότητας – Δοχείο L σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-9:2010 .....	17
Πίνακας 1.7 Δακτύλιος J – κατηγορίες διελυσσιμότητας – σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-12:2010.....	19
Πίνακας 1.8 Κατηγορίες αντιστασης σε απόμιξη μέσω κοσκίνισης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350 – 11:2010.....	20
Πίνακας 1.9 Ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων .....	22
Πίνακας 1.10 Ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων ΑΣΣ ( μέσος όρος αποτελεσμάτων ). ...	23
Πίνακας 1.11 Συστατικά και αναλογίες σύνθεσης ΑΣΣ. ....	23
Πίνακας 1.12 Ρεολογικά χαρακτηριστικά σύνθεσης ΑΣΣ.....	23
Πίνακας 1.13 Ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων ΑΣΣ .....	24
Πίνακας 1.14 Αναλογίες άμμων ανά σύνθεση.....	25
Πίνακας 1.15 Ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων ΑΣΣ .....	26
Πίνακας 1.16 Συστατικά και αναλογίες συνθέσεων ΑΣΣ.....	27
Πίνακας 1.17 Αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού ρεολογικών ιδιοτήτων συνθέσεων. ....	27
Πίνακας 1.18 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού λόγω διάρρηξης σε κυλινδρικά δοκίμια σε συνάρτηση με την ηλικία τους ( MPa ). .....	28
Πίνακας 1.19 Αποτελέσματα δοκιμής προσδιορισμού της αντοχής σε θλίψη κυβικών δοκιμίων σε συνάρτηση με την ηλικία τους ( MPa ). .....	29
Πίνακας 1.20 Αποτελέσματα καμπτικής αντοχής πρισματικών δοκιμίων στην ηλικία των 28 ημερών ( MPa ). .....	29
Πίνακας 1.21 Πίνακας συστατικών συνθέσεων.....	29
Πίνακας 1.22 Πίνακας αποτελεσμάτων μηχανικών αντοχών συνθέσεων σε συνάρτηση με την ηλικία .....	30
Πίνακας 1.23 Θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών σε MPa. ....	35
Πίνακας 1.24 Αποτελέσματα δοκιμών υπολογισμού θλιπτικής αντοχής (MPa) σε διάφορες ηλικίες. ....	36
Πίνακας 1.25 Αποτελέσματα δοκιμών υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη (MPa) σε διάφορες ηλικίες. ....	36
Πίνακας 1.26 Αναλογίες συστατικών συνθέσεων ΑΣΣ.....	42
Πίνακας 1.27 Συστατικά και αναλογίες συνθέσεων ΑΣΣ.....	46
Πίνακας 1.28 Αναλογίες συστατικών συνθέσεων ελέγχου.....	48
Πίνακας 1.29 Αποτελέσματα πρότυπης δοκιμής Υδατοπερατότητας συνθέσεων.....	49
Πίνακας 1.30 Συστατικά και αναλογίες συνθέσεων ΑΣΣ.....	50
Πίνακας 1.31 Συστολή ξήρανσης σε συνάρτηση με την ηλικία των δοκιμίων ΑΣΣ. ....	51
Πίνακας 2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά των τριών κλασμάτων αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν ( $\text{kg/m}^3$ ).....	57
Πίνακας 2.2 Χημική ανάλυση (κ.β. %) του τσιμέντου και των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών. ....	59
Πίνακας 2.3 Συστατικά ( $\text{kg/m}^3$ ) και αναλογίες συνθέσεων ΑΣΣ.....	61
Πίνακας 3.1 Ρεολογικά και φυσικά χαρακτηριστικά συνθέσεων νωπού ΑΣΣ .....	74
Πίνακας 3.2 Συστολή ξήρανσης (microstrain) συνθέσεων ΑΣΣ σε διάφορες ηλικίες.....	75

Πίνακας 3.3 Ποσοστιαία απώλεια μάζας συνθέσεων ΑΣΣ μετά από 90 ημέρες .....	77
Πίνακας 3.4 Θλιπτική αντοχή συνθέσεων ΑΣΣ σε ΜΡα. ....	78
Πίνακας 3.5 Μέτρο Ελαστικότητας συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών. ....	78
Πίνακας 3.6 Αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών. ....	80
Πίνακας 3.7 Καμπτική αντοχή συνθέσεων ΑΣΣ σε ΜΡα μετά από 90 ημέρες. ....	80
Πίνακας 3.8 Μεταβολή (%) θλιπτικής αντοχής (ΜΡα) συνθέσεων ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. ....	81
Πίνακας 3.9 Εξέλιξη της απώλειας μάζας συνθέσεων ΑΣΣ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών .....	83
Πίνακας 3.10 Ταχύτητα διέλευσης δέσμης υπερήχων διαμέσου δοκιμίων ΑΣΣ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. ....	86
Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα δοκιμής Υδατοπερατότητας συνθέσεων ΑΣΣ. ....	88
Πίνακας 4.1 Ενδεικτικό κόστος λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών ΑΣΣ (τιμές 2011). ....	90
Πίνακας 4.2 Ενδεικτικές τιμές χημικών προσμίκτων που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή ΑΣΣ (τιμές 2011) .....	90
Πίνακας 4.3 Χρόνος διάρκειας εργασιών κατασκευής πλακών από συμβατικό σκυρόδεμα. ...	91
Πίνακας 4.4 Χρόνος διάρκειας εργασιών κατασκευής πλακών από ΑΣΣ.....	91
Πίνακας 4.5 Κόστος εργασιών και υλικών σε £ ( τιμές 2011 )......	92

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΟΣ ΔΕ 2022/02

**ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗ  
ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ  
ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

Τσιάρας Β.Δ. (Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Ε.)

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύνθεση μιγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) με χρήση εναλλακτικών λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών και η μελέτη τους όσον αφορά στα ρεολογικά, μηχανικά και θερμικά χαρακτηριστικά τους καθώς και στην αντοχή τους σε διαπερατότητα. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυροδέμα είναι ένα νέο είδος σκυροδέματος που χαρακτηρίζεται από την ικανότητά του να συμπυκνώνεται υπό το ίδιο βάρος του, να πληρώνει οποιονδήποτε τύπο σκυροδέτησης χωρίς απόμιξη των συστατικών του και χωρίς τη χρήση μηχανικών μέσων συμπύκνωσης (δονητής). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι δοκιμές που πραγματοποιούνται στη νωπή του φάση καθώς και οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθούνται για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των ειδικών συνθέσεων ΑΣΣ που μελετήθηκαν. Συνολικά παρασκευάστηκαν τέσσερα μίγματα ΑΣΣ, με το ένα εξ αυτών να αποτελεί το μίγμα αναφοράς και περιείχε μόνο μαρμαρόσκονη (MP) ενώ στα υπόλοιπα τρία μίγματα η μαρμαρόσκονη αντικαταστάθηκε σε ποσοστό 60% από σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων (CKD), σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (BPD) και από σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP). Ερευνήθηκε η διαφορετική επίδραση του κάθε λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες, καθώς και η πυραντίσταση του ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης, όπως και η υδατοπερατότητά του. Όλα τα μίγματα παρουσίασαν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, με τις συνθέσεις που περιείχαν BPD και CKD να εμφανίζουν την υψηλότερη αντοχή σε καμπτική επιπόνηση καθώς και το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας. Επίσης οι δύο αυτές συνθέσεις παρουσιάζουν και την υψηλότερη θλιπτική αντοχή σε όλες τις ηλικίες, ενώ η σύνθεση που περιείχε EP εμφάνισε τον υψηλότερο ρυθμό αύξησης θλιπτικής αντοχής στον χρόνο. Αναφορικά με τη συστολής ξήρανσης, η σύνθεση αναφοράς (MP) εμφάνισε την μεγαλύτερη τιμή, παρότι η μεγαλύτερη απώλεια μάζας καταγράφηκε στη σύνθεση EP. Η ίδια σύνθεση (EP) παρουσίασε και την υψηλότερη αντίσταση σε Υδατοπερατότητα. Τέλος, σχετικά με την αντίσταση έναντι πυρκαγιάς, φαίνεται ότι οι περισσότερες συνθέσεις αντέχουν μέχρι τους 300°C, με τη σύνθεση με BPD να αποδίδει την καλύτερη επίδοση ακόμη και σε μεγαλύτερη θερμοκρασία (μέχρι και τους 400°C). Γενικά, φαίνεται ότι η χρήση των εξεταζόμενων βιομηχανικών προϊόντων ΑΣΣ είναι εφικτή, μάλιστα με ιδιαίτερα θετικό πρόσημο σε μερικές περιπτώσεις. Αν μάλιστα συνυπολογιστεί η αναμενόμενη εξοικονόμηση κατασκευαστικού κόστους από τη χρήση του ΑΣΣ και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του ΑΣΣ από την αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, φαίνεται ότι η χρήση τους στο ΑΣΣ είναι τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδοτική.

**Λέξεις Κλειδιά:** αυτοσυμπυκνούμενο, περλίτης, υπέρηχοι, πυραντίσταση, υδατοπερατότητα



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
LABORATORY OF REINFORCED CONCRETE

DIPLOMA THESIS

ΕΟΣ ΔΕ 2022/02

**WATER PERMEABILITY AND FIRE RESISTANCE OF SELF  
CONSOLIDATING CONCRETE WITH ALTERNATIVE FILLERS**

Tsiaras V.D. (supervised by Badogiannis E.)

**Abstract**

The object of the present dissertation is the composition of self-compacting concrete mixtures (SCC) using alternative fine-grained fillers and their study in terms of their rheological, mechanical and thermal characteristics as well as their resistance to permeability. Self-compacting concrete is a new type of concrete characterized by its ability to compact under its own weight, to fill any type of concrete formwork without de-mixing its components and without the use of any kind of mechanical vibration. This paper presents the tests performed in the fresh phase as well as the experimental procedures followed to calculate the properties of the specific SCC compositions studied. A total of four SCC mixtures were prepared, with one of them being the reference mixture and containing only marble dust (MP) while in the other three mixtures the marble dust was replaced by 60% from rotary kiln dusting powder (CKD), valve dust dusting rotary kiln (BPD) and expanded perlite (EP) pellets. The different effect of each fine-grained filler on the rheological and mechanical properties, as well as the fire resistance of the SCC due to thermal stress, as well as its water permeability were investigated. All mixtures showed satisfactory mechanical properties and characteristics, with the compositions containing BPD and CKD showing the highest resistance to flexural stress as well as the highest measure of Elasticity. Also, these two compositions show the highest compressive strength at all ages, while the composition containing EP showed the highest rate of increase of compressive strength over time. Regarding the drying shrinkage, the reference composition (MP) showed the highest value, although the largest mass loss was recorded in the EP composition. The same composition (EP) showed the highest resistance to water permeability. Finally, regarding fire resistance, it seems that most formulations can withstand up to 300<sup>0</sup>C, with the composition with BPD giving the best performance even at higher temperatures (up to 400<sup>0</sup>C). In general, it seems that the use of the examined SCC industrial products is feasible, in fact with a very positive sign in some cases. In fact, taken into account the expected construction cost savings from the use of the SCC and the reduction of the environmental footprint of the SCC by the utilization of industrial by-products, it seems that their use in the SCC is technically, economically and environmentally efficient.

**Keywords:** self-consolidating concrete, perlite, ultrasound, fire resistance, water permeability.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής εργασίας μου θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν κατά την υλοποίησή της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Μπαδογιάννη Ε., αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, ο οποίος με τις επιστημονικές γνώσεις του, την καθοδήγηση και την υπομονή που μου επέδειξε, με βοήθησε σε όλα τα στάδια της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βουγιούκα Ε., επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ και τον κ. Τριανταφύλλου Σ., επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ για την συμμετοχή τους στην εξέταση της εργασίας μου. Είμαι ευγνώμων στον κύριο Κουνάδη Α., υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ, τον κ. Τσιβόλα Κ., υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ και την κυρία Στρατουρά Μ., υποψήφια διδάκτορα ΕΜΠ για την βοήθειά τους στην εκτέλεση του πειραματικού μέρους της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κ. Χατζηρουμπή Δ., που είναι μέλος του εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος. Επιπλέον, ευχαριστώ τις εταιρίες DOMYLCO Construction Chemicals, DIONNYSSOMARBLE GROUP και TITAN AEBE για την προσφορά υλικών και εξοπλισμού για την εκτέλεση των πειραμάτων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

# 1 Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ)

## 1.1 Εισαγωγή

Το Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (self compacting concrete) είναι ένα σχετικά νέο είδος σκυροδέματος που επινοήθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και θεωρείται ως η μεγαλύτερη επανάσταση στον τομέα των κατασκευών τα τελευταία 50 χρόνια.

Οι κύριες ιδιότητές του που το καθιστούν αναντικατάστατο στο πεδίο των εφαρμογών οπλισμένου σκυροδέματος είναι οι εξής:

1. Ικανότητα πλήρωσης: Έχει την ιδιότητα να ρέει υπό το ίδιο βάρος του χωρίς απαίτηση μηχανικής συμπίκνωσης. Με αυτό τον τρόπο δύναται να πληρώνει οποιονδήποτε ξυλότυπο ή μεταλλότυπο ανεξαρτήτως της γεωμετρίας του.
2. Ικανότητα διέλευσης. Εμφανίζει την ικανότητα να διέρχεται ακόμα και μεταξύ πολύ πυκνά τοποθετημένου οπλισμού χωρίς να δημιουργείται έμφραξη από τα χονδρόκοκκα συστατικά του και συνεπακόλουθα κενά μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού.
3. Αντίσταση σε απόμιξη των συστατικών του. Δεν χάνει την συνέχειά του κατά την παραγωγή, μεταφορά και διάστρωσή του στο σημείο εφαρμογής.

Χάρη στην ικανότητα να ρέει υπό το ίδιο βάρος του το ΑΣΣ επιτρέπει σημαντική μείωση του θορύβου κατά τις οικοδομικές εργασίες, αφού δεν απαιτείται πλέον η χρήση δονητή σε οποιαδήποτε φάση της σκυροδέτησης. Αυτό με την σειρά του καθιστά την οικοδομική δραστηριότητα, συνυφασμένη μέχρι τώρα με υψηλό επίπεδο θορύβου και οχλήσεων, πολύ περισσότερο φιλική και αποδεκτή στο κοινωνικό σύνολο διαδικασία. Ταυτόχρονα προστατεύεται η υγεία των εργαζομένων σε αυτή λόγω της έλλειψης υπερβολικού θορύβου και κραδασμών κατά την χρήση της δονητικής συσκευής, ενώ μειώνεται το κόστος του έργου.

Λόγω ανώτερων ρεολογικών χαρακτηριστικών του ΑΣΣ που μειώνουν δραστικά τα φαινόμενα εξίδρωσης και αποχρωματισμού του μίγματος, η τελική επιφάνεια των στοιχείων είναι πολύ ανώτερη ποιοτικά σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Αυτό το καθιστά αναντικατάστατο στις αρχιτεκτονικές συνθέσεις υψηλών απαιτήσεων.

Η λεπτότερη κοκκομετρία των μιγμάτων ΑΣΣ που οφείλεται στην δυνατότητα χρήσης μικρότερου μέγιστου κόκκου αδρανούς έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ανθεκτικότητα του ΑΣΣ έναντι του συμβατικού σκυροδέματος.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία του ΑΣΣ έχει και ορισμένες ιδιαιτερότητες που πρέπει να αντιμετωπίζονται με μεγάλη προσοχή. Για

παράδειγμα οι συνθέσεις ΑΣΣ είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην διακύμανση των ιδιοτήτων των συστατικών τους καθώς οι μοναδικές ιδιότητες που εμφανίζουν εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα συστατικά και την αναλογία τους(υγρασία αδρανών, κοκκομετρική διαβάθμιση, ποσότητα υπερρευστοποιητή, κ.λ.π. ).Επομένως η μελέτη σύνθεσης καθώς και οι διαδικασίες παραγωγής και μεταφοράς των μιγμάτων ΑΣΣ είναι περισσότερο πολύπλοκες από αυτές του συμβατικού σκυροδέματος και δεν επιτρέπεται παρά μία ελάχιστη αποκλίση. Για τους ίδιους ακριβώς λόγους η διαδικασία του ποιοτικού ελέγχου κατά την παραγωγή και ανάμειξη είναι αυστηρότερη και πρέπει να γίνεται από έμπειρο προσωπικό σε κατάλληλες συνθήκες. Επίσης, η αυξημένη ρευστότητα του ΑΣΣ συνεπάγεται πολύ προσεκτική επιλογή του ξυλοτύπου ώστε να μην υπάρξουν διαρροές ή υποχώρηση των τύπων λόγω της αυξημένης πίεσης που ασκείται στα τοιχώματά τους στη νωπή φάση( υδροστατική πίεση ). Τέλος, η αυξημένη αναλογία λεπτόκοκκων υλικών στα μίγματα ΑΣΣ οδηγεί σε ελαφρά αύξηση του κόστους μονάδας, κάτι που αντισταθμίζεται όμως από την απουσία ανάγκης για εξειδικευμένο προσωπικό επιφορτισμένο με την μηχανική συμπύκνωση.

## **1.2        Συστατικά ΑΣΣ**

### **1.2.1       Λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά**

Τα λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για τις ιδιότητες του ΑΣΣ. Συγκεκριμένα το μέγεθος, το σχήμα και η χημική σύσταση των κόκκων τους επηρεάζουν καίρια τα ρεολογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων ΑΣΣ και η βέλτιστη επιλογή τους αποτελεί αντικείμενο εντατικής έρευνας. Στην προσπάθεια να τεθεί το σκυροδέμα στην κυκλική οικονομία ελαχιστοποιώντας τους ρύπους και την κατανάλωση πρώτων υλών για την παραγωγή του χρησιμοποιούνται ως λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά παραπροϊόντα της βιομηχανίας όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνου, ο μετακαολίνης, κ.ά.

Σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC τα λεπτόκοκκα πληρωτικά χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

#### Κατηγορία I (ημι-αδρανή)

Είναι τα αδρανή που δεν αντιδρούν χημικά με τα υπόλοιπα στοιχεία του σκυροδέματος, για παράδειγμα σκόνη ασβεστολίθου ή γρανίτη, μαρμαρόσκονη ή διάφορες χρωστικές ουσίες που τροποποιούν το χρώμα του μείγματος π.χ οξείδιο του σιδήρου που προσδίδει το πράσινο χρώμα, κ.ά.

#### Κατηγορία II ( ποζολανικά ή δευτερεύοντα υδραυλικά )

Είναι υλικά που εμφανίζουν ποζολανική ή υδραυλική συμπεριφορά αντιδρώντας με στοιχεία του σκυροδέματος και τροποποιώντας τα ρεολογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και την ανθεκτικότητά του. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν:

- Η ιπτάμενη τέφρα σύμφωνα με το πρότυπο EN 450.Παράγεται σε μεγάλες ποσότητες σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς ως παραπροϊόν της καύσης στερεού άνθρακα. Είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο υλικό με συμπαγείς σφαιρικούς κόκκους.

Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε ασβέστιο παρουσιάζουν ποζολανική ή υδραυλική και ποζολανική συμπεριφορά

- Η σκωρία υψικαμίνου σύμφωνα με το πρότυπο BS 6699. Αποτελεί παραπροϊόν των χυτηρίων χυτοσιδήρου και είναι λεπτόκοκκο υλικό με ασθενή υδραυλική και ποζολανική συμπεριφορά.
- Η πυριτική παιπάλη σύμφωνα με το πρότυπο prEN 13263. Είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο υλικό με πολύ ισχυρή ποζολανική συμπεριφορά. Αποτελεί παραπροϊόν των βιομηχανιών παραγωγής μετάλλων πυριτίου και σιδηροπυριτικών κραμάτων. Το μέγεθος των κόκκων της πυριτικής παιπάλης (microsilica) είναι δύο τάξεις μικρότερο από αυτών του τσιμέντου και έχουν σφαιρικό σχήμα.

Η προσθήκη λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών ανεξάρτητα από την κατηγορία στην οποία ανήκουν βελτιώνει σημαντικά την αντοχή σε απόμιξη των συστατικών του ΑΣΣ και αυξάνει το συμπαγές της μικροδομής του μέσω της καλύτερης στοιβάζισης των ξηρών συστατικών του. Η ύπαρξη ποζολανικής συμπεριφοράς στα πληρωτικά υλικά εκτός των παραπάνω πλεονεκτημάτων συνεισφέρει και στην επίτευξη υψηλότερου βαθμού ανθεκτικότητας λόγω της μείωσης του ρυθμού της ενυδάτωσης του τσιμέντου.

## **1.2.2 Εναλλακτικά λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά**

### **1.2.2.1 Μαρμαρόσκονη (MP)**

Η μαρμαρόσκονη είναι ένα εξαιρετικά λεπτόκοκκο υλικό κρυσταλλικής μορφής με χαρακτηριστικό γνώρισμα την υψηλή λευκότητα. Είναι παραπροϊόν της βιομηχανίας εξόρυξης μαρμάρου και διατίθεται σε μεγάλες ποσότητες, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη αξιοποίησής της ώστε να μην απορρίπτεται στο περιβάλλον ρυπαίνοντας την ατμόσφαιρα ή το έδαφος.

### **1.2.2.2 Σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων (CKD)**

Η σκόνη αποκονίωσης περιστροφικής καμίνου είναι παραπροϊόν της βιομηχανικής παραγωγής τσιμέντου και αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη. Περιέχει επίσης σε μικρότερες ποσότητες χαλαζία, δολομίτη, αλβίτη, καολινίτη και ιλίτη.

#### 1.2.2.3 Σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (BPD)

Η σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου είναι επίσης παραπροϊόν της τσιμεντοβιομηχανίας. Το κυριότερο συστατικό της είναι ο άσβεστος ενώ σε μικρότερες ποσότητες περιέχει ανυδρίτη, σανίδινο και χλωριούχο κάλιο. Οι δευτερεύουσες αυτές ενώσεις περιέχουν θειικά ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), αλκάλια και χλωριόντα ( $\text{Cl}^-$ ). Το στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας κατά το οποίο γίνεται η αποκονίωση έχει ως αποτέλεσμα να περιέχονται στη σκόνη και υπολλείματα κλίνκερ, κυρίως  $\text{C}_2\text{S}$ .

#### 1.2.2.4 Σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP)

Ο περλίτης είναι ένα άμορφο πυριτικό υλικό με ποζολανική δράση. Τα σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη προκύπτουν από την διόγκωση του υλικού τροφοδοσίας που συλλέγεται από τα σιλό των γραμμών παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, με έμμεση θέρμανση των πολύ λεπτών σωματιδίων του περλίτη σε κατακόρυφο ηλεκτρικό φούρνο προκύπτουν τα σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη.

### 1.2.3 Αδρανή υλικά

Αδρανή ονομάζονται τα κοκκώδη υλικά που χρησιμοποιούνται σε πολύ μεγάλες ποσότητες στα τεχνικά έργα, είτε αυτούσια, είτε σε συνεργασία με κάποιο συνδετικό/συγκολλητικό υλικό χωρίς όμως να αντιδρούν με αυτό. Ανάλογα με την προέλευσή τους χωρίζονται σε φυσικά, θραυστά, τεχνητά ή ανακυκλωμένα και συνήθως αποτελούν τα οικονομικότερα υλικά των κατασκευών.

Τα φυσικά και τα συλλεκτά αδρανή αποτελούν την πλέον χρησιμοποιούμενη κατηγορία αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος με μερίδιο που προσεγγίζει το 90%. Προέρχονται από φυσικές πηγές σε αντίθεση με τα τεχνητά (συνθετικά) αδρανή που παράγονται ως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών (π.χ σκωρία υψικαμίνου, ιπτάμενη τέφρα, κλπ), ενώ τα ανακυκλωμένα αδρανή προέρχονται από αστικά απόβλητα, όπως κατεδαφίσεις κτιρίων, οδοστρωμάτων κλπ.

Ιδιαίτερη σημασία για τις ιδιότητες του ΑΣΣ διαδραματίζουν οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών που συμμετέχουν στην παρασκευή του και συγκεκριμένα η κατανομή των πόρων (κοκκομετρική διαβάθμιση), το πορώδες, το σχήμα και η τραχύτητά τους. Οι φυσικοί χάλικες τείνουν να εμφανίζουν στρογγυλεμένο σχήμα και λεία επιφάνεια. Τα θραυστά αδρανή παρουσιάζουν πιο τραχεία επιφάνεια και ανάλογα με την προέλευσή τους (ορυκτολογική) και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή

τους μπορεί να έχουν σημαντικό ποσοστό πεπλατυσμένων και επίμηκων στοιχείων υλικού. Οι παραπάνω ιδιότητες των αδρανών έχουν καθοριστική επίδραση στην πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας καθώς και στη μεταβολή του όγκου του σκληρυμένου ΑΣΣ. Λόγω της μεγαλύτερης αντοχής των αδρανών σε σχέση με τα υπόλοιπα συστατικά του σκυροδέματος δεν επηρεάζουν άμεσα τις ονομαστικές αντοχές του, αλλά εμμέσως μέσω του σχήματος και του μεγέθους τους. Δηλαδή όσο μεγαλύτερο το ποσοστό πεπλατυσμένων ή/και επιμήκων στοιχείων των αδρανών τόσο μεγαλύτερη και η τάση συσώρευσης νερού γύρω από τους κόκκους τους, φαινόμενο που ονομάζεται εξίδρωση και οδηγεί σε μείωση των αντοχών του σκυροδέματος λόγω της αυξημένης επιφάνειας της διεπιφανειακής μεταβατικής ζώνης.

Οι αυστηρές προδιαγραφές για την παραγωγή ΑΣΣ καθιστούν εξαιρετικά σημαντική την επιλογή κατάλληλων αδρανών με δεδομένη αντοχή και σωστή κοκκομετρική διαβάθμιση. Κατά κανόνα, ένα σκυρόδεμα χωρίς καλή διαβάθμιση των αδρανών της σύνθεσής του εμφανίζει μικρότερη αντίσταση σε απόμιξη κατά την συμπύκνωσή του καθώς γύρω από τα χονδρόκοκκα αδρανή και κυρίως κάτω από αυτά σχηματίζεται υμένας νερού μεγάλου πάχους. Έχει ακόμη παρατηρηθεί ότι αδρανή σφαιρικού σχήματος και χαμηλής επιφανειακής τραχύτητας είναι καταλληλότερα για την παραγωγή ΑΣΣ συνεισφέροντας στην παραγωγή μιγμάτων βελτιωμένων ρεολογικών ιδιοτήτων. Τα ανώτερα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ προϋποθέτουν την προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας λεπτόκοκκων αδρανών υλικών σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Επιπλέον, η εξασφάλιση αποδεκτής κοκκομετρικής διαβάθμισης των περιεχόμενων κλασμάτων αδρανών, που επιτρέπει τη βέλτιστη στοίβαξή τους, συνεισφέρει στην παραγωγή σκυροδέματος χαμηλής περιεκτικότητας σε περιεχόμενο εγκλωβισμένο αέρα και συνεπώς αυξημένης αντοχής.

#### **1.2.4 Τσιμέντο**

Το τσιμέντο Portland είναι υδραυλικό τσιμέντο που παράγεται με την άλεση του κλίνκερ που αποτελείται από κόκκους διάμετρο 5 – 25 mm κυρίως από υδραυλικά πυριτικά άλατα του ασβεστίου κι ένα μικρό ποσοστό θεικών αλάτων ασβεστίου. Το κλίνκερ αποτελείται κυρίως από τέσσερις σύνθετες χημικές ενώσεις (οξειδία) με τις εξής αναλογίες: 40 – 80 % C<sub>3</sub>S (πυριτικό τριασβέστιο), 0 – 30 % C<sub>2</sub>S (πυριτικό διασβέστιο), 7 – 15 % C<sub>3</sub>A (αργιλικό τριασβέστιο) και 4 – 15 % C<sub>4</sub>AF (αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο). Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι σε μορφή γκριζοπράσινης σκόνης με διαστάσεις κόκκων 1 – 50 μm και παράγεται με συνάλεση των κλίνκερ με μικρή ποσότητα άλλων προσμίξεων (π.χ ιπτάμενη τέφρα, γύψος, θηραϊκή γη κ.ά.).

#### **1.2.5 Χημικά πρόσμικτα**

Η επίτευξη των ειδικών ρεολογικών χαρακτηριστικών που προσδίδουν τις μοναδικές ιδιότητες του ΑΣΣ απαιτεί την εφαρμογή ειδικών χημικών ουσιών που τροποποιούν δραστικά την συμπεριφορά των στοιχείων του μίγματος. Αυτές οι χημικές

ενώσεις είναι το αποτέλεσμα των επιτευγμάτων της χημικής βιομηχανίας και εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες με βάση την δράση τους:

#### 1.2.5.1 Υπερρευστοποιητές ή υψηλής κλίμακας μειωτές νερού

Οι υπερρευστοποιητές νέας γενιάς είναι συμπολυμερή πολυακρυλικής, πολυκαρβοξυλικής και πολυαιθυλενικής βάσης που προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την ανάμιξη και αυξάνουν την ρευστότητά του χωρίς να τροποποιούν την πήξη και την σκλήρυνσή. Η χρήση υπερρευστοποιητή έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η επιφάνεια των κενών αέρα και με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η ρευστότητα και μειώνεται η τάση διαρροής. Οι υπερρευστοποιητές νέας γενιάς αντί για την ηλεκτροστατική απόθεση ως μηχανισμό διασποράς του τσιμέντου λειτουργούν με παρεμπόδιση των ενεργών θέσεων συγκρατώντας περισσότερο την εργασιμότητα σε σχέση με τους παλαιότερης γενιάς υπερρευστοποιητές σουλφονικής ναφθαλίνης ή μελαμίνης. Μία παρενέργεια των υπερρευστοποιητών νέας γενιάς είναι ο εγκλωβισμός αέρα στο μίγμα του νωπού σκυροδέματος ακόμη και σε ποσοστό 8% χωρίς όμως να παραβιάζονται καθοριστικά οι τεχνικοί κανονισμοί της παραγωγής ΑΣΣ.

#### 1.2.5.2 Οι χημικές ουσίες τροποποίησης του ιξώδους (VMA)

Είναι χημικές ουσίες που αυξάνουν το ιξώδες του μίγματος και διευκολύνουν την απομάκρυνση μεγάλης ποσότητας νερού από τα μίγματα ΑΣΣ μέσα από τη διαδικασία της φυσικής προσρόφησης. Για τον λόγο αυτό τα μίγματα που περιέχουν τροποποιητή του ιξώδους εμφανίζουν θιξοτροπική συμπεριφορά δηλαδή η τσιμεντόπαστα διατηρεί τα συστατικά της σε μορφή αιωρήματος χωρίς να χάνεται η συνοχή. Οι δύο βασικοί τύποι χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται είναι τα υδρολυτικά άμυλα και τα πολυμερή ακρυλικής βάσης. Η ταυτόχρονη χρήση ενός υπερρευστοποιητή με έναν παράγοντα ρύθμισης του ιξώδους αυξάνει δραστικά την παραμορφωσιμότητα και την εργασιμότητα της σύνθεσης συντελώντας στην αποτροπή των φαινομένων απόμιξης.

#### 1.2.5.3 Αερακτικά

Μία ειδική κατηγορία χημικών προσμίκτων αποτελούν τα αερακτικά. Πρόκειται για χημικές ουσίες που προστίθενται στο μίγμα σε πολύ μικρές ποσότητες και αυξάνουν την περιεκτικότητά του σε αέρα. Έτσι αυξάνεται η αντοχή του μίγματος σε συνεχείς κύκλους ψύξης-απόψυξης, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται η εργασιμότητα. Απαιτείται προσοχή στην ποσότητα αερακτικών που προστίθεται καθώς η αύξηση του περιεχόμενου αέρα στο μίγμα μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια σε αντοχή, ενώ τα τασιενεργά αερακτικά επιβραδύνουν την ενυδάτωση του τσιμέντου.





Εικόνα 1 Υπερρυστοποιητής ANHYDRON

### 1.3 Ρεολογικά χαρακτηριστικά ΑΣΣ

Η ικανότητα πλήρωσης οποιουδήποτε τύπου χύτευσης ( ξυλότυπος, μεταλλότυπος, κ.ά ) χωρίς κενά και χωρίς την ανάγκη μηχανικής δόνησης αποτελεί βασικό γνώρισμα του ΑΣΣ. Για την επίτευξή της απαιτείται η ύπαρξη αυξημένης ρευστότητας στο νωπό ΑΣΣ η οποία είναι συγκρίσιμη με αυτή ενός ρευστού μέσου. Αυτό επιτυγχάνεται με έλεγχο του λόγου νερό προς τσιμέντο και την προσθήκη υπερρυστοποιητή. Ταυτόχρονα, το νωπό μίγμα θα πρέπει να διατηρεί επαρκή συνεκτικότητα, ώστε να μην υπάρξει απόμιξη των συστατικών του ( χονδρόκοκκα αδρανή – τσιμεντόπαστα ), καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος έμφραξης και απώλειας της ικανότητας διέλευσης του ΑΣΣ από σημεία πυκνά διατεταγμένου οπλισμού ή διατομές κλειστής γεωμετρίας. Η αντίσταση στην απόμιξη προϋποθέτει την αύξηση του ιξώδους που επιτυγχάνεται είτε με μείωση του λόγου νερού προς συνολικά τσιμεντοειδή υλικά, είτε με προσθήκη ενός χημικού προσμίκτου που ονομάζεται τροποποιητής ιξώδους ( VMA ). Ο έλεγχος της παράλληλης επίτευξης των δύο παραπάνω συχνά αντικρουόμενων ιδιοτήτων του ΑΣΣ, εξασφαλίζεται με εμπειρικές δοκιμές οι κυριότερες εκ των οποίων αναφέρονται στον **Πίνακα 1.1**.

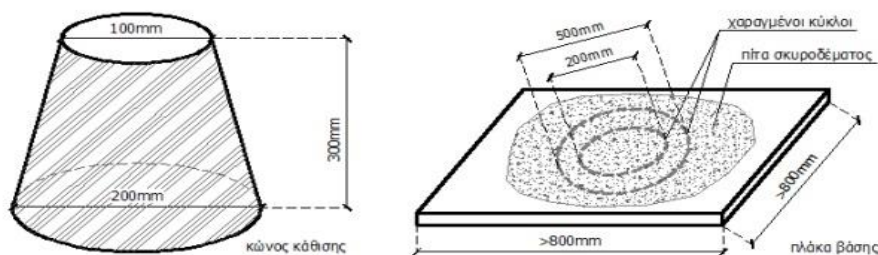
**Πίνακας 1.1** Κυριότερες δοκιμές προσδιορισμού της ρεολογικής συμπεριφοράς νωπού σκυροδέματος και χαρακτηριστικά όρια κατά τα πρότυπα. EN 206 – 9 : 2010

Δοκιμή	Χαρακτηριστικά όρια
Εξάπλωση ( slump – flow test )	550 mm έως 650 mm → SF1 660 mm έως 750 mm → SF2 760 mm έως 850 mm → SF2
Χρόνος εξάπλωσης $t_{500}$	VS1 : $t_{500} < 2.0$ sec: VS2 : $t_{500} \geq 2.0$ sec
Χοάνη V ( V – funnel test )	VF1 : $t_v < 9.0$ sec VF2 : $9.0 \leq t_v \leq 25.0$ sec
Δοχείο L	PL1 : $H_2/H_1 \geq 0.80$ ( με 2 ράβδους ) PL2 : $H_2/H_1 \geq 0.80$ ( με 3 ράβδους )
Δοχείο U	$H_2 - H_1 \leq 30$ mm
Δακτύλιος J ( J – ring test )	PJ1 : $H_2 - H_1 \leq 10$ ( με 12 ράβδους ) PJ2 : $H_2 - H_1 \leq 10$ ( με 16 ράβδους )
Σταθερότητα μέσω κοσκίνισης ( sieve segregation test )	SR1 : $SI ( \% ) \leq 20$ % SR2 : $SI ( \% ) \leq 15$ %
Οπτικός δείκτης σταθερότητας ( ΟΔΣ )	Από 0 έως 4 με φθίνουσα κατανομή ως προς τη σταθερότητα

### 1.3.1 Ρεολογικά χαρακτηριστικά ΑΣΣ με πρόσθετα - Βιβλιογραφική ανασκόπηση

#### Δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης (Slump – flow test)

Η δοκιμή συνίσταται στην πλήρωση ενός πρότυπου κώνου Abrams χωρίς συμπύκνωση. Στη συνέχεια ο κώνος ανασηκώνεται κατακόρυφα για διάστημα 3 δευτερολέπτων προσέχοντας να μην περιστραφεί ή μετακινηθεί πλευρικά. Το σκυρόδεμα ρέει ελεύθερα και αφού σταθεροποιηθεί μετρούνται δύο κάθετες μεταξύ τους διαμέτροι της τελικώς εξαπλωμένης επιφάνειας σκυροδέματος και υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Το αποτέλεσμα συγκρίνεται με τα στοιχεία του **Πίνακα 1.2.**, ενώ ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της δοκιμής φαίνεται στην **Εικόνα 2.**



Εικόνα 2 Διατάξεις δοκιμής ελεύθερης εξάπλωσης

**Πίνακας 1.2 Κατηγορίες εξάπλωσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8:2010.**

Κατηγορία	Εξάπλωση (mm)
SF1	550 έως 650
SF2	660 έως 750
SF3	760 έως 850

Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της ανεμπόδιστης εξάπλωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων από το σημείο της έγχυσης. Από την απλή παρατήρηση της εξαπλωμένης επιφάνειας προκύπτει και ο οπτικός δείκτης σταθερότητας του μίγματος. Για διαδοχικές δοκιμές ανεμπόδιστης εξάπλωσης η διαφορά των τιμών δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 50 mm.

### **Χρόνος εξάπλωσης $T_{500}$**

Γίνεται χρονομέτρηση (με ακρίβεια ενός δεκάτου του δευτερολέπτου) η χρονική διάρκεια από το ανασήκωμα του κώνου Abrams κατά τη δοκιμή εξάπλωσης μέχρι οποιοδήποτε άκρο της εξαπλωμένης επιφάνειας να φτάσει τη διάμετρο των 500 mm. Ο χρόνος  $t_{500}$  είναι μία ένδειξη της ταχύτητας ροής επομένως συνδέεται με το ιξώδες του μίγματος. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος  $t_{500}$  τόσο μεγαλύτερο είναι και το ιξώδες του μίγματος και αντιστρόφως. Χρόνοι μικρότεροι των δύο δευτερολέπτων αφορούν μίγματα χαμηλού ιξώδους, ενώ χρόνοι μεγαλύτεροι από πέντε δευτερόλεπτα εμφανίζονται σε μίγματα υψηλού ιξώδους. Η κατάταξη των συνθέσεων ΑΣΣ γίνεται με βάση τις κατηγορίες του **Πίνακα 1.3**.

**Πίνακας 1.3 Κατηγορία ιξώδους T<sub>500</sub> (sec)**

Κατηγορία	Χρόνος εξάπλωσης t <sub>500</sub>
VS1	<2.0
VS2	≥2.0

**Οπτικός δείκτης σταθερότητας (ΟΔΣ)**

Η εξαπλωμένη πίτα αξιολογείται οπτικά από έναν έμπειρο παρατηρητή και βαθμολογείται με 0,1,2 ή 3 , ο οποίος χαρακτηρίζει την σταθερότητα του μίγματος σύμφωνα με τον **Πίνακα 1.4**. Στην **Εικόνα 3** παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα της δοκιμής ανεμπόδιστης εξάπλωσης για κάθε τιμή του οπτικού δείκτη σταθερότητας.

**Πίνακας 1.4 Οπτικός δείκτης σταθερότητας – Ερμηνεία και κριτήρια επιλογής**

Τιμή ΟΔΣ	Ερμηνεία	Κριτήρια
0	Υψηλή σταθερότητα μίγματος	Απουσία ενδείξεων απόμιξης στην εξαπλωμένη επιφάνεια
1	Σταθερό μίγμα	Απουσία στεφάνης κονιάματος ή σωρού αδρανών στην εξαπλωμένη επιφάνεια
2	Ασταθές μίγμα	Μικρή στεφάνη κονιάματος (<10 mm ) ή σωρός αδρανών ή συνδυασμός τους στην εξαπλωμένη επιφάνεια
3	Υψηλή αστάθεια μίγματος	Εμφανής απόμιξη ή παρουσία μεγάλης στεφάνης κονιάματος (>10 mm ) ή μεγάλης σωρού αδρανών στο κέντρο της εξαπλωμένης πίτας ή συνδυασμός τους



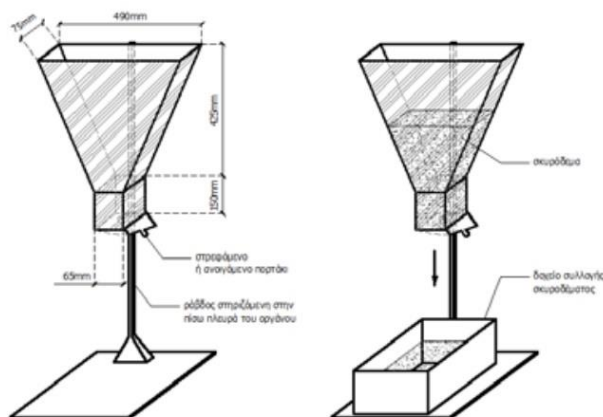
Εικόνα 3 Παραδείγματα βαθμονόμησης ΟΔΣ σε εξαπλωμένα μίγματα

Τιμή του ΟΔΣ 0 ή 1 σημαίνει ότι το μίγμα ΑΣΣ φαίνεται σταθερό και κατάλληλο για εφαρμογή. Τιμή του ΟΔΣ 2 ή 3 αποτελεί ένδειξη ότι ελλοχεύει ο κίνδυνος απόμιξης οπότε απαιτείται τροποποίηση του μίγματος από τον παραγωγό ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα. Λόγω του ότι ο ΟΔΣ βασίζεται αποκλειστικά σε οπτική παρατήρηση είναι εύλογο πως δεν πρόκειται για μία αντικειμενική διαδικασία ελέγχου. Εξυπακούεται πως πρόκειται για ένα πολύ χρήσιμο και εξαιρετικά εύχρηστο εργαλείο ελέγχου στην παραγωγή ΑΣΣ, όμως δεν μπορεί να βασιστεί σε αυτό η απόρριψη ή αποδοχή ενός μίγματος ΑΣΣ. Σε κάθε περίπτωση ο ΟΔΣ εφαρμόζεται σε μίγματα που παρουσιάζουν εξαρχής κίνδυνο εξίδρωσης διαφορετικά δεν έχει νόημα η εφαρμογή του. Επίσης, ακόμη κι αν ένα μίγμα ΑΣΣ δεν παρουσιάζει φαινόμενα απόμιξης τίποτα δεν διασφαλίζει πως αυτό δεν θα συμβεί μεταγενέστερα υπό τις ίδιες ή διαφορετικές συνθήκες.

### Δοκιμή χοάνης V (V-Funnel test)

Πραγματοποιείται με συσκευή τύπου χοάνης ορθογωνικής διατομής που φέρει θύρα εκροής στο κάτω μέρος της. Η χοάνη πληρώνεται με νωπό σκυρόδεμα και καταγράφεται ο χρόνος εκροής  $t_v$  (s) από τη χρονική στιγμή ανοίγματος της θύρας εκροής έως τη χρονική στιγμή που ο παρατηρητής που στέκεται πάνω από τη χοάνη δει φως στη θέση της θύρας εκροής. Στη συνέχεια η συσκευή επαναπληρώνεται με το ίδιο υλικό και με την παρέλευση πέντε λεπτών σε συνθήκες ηρεμίας ανοίγει εκ νέου η θύρα εκροής και επανυπολογίζεται ο χρόνος  $t_v$  5 min. Η δεύτερη φάση της δοκιμής ( $t_v$

5 min) δίνει μία εκτίμηση για την αντίσταση του μίγματος σε απόμιξη. Μεγαλύτεροι χρόνοι εκροής ( $t_v$  5 min ) συνεπάγονται πιθανά φαινόμενα απόμιξης. Οι κατηγορίες της δοκιμής χοάνης V παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.5** και η πειραματική διάταξη της δοκιμής στην **Εικόνα 2**.



Εικόνα 4 Εργαστηριακή διάταξη δοκιμής χοάνης V

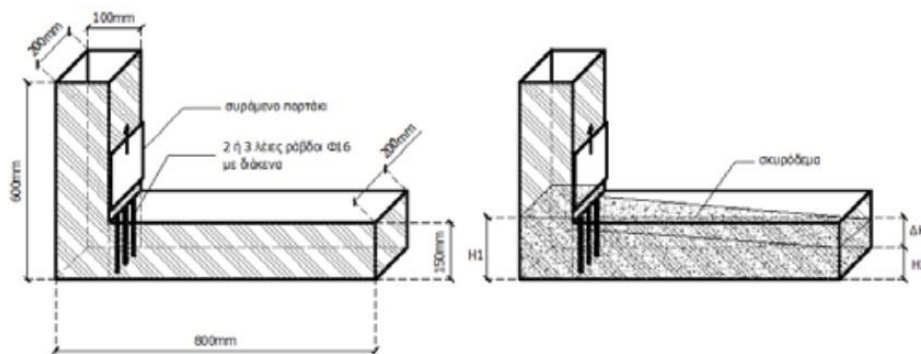
**Πίνακας 1.5 Κατηγορίες δοκιμής χοάνης V (sec)**

Κατηγορία	Χρόνος εκροής $t_v$ (s)
VF1	< 9.0
VF2	9.0 έως 25.0

#### **Δοκιμή δοχείου L (L-Box test)**

Η δοκιμή πραγματοποιείται με συσκευή που αποτελείται από δοχείο ορθογωνικής διατομής σχήματος L με ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο τμήμα. Τα δύο τμήματα χωρίζονται από κινούμενη θύρα μπροστά από την οποία είναι τοποθετημένες δύο ή τρεις κατακόρυφες λείες ράβδοι χάλυβα που προσομοιώνουν τον χάλυβα του σπλισμού. Το κατακόρυφο τμήμα του δοχείου πληρώνεται με ΑΣΣ και αμέσως μετά η θύρα ανασηκώνεται αφήνοντας το μίγμα να κινηθεί προς το οριζόντιο τμήμα της συσκευής. Με το πέρας της ροής σημειώνεται ως ποσοστό επί τοις εκατό ο λόγος των υψών του μίγματος στο

οριζόντιο και κατακόρυφο δοχείο της συσκευής ο οποίος αποτελεί δείκτη της ικανότητας διέλευσης του ΑΣΣ διαμέσου των οπλισμών. Τυχόν εγκλωβισμός χονδρόκοκκων συστατικών πίσω από τις ράβδους και απόμιξη στο άκρο του οριζοντίου τμήματος εντοπίζονται οπτικά. Η αρχική δοκιμή πραγματοποιείται με τρεις ράβδους και σε περίπτωση αποτυχίας επαναλαμβάνεται με δύο ράβδους. Σε περίπτωση που η δοκιμή αποτυγχάνει και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται τροποποίηση των αναλογιών του μίγματος ώστε να βελτιωθεί η σταθερότητά του. Οι κατηγορίες διελευσιμότητας με βάση τη δοκιμή δοχείου L αναγράφονται στον **Πίνακα 1.6**, ενώ η συσκευή με την οποία πραγματοποιείται η δοκιμή στην **Εικόνα 5**.



Εικόνα 5 Συσκευή δοκιμής δοχείου L

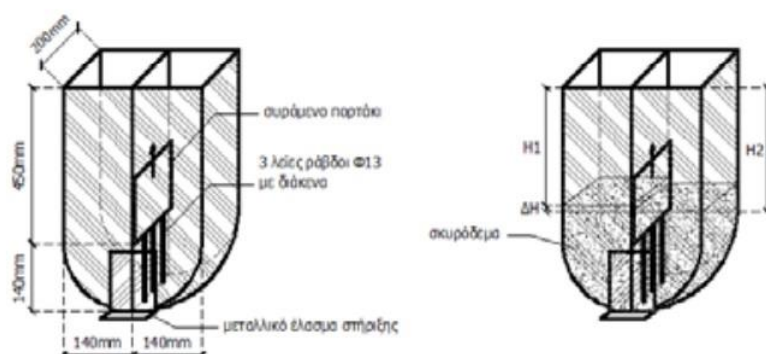
**Πίνακας 1.6 Κατηγορίες διελευσιμότητας – Δοχείο L σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-9:2010**

Κατηγορία	Λόγος Υψών
PL1	$\geq 0.80$ με 2 ράβδους
PL2	$\geq 0.80$ με 3 ράβδους

#### **Δοκιμή δοχείου U (U- Box test)**

Η δοκιμή πραγματοποιείται με συσκευή που αποτελείται από δοχείο ορθογωνικής – κυκλικής διατομής σχήματος U, με δύο κατακόρυφα διαμερίσματα. Τα δύο διαμερίσματα χωρίζονται από κινούμενη θύρα, μπροστά από την οποία είναι τοποθετημένες τρεις κατακόρυφες ράβδοι χάλυβα. Το ένα διαμέρισμα του δοχείου (από την αντίθετη πλευρά των ράβδων) πληρώνεται με ΑΣΣ και αμέσως μετά η θύρα ανασηκώνεται επιτρέποντας στο μίγμα να διαρρεύσει στο άλλο διαμέρισμα της συσκευής έως ότου ισορροπήσει με την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων. Με το πέρας της ροής υπολογίζεται η

υψομετρική διαφορά των δύο διαμερισμάτων. Η πειραματική διάταξη με την οποία πραγματοποιείται η δοκιμή παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6**.



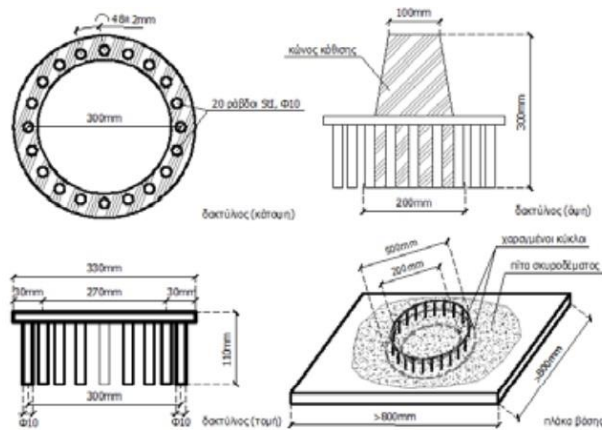
Εικόνα 6 Χαρακτηριστικά δοχείου U-box δοκιμής U

Η μέγιστη επιτρεπόμενη υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο διαμερισμάτων είναι ίση με 30 mm. Αν το ΑΣΣ ρέει ανεμπόδιστα (ως νευτώνειο ρευστό) τότε η στάθμη στα δύο διαμερίσματα θα βρίσκεται στο ίδιο ύψος. Μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές αποτελούν ένδειξη της ικανότητας διέλευσης του ΑΣΣ ή του βαθμού δυσχέρειας αυτής διαμέσου των οπλισμών. Σε περίπτωση εγκλωβισμού χονδρόκοκκων αδρανών πίσω από τις ράβδους οπλισμού και πιθανή απόμιξη του μίγματος στο άκρο του οριζοντίου τμήματος απαιτείται τροποποίηση των αναλογιών του μίγματος ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότά του.

### Δοκιμή δακτυλίου J (J-Ring test)

Πραγματοποιείται με έναν πρότυπο κώνο του Abrams που περιβάλλεται από δακτύλιο με κάθετες λείες ράβδους. Ο κώνος πληρώνεται με ΑΣΣ σε μία φάση χωρίς συμπύκνωση και στη συνέχεια ανασηκώνεται ώστε το ΑΣΣ να διαρρεύσει διαμέσου των ράβδων. Η μέση τιμή δύο διαμέτρων της τελικής εξαπλωμένης επιφάνειας σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις ονομάζεται ροή διαμέσου του δακτυλίου J. Η δοκιμή εφαρμόζεται με δεκαέξι κατακόρυφες ράβδους και σε περίπτωση αποτυχίας επαναλαμβάνεται με δώδεκα κατακόρυφες ράβδους. Στον **Πίνακα 1.7** περιγράφονται οι κατηγορίες κατάταξης δοκιμής δακτυλίου J. Η συσκευή του Δακτυλίου J παρουσιάζεται στην **Εικόνα 7**.





Εικόνα 7 Διατάξεις δοκιμής δακτύλιου J

**Πίνακας 1.7 Δακτύλιος J – κατηγορίες διειλευσιμότητας – σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-12:2010**

Κατηγορία	Λόγος υψών
PJ1	$\leq 10$ με 12 ράβδους
PJ2	$\leq 10$ με 16 ράβδους

Υψηλότερες τιμές εξάπλωσης διαμέσου του δακτυλίου J συνεπάγονται αφενός δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων από το σημείο έγχυσης και αφετέρου δυνατότητα ταχύτερης πλήρωσης τύπων ή δοκιμίων. Η διαφορά μεταξύ της εξάπλωσης διαμέσου του δακτυλίου J και της ανεμπόδιστης εξάπλωσης, όπως προκύπτει από τη δοκιμή εξάπλωσης, αποτελεί ένδειξη του βαθμού στον οποίο παρεμποδίζεται η διέλευση διαμέσου ράβδων οπλισμού. Με την ίδια δοκιμή προσδιορίζεται επίσης και η πιθανότητα έμφραξης μίγματος ΑΣΣ για δεδομένη εφαρμογή. Εάν τα χονδρόκοκκα αδρανή εντός του δακτυλίου εγκλωβίζονται στις ράβδους τότε θα πρέπει να αναπροσαρμοστεί η αναλογία των συστατικών του μίγματος καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος έμφραξης.

#### **Δοκιμή αντίστασης σε απόμιξη (Sieve segregation resistance)**

Δείγμα νωπού σκυροδέματος ηρεμεί για 15 λεπτά και παρατηρούνται τυχόντα φαινόμενα εξίδρωσης. Αμέσως μετά, το άνω μέρος του δείγματος εκχύνεται σε κόσκινο με τετραγωνικά ανοίγματα 5 mm, άνωθεν δοχείου υποδοχής και παραμένει σε ηρεμία για δύο λεπτά. Στη συνέχεια το υλικό που διαπέρασε το κόσκινο ζυγίζεται και υπολογίζεται η ποσοστιαία απόμιξη.

Η ποσοστιαία απόμιξη , SR (%) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$SR (\%) = (W_{ps} - W_p) \times 100 / W_c$$

Όπου

$W_{ps}$  το μικτό βάρος του δοχείου υποδοχής ( μαζί με το κοσκινισμένο υλικό )

$W_p$  το καθαρό βάρος του δοχείου υποδοχής

$W_c$  το μικτό βάρος του πληρωμένου με υλικό κοσκίνου ( πριν την κοσκίνιση )

Η ποσοστιαία απόμιξη SR ( % ) που υπολογίζεται από τον παραπάνω τύπο συγκρίνεται με τις τιμές του **Πίνακα 1.8** και κατηγοριοποιείται αναλόγως.

**Πίνακας 1.8 Κατηγορίες αντιστάσης σε απόμιξη μέσω κοσκίνισης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350 – 11:2010**

Κατηγορία	Απομιγμένο ποσοστό ( % )
SR1	$\leq 20$
SR2	$\leq 15$

#### **Δοκιμή προσδιορισμού πυκνότητας νωπού σκυροδέματος**

Κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο όγκου τουλάχιστον πέντε λίτρων πληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία φάση χωρίς ανάδευση ή μηχανική συμπύκνωση. Στη συνέχεια το δοχείο ζυγίζεται και προσδιορίζεται η μάζα ( $m_2$ ). Η πυκνότητα υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$D = ( m_2 - m_1 ) / V$$

Όπου

D : η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος σε  $kg/m^3$

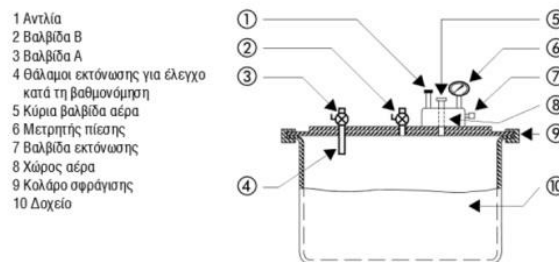
$m_1$ : η μάζα του άδειου δοχείου σε  $kg/m^3$

$m_2$ : η μάζα του δοχείου πληρωμένη με σκυρόδεμα σε  $kg/m^3$

V : ο όγκος του δοχείου σε  $m^3$

## Δοκιμή προσδιορισμού περιεχόμενου αέρα

Η περιεκτικότητα του νωπού σκυροδέματος σε αέρα βασίζεται στη μέθοδο εξισορρόπησης της πίεσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350 – 7. Για τη δοκιμή χρησιμοποιείται μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο χωρητικότητας τουλάχιστον πέντε λίτρων το οποίο αφού πληρωθεί με σκυρόδεμα και χωρίς να προηγηθεί οποιαδήποτε ανάμιξη ή συμπύκνωση σφραγίζεται αεροστεγώς. Η βασική αρχή της δοκιμής είναι η εξισορρόπηση ενός γνωστού όγκου αέρα με δεδομένη πίεση με τον άγνωστο όγκο του αέρα που παραμένει εγκλωβισμένος στο σκυρόδεμα. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην **Εικόνα 8**.



Εικόνα 8 Πειραματική διάταξη για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε αέρα του ΑΣΣ με τη μέθοδο εξισορρόπησης της πίεσης.

Όπως είναι αναμενόμενο, η προσθήκη τσιμεντοειδών ή βιομηχανικών παραπροϊόντων στο ΑΣΣ αναμένεται να επηρεάζει τις ρεολογικές του ιδιότητες. Οι El – Mohsen et al διερεύνησαν τις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες συνθέσεων ΑΣΣ που περιείχαν σκόνη αποκονίωσης της περιστροφικής καμίνου (CKD) ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό. Τα μίγματα που προέκυψαν για ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 10 %, 20 %, 30 % και 40 % με CKD εμφάνισαν τιμές ανεμπόδιστης εξάπλωσης (slump – flow test) 665, 670, 645 και 655 mm αντίστοιχα. Αυτή η μείωση της εξάπλωσης με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου με CKD εξηγείται από την υψηλή υδατοαπορροφητικότητα του CKD λόγω της αφυδατωμένης φύσης του υλικού. Με τον τρόπο αυτό δεσμεύεται μεγαλύτερο μέρος του νερού ανάμιξης από το CKD και η ρευστότητα του μίγματος ελαττώνεται. Οι αντίστοιχοι χρόνοι  $t_{500}$  υπολογίστηκαν στα 4 δευτερόλεπτα για κάθε μίγμα. Η ικανότητα διέλευσης του ΑΣΣ, που εκτιμήθηκε από τη δοκιμή δοχείου L, προσδιορίστηκε σε 0.80, 0.79, 0.82 και 0.85 για κάθε σύνθεση αντίστοιχα.

Οι Najim et al μελέτησαν την συμπεριφορά συνθέσεων ΑΣΣ που περιείχαν ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό CKD σε διαφορετικά ποσοστά. Η ικανότητα πλήρωσης του ΑΣΣ εκτιμήθηκε με τη δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης ( slump – flow test ), ενώ το ιξώδες των συνθέσεων συνεκτιμήθηκε από τις δοκιμές του χρόνου εξάπλωσης (  $t_{500}$  ) και τη δοκιμή δακτυλίου J ( J – Ring test ). Οι δύο αυτές δοκιμές δεν εκτιμούν άμεσα

τη συνεκτικότητα του ΑΣΣ, αλλά εμμέσως μέσω του ρυθμού της ροής του. Τέλος, τα μίγματα υπεβλήθησαν σε δοκιμή διαχωρισμού μέσω κοσκίνισης ( sieve segregation test ), με την οποία εκτιμώνται η αντοχή του ΑΣΣ σε απόμιξη των συστατικών του (χονδρόκοκκα αδρανή – τσιμεντοπολτός ) κατά την μεταφορά, διάσπρωση και συμπύκνωσή του υπό το ίδιο βάρος του αλλά αποτελούν και ένα δείκτη της ποιότητας και της ομοιογένειάς του. Στη μελέτη που εξετάζεται, παρασκευάστηκαν τρεις συνθέσεις ΑΣΣ με ποσοστά CKD 10 %, 20 % και 30 % αντίστοιχα και ένα μίγμα αναφοράς που δεν περιείχε εναλλακτικό πληρωτικό υλικό ( 0 % CKD ). Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 1.9** όλες οι συνθέσεις πληρούν τα κριτήρια του EFNARC ως προς την ικανότητα πλήρωσης ( δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης ), ενώ η συνεκτικότητα των μιγμάτων είναι επαρκής με τα με κάθε σύνθεση ( T<sub>500</sub> και J – Ring test ) να ανήκει στις κατηγορίες VS1 και VF2 αντίστοιχα. Παρατηρείται η επιδείνωση των ρεολογικών ιδιοτήτων του ΑΣΣ όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με CKD. Αντιθέτως, η αντίσταση στην απόμιξη βελτιώνεται με την αύξηση της χρήσης CKD ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό. Αυτό μπορεί να εξηγείται από την σημαντική αύξηση του ιξώδους όσο η περιεκτικότητα CKD στα μίγματα αυξάνεται.

**Πίνακας 1.9 Ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων**

Σύνθεση	Εξάπλωση ( mm )	T <sub>500</sub>	J – Ring ( mm )	V – funnel ( sec )	Sieve segregation ( % )
SCC0	730	3	690	7	9
SCC 10% CKD	710	6	660	13	3.6
SCC 20% CKD	680	7	620	16	2.8
SCC 30% CKD	640	9	560	19	2.3

Οι Benaicha et al διερεύνησαν την επίδραση που έχει η εφαρμογή αερακτικών προσθέτων στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων ΑΣΣ. Για το σκοπό αυτόν παρασκευάστηκαν συνθέσεις ΑΣΣ με σταθερές αναλογίες συστατικών, αμετάβλητο λόγο νερού προς τσιμέντο και διαφορετική περιεκτικότητα σε αερακτικό ως προς την ποσότητα τσιμέντου. Συγκεκριμένα, οι συνθέσεις περιείχαν 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 6 %, 7 %, 8 %, 9 %, 10 %, 11 %, 12 %, 13 %, 14 %, 15 %, 16 %, 17 %, 18 %, 19 % και 20 % αερακτικό ως προς τη σταθερή ποσότητα τσιμέντου στο μίγμα και συγκρίθηκαν με το μίγμα αναφοράς που δεν περιείχε ποσότητα αερακτικού χημικού προσθέτου.

Η δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης ( slump – flow test ) έδωσε αποτελέσματα που κυμαίνονται από 670 mm (ελάχιστη) έως 854 mm ( μέγιστη ) με μέση τιμή 758.59 mm. Από τη δοκιμή αντίστασης σε απόμιξη μέσω κοσκίνισης ( sieve segregation test ) προέκυψαν ποσοστά από 5.7 % έως 10.9 % με μέση τιμή ελέγχου το 7.91 %. Η δοκιμή δοχείου V ( V – Funnel test ) παρήγαγε τιμές από 7 ( sec ) έως 32 ( sec ) με ενδιάμεση τιμή τα 16.71 ( sec ). Αντίστοιχα, η δοκιμή δοχείου L ( L – box test ) παρουσίασε εύρος τιμών για το λόγο υψών από 0.8 έως 1.0 με ενδιάμεση τιμή το 0.90. Προκύπτει το

συμπέρασμα πως όλες οι συνθέσεις επέδειξαν ρεολογικά χαρακτηριστικά απολύτως συμβατά με τις κανονιστικές απαιτήσεις του EFNARC. Τα αποτελέσματα των ρεολογικών δοκιμών της σύνθεσης αποτυπώνονται στον **Πίνακα 1.10**.

**Πίνακας 1.10** Ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων ΑΣΣ ( μέσος όρος αποτελεσμάτων ).

Σύνθεση	Μέση τιμή δοκιμής			
	Ανεμπόδιση εξάπλωση (mm)	Χοάνη V (sec)	Δοχείο L (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	Αντίσταση σε απόμιξη μέσω κοσκίνισης (%)
ΑΣΣ	758.59	16.71	0.90	7.91

Οι Surya et al εξέτασαν την συμπεριφορά του ΑΣΣ σε υψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, εξέτασαν την εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής μίας σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 35 % ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό σε θερμοκρασίες 200<sup>0</sup>C, 400<sup>0</sup>C, 600<sup>0</sup>C και 800<sup>0</sup> C. Η σύνθεση του μίγματος αποτυπώνεται στον **Πίνακα 1.11**. Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ προσδιορίστηκαν με τις εμπειρικές δοκιμές ελεύθερης εξάπλωσης ( slump flow test ), δοχείου L ( L – box ), δοχείου U ( U – box ) και χοάνης V ( V – Funnel test ). Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στον **Πίνακα 1.12**. Είναι σαφές ότι η σύνθεση ΑΣΣ πληροί τα πρότυπα του EFNARC.

**Πίνακας 1.11** Συστατικά και αναλογίες σύνθεσης ΑΣΣ.

Σύνθεση	Τσιμέντο ( kg )	Ιπτάμενη τέφρα ( kg )	Λεπτόκοκκα αδρανή ( kg )	Χονδρόκοκκα αδρανή ( kg )	N/T
M30	354	186	980	885	0.45

**Πίνακας 1.12** Ρεολογικά χαρακτηριστικά σύνθεσης ΑΣΣ

Δοκιμή ελέγχου	Αποτελέσματα
Ανεμπόδιση εξάπλωση (slump flow )	690 mm
Δοχείο L ( L – box )	(h <sub>2</sub> / h <sub>1</sub> ) = 0.89

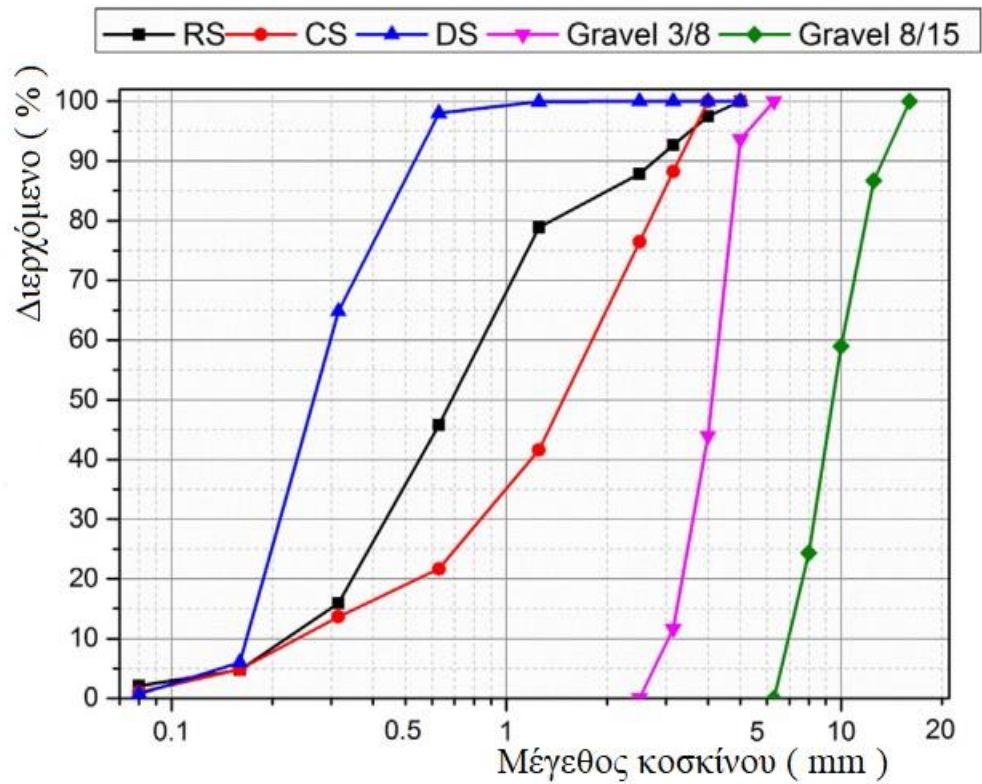
<b>Δοχείο U ( U – box )</b>	$( h_2 - h_1 ) = 10$
<b>Χοάνη V ( V – Funnel )</b>	8.9 ( sec )

Οι Jarugumalli et Maduru διερεύνησαν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων ΑΣΣ που περιείχαν διαφορετικά ποσοστά μαρμαρόσκονης (marble powder – MP) ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν 5 συνθέσεις ΑΣΣ με ποσοστό MP 10 % ( SCC10 ), 20 % ( SCC20 ), 30 % ( SCC30 ), 40 % ( SCC40 ) και 50 % ( SCC50 ) και μία σύνθεση αναφοράς (SCC0) που περιείχε μόνο τσιμέντο ως συνδετικό υλικό. Τα δοκίμια των συνθέσεων υπεβλήθησαν στη δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης και έδωσαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.13**. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η προσθήκη μαρμαρόσκονης ( MP ) οδηγεί σε σημαντική αύξηση της ελεύθερης εξάπλωσης του ΑΣΣ σε νωπή κατάσταση, με την υψηλότερη τιμή εξάπλωσης να καταγράφεται στη σύνθεση που περιείχε 40 % MP ( SCC40 ). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην εξαιρετικά λεπτόκοκκη φύση του υλικού που προσφέρει ομοιογένεια στο νωπό ΑΣΣ.

**Πίνακας 1.13 Ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων ΑΣΣ**

Σύνθεση	Δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης (slump – flow test) ( mm )	Χρόνος εξάπλωσης $t_{500}$ ( sec )	Χοάνη V (sec )	Δοχείο L	Δοχείο U	Δακτύλιος J ( mm )
SCC0	729.75	2.53	5.5	0.9	29	9
SCC10	734.5	2.3	5.2	0.89	25	9
SCC20	742.5	2.26	5.55	0.88	23	8
SCC30	744.5	2.1	5.42	0.88	21	7
SCC40	753.5	2.05	5.2	0.84	21	7
SCC50	738.5	2.3	4.45	0.88	13	6

Οι Sahraoui et Bouziani διερεύνησαν την επίδραση που έχει στα ρεολογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ η χρησιμοποίηση διαφορετικών ειδών άμμου σε εναλλάξιμες αναλογίες. Χρησιμοποιήθηκαν τρία είδη άμμου: Η συνήθης άμμος ποταμού (RS), η θραυστή άμμος (CS) και ποσότητα άμμου προερχόμενη από τους αμμόλοφους (DS). Εκτελέστηκε σάρωση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ώστε να προσδιοριστεί το σχήμα των σωματιδίων κάθε είδους άμμου και προέκυψε ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, τα σωματίδια RS και DS βρέθηκαν να έχουν σφαιρικό σχήμα, ενώ τα σωματίδια CS παρουσιάζουν πιο γωνιώδες σχήμα αλλά και υψηλότερο βαθμό λεπτότητας. Συντέθηκαν 21 διαφορετικά μίγματα ΑΣΣ που το καθένα περιείχε: 420 kg/m<sup>3</sup> τσιμέντο, 339 kg/m<sup>3</sup> χάλικες ( 3/8 ), 508 kg/m<sup>3</sup> χάλικες ( 8/15 ), 84 kg/m<sup>3</sup> μαρμαρόσκονη ( MP ) και σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο ( N/T ) 0,37. Η ποσότητα υπερρευστοποιητή που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0,95 % ως προς το βάρος της συνολικής ποσότητας τσιμέντου του μίγματος ,ενώ η συνολική ποσότητα άμμου σε κάθε σύνθεση ορίστηκε στα 877.15 kg/m<sup>3</sup>. Η κοκκομετρική διαβάθμιση κάθε είδους άμμου φαίνεται στο **Σχήμα 1.1**. Η αναλογία άμμων κάθε σύνθεσης παρουσιάζεται στον **Πίνακα 1.14**.



Σχήμα 1.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών υλικών και άμμων

Πίνακας 1.14 Αναλογίες άμμων ανά σύνθεση

Σύνθεση	Αναλογία άμμων		
	DS	CS	RS
1	0	0	1
2	0	0.2	0.8
3	0	0.4	0.6
4	0	0.6	0.4
5	0	0.8	0.2
6	0	1	0
7	0.2	0	0.8
8	0.2	0.2	0.6
9	0.2	0.4	0.4
10	0.2	0.6	0.2
11	0.2	0.8	0
12	0.4	0	0.6
13	0.4	0.2	0.4
14	0.4	0.4	0.2
15	0.4	0.6	0
16	0.6	0	0.4
17	0.6	0.2	0.2
18	0.6	0.4	0

<b>19</b>	0.8	0	0.2
<b>20</b>	0.8	0.2	0
<b>21</b>	1	0	0

Όπως προκύπτει από την δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης (**Πίνακας 1.15**) όλες οι συνθέσεις ανήκουν στην κατηγορία SF3 με εξαίρεση τις συνθέσεις 5, 6, 11, 16, 17 που ανήκουν στην κατηγορία SF2 και τις συνθέσεις 19 και 21 που εμπίπτουν στην κατηγορία SF1. Αντίστοιχα, από την δοκιμή υπολογισμού του χρόνου εξάπλωσης  $t_{500}$  οι συνθέσεις 2 και 3 χαρακτηρίζονται ως χαμηλού ιξώδους και εντάσσονται στην κατηγορία VS1. Η μεγαλύτερη τιμή ελεύθερης εξάπλωσης καταγράφηκε στα 800 mm και αφορούσε τη σύνθεση 8 με αναλογία DS, CS, RS 0.2, 0.2, 0.6 αντίστοιχα. Αυτή η αυξημένη εξάπλωση του μίγματος θα μπορούσε να εξηγηθεί από την πιο συμπαγή μικροδομή που εξασφαλίζεται από τον συγκεκριμένο συνδυασμό άμμων στο νωπό ΑΣΣ και έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγαλύτερης ποσότητας τσιμεντόπαστας που ουσιαστικά λιπαίνει το μίγμα στη νωπή του φάση.

**Πίνακας 1.15 Ρεολογικά χαρακτηριστικά συνθέσεων ΑΣΣ**

Σύνθεση	Δοκιμή ελεύθερης εξάπλωσης ( mm )	Χρόνος εξάπλωσης $t_{500}$ ( sec )	Χοάνη V (sec )	Δοχείο L	Σταθερότητα μέσω κοσκίνισης ( % )
<b>1</b>	760	2.11	8.04	0.99	23.68
<b>2</b>	785	1.97	6.98	0.9	20.82
<b>3</b>	790	1.91	6.27	0.98	27.38
<b>4</b>	770	2.66	8.77	0.87	24.55
<b>5</b>	730	3.8	18.92	0.62	13.74
<b>6</b>	690	5.27	23.75	0.48	9.12
<b>7</b>	785	2.76	7.86	0.9	19.07
<b>8</b>	800	2.32	7.45	0.95	22.8
<b>9</b>	770	2.56	9.7	0.98	23.22
<b>10</b>	760	2.9	13.45	0.73	13.96
<b>11</b>	725	5.15	27.17	0.67	9.33
<b>12</b>	765	3.83	20.95	0.95	11.76
<b>13</b>	780	2.5	10.91	1	18.97
<b>14</b>	780	2.98	9.9	0.9	16.7
<b>15</b>	770	3.42	15.23	0.82	12.04
<b>16</b>	680	4.8	16.7	0.37	7.54
<b>17</b>	730	4.82	18.05	0.78	10.57
<b>18</b>	755	3.61	16.3	0.9	18.06
<b>19</b>	640	4.76	19.48	0.17	14.21
<b>20</b>	680	3.51	16.45	0.55	19.44
<b>21</b>	590	6.08	25.13	0	13.36

Σύμφωνα με τους Alexander et al, η χρησιμοποίηση περισσότερων του ενός λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του ΑΣΣ. Για το



σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν τέσσερις συνθέσεις ΑΣΣ που περιείχαν ως εναλλακτικά πληρωτικά υλικά διαφορετικές ποσότητες σκόνης περλίτη ( perlite powder – PP ), λεπτόκοκκα αλεσμένη σκωρία υψικαμίνου ( ground granulated blast furnace slag – GGBS ) και πυριτική παιπάλη ( SF ). Όλα τα μίγματα περιείχαν την ίδια ποσότητα GGBS και SF αλλά διαφορετική ποσότητα PP. Ειδικότερα, η πρώτη σύνθεση ( PP0 ) δεν περιείχε καθόλου PP ενώ στις υπόλοιπες το ποσοστό PP ορίστηκε σε 2 %, 4 % και 6 % ως προς την ποσότητα τσιμέντου του μίγματος αντίστοιχα. Οι ονομασίες των συνθέσεων προέρχονται από το ποσοστό PP που περιέχεται στη σύνθεσή τους. Οι ακριβείς αναλογίες και τα συστατικά των συνθέσεων αποτυπώνονται στον **Πίνακα 1.16**.

**Πίνακας 1.16** Συστατικά και αναλογίες συνθέσεων ΑΣΣ.

α/ α	Υλικό	Μονά δα μέτρηση ς	Ποσότητα υλικού στο μίγμα			
			PP0	PP2	PP4	PP6
1	Τσιμέντο	kg	410. 11	401. 91	393. 71	385. 50
2	GGBS	kg	81.3 2	81.3 2	81.3 2	81.3 2
3	SF	kg	41.7 6	41.7 6	41.7 6	41.7 6
4	PP	kg	0	8.20	16.4 0	24.6 1
5	Λεπτόκοκκα αδρανή	kg	937. 57	937. 57	937. 57	937. 57
6	Χονδρόκοκκα αδρανή	kg	755	755	755	755
7	Υπερρευστοποι ητής	litre	3.73	3.82	4.11	4.30
8	Νερό	litre	194. 06	204. 06	214. 06	224. 06

Οι συνθέσεις ΑΣΣ υπεβλήθησαν στις συνήθεις δοκιμές ώστε να εκτιμηθεί η ρεολογική συμπεριφορά τους. Συγκεκριμένα, έλαβαν χώρα οι δοκιμές ελεύθερης εξάπλωσης, χρόνου εξάπλωσης T<sub>500</sub>, δοχείου L και δοχείου U. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνονται στον **Πίνακα 1.17**.

**Πίνακας 1.17** Αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού ρεολογικών ιδιοτήτων συνθέσεων.

α/α	Δοκιμή	Μονάδα	Μίγμα ΑΣΣ
-----	--------	--------	-----------

			PP0	PP2	PP4	PP6
1	Ελεύθερη εξάπλωση	mm	670	590	570	550
2	T <sub>500</sub>	Sec	2	3	5	10
3	Δοχείο L ( H <sub>2</sub> / H <sub>1</sub> )	-	1.06	0.63	0.49	0.20
4	Δοχείο U ( H <sub>2</sub> - H <sub>1</sub> )	-	27	40	54	67

Γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι η προσθήκη σκόνης περλίτη επιδεινώνει όλους τους ρεολογικούς δείκτες του ΑΣΣ και μάλιστα η επιβάρυνση είναι μεγαλύτερη στις συνθέσεις με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε περλίτη. Οι συνθέσεις PP2, PP4 και PP6 εντάσσονται στην κατηγορία εξάπλωσης SF1, ενώ η σύνθεση αναφοράς ( PP0 ) ανήκει στην κατηγορία εξάπλωσης SF2. Αντιστοίχως, οι χρόνοι εξάπλωσης παρουσιάζουν αντίστοιχη κλιμάκωση, με την σύνθεση αναφοράς να είναι η μόνη που κατατάσσεται στην κατηγορία VS1 ( χαμηλού ιξώδους ). Η ικανότητα διέλευσης του ΑΣΣ, όπως εκτιμάται από την δοκιμή δοχείου U και την δοκιμή δοχείου L, ελαττώνεται σημαντικά με την προσθήκη περλίτη και μάλιστα η μείωσή της είναι μεγαλύτερη όσο υψηλότερη ήταν η περιεκτικότητα σκόνης περλίτη στο μίγμα. Χαρακτηριστικά, μόνο η σύνθεση αναφοράς εκπληρώνει το όριο της υψομετρικής διαφοράς και του λόγου υψών ( PL1 ) που ορίζουν τα κανονιστικά πλαίσια. Αυτό εξηγείται από την μεγάλη υδατοαπορροφητικότητα του περλίτη που δεσμεύει ποσότητα του νερού ανάμιξης με αποτέλεσμα να μειώνεται η εργασιμότητα του νωπού ΑΣΣ.

#### 1.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά ΑΣΣ - Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι Anandaraj et al εξέτασαν τη μηχανική συμπεριφορά μιγμάτων ΑΣΣ που περιείχαν ως εναλλακτικά πληρωτικά υλικά ιπτάμενη τέφρα ( Fly Ash - FA ) και / ή σκόνη ασβεστολίθου ( Limestone Powder - LP ). Συνολικά, υποβλήθηκαν σε έλεγχο αντοχής σε θλίψη καθώς και σε έλεγχο εφελκυστικής αντοχής λόγω διάρρηξης τέσσερις συνθέσεις ΑΣΣ ως εξής: Η 1<sup>η</sup> σύνθεση ( SCC0 ) περιείχε ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό μόνο FA, σε ποσοστό 25 % ως προς το βάρος του τσιμέντου της σύνθεσης, η 2<sup>η</sup> σύνθεση ( SCC5 ) περιείχε 25 % FA και 5 % LP, η 3<sup>η</sup> σύνθεση ( SCC10 ) περιείχε 25 % FA και 10 % LP και η 4<sup>η</sup> σύνθεση ( SCC15 ) περιείχε 25 % FA και 15 % LP.

**Πίνακας 1.18 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού λόγω διάρρηξης σε κυλινδρικά δοκίμια σε συνάρτηση με την ηλικία τους ( MPa ).**

Σύνθεση	Αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης ( MPa )		
	7 ημέρες	14 ημέρες	28 ημέρες
SCC0	1.12	1.37	1.69
SCC5	1.10	1.02	1.82
SCC10	1.44	1.59	1.95

SCC15	1.35	1.62	1.86
-------	------	------	------

Στην δοκιμή εφελκυσμού λόγω διάρρηξης η μεγαλύτερη τιμή εμφανίζεται στην σύνθεση 3 που περιείχε 10 % LP, η οποία είναι μεγαλύτερη από τη σύνθεση αναφοράς κατά 15 % σε ηλικία 28 ημερών. Παρατηρείται ότι όλες οι μηχανικές ιδιότητες βελτιώνονται με την προσθήκη LP στο μίγμα, αλλά επιδεινώνονται όταν η περιεκτικότητα του LP ξεπερνάει το 10 % κ.β. τσιμέντου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.18, στον Πίνακα 1.19 και στον Πίνακα 1.20.

**Πίνακας 1.19 Αποτελέσματα δοκιμής προσδιορισμού της αντοχής σε θλίψη κυβικών δοκιμίων σε συνάρτηση με την ηλικία τους ( MPa ).**

Σύνθεση	Θλιπτική αντοχή ( MPa )		
	7 ημέρες	14 ημέρες	28 ημέρες
SCC0	17.65	23.87	25.25
SCC5	18.95	24.50	27.80
SCC10	21.24	25.69	28.70
SCC15	20.54	25.27	27.95

**Πίνακας 1.20 Αποτελέσματα καμπτικής αντοχής πρισματικών δοκιμίων στην ηλικία των 28 ημερών ( MPa ).**

Σύνθεση	Καμπτική αντοχή στις 28 ημέρες ( MPa )
SCC0	4.08
SCC5	4.82
SCC10	4.96
SCC15	4.65

Οι Vaidevi et al. μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα μιγμάτων ΑΣΣ που περιέχουν ως πληρωτικό υλικό ιπτάμενη τέφρα (FA) και μαρμαροκονία (waste fine aggregate - MF). Συνολικά παρασκευάστηκαν 4 συνθέσεις που περιέχουν σταθερές ποσότητες τσιμέντου Portland και ιπτάμενης τέφρας (FA) και διαφορετικές ποσότητες μαρμαροκονίας (MP). Τα συστατικά και οι αναλογίες των συνθέσεων περιγράφονται στον Πίνακα 1.21.

**Πίνακας 1.21 Πίνακας συστατικών συνθέσεων**

Σύνθεση	Τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	MF(kg/m <sup>3</sup> )	Λεπτ.αδρ (kg/m <sup>3</sup> )	Χονδρ.αδρ (kg/m <sup>3</sup> )	Νερό (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	W/P (kg/m <sup>3</sup> )
Αναφορά	500	140	-	738	847	193	4.48	0.28
SCCMFA25	500	140	185	553	847	193	4.48	0.28
SCCMFA50	500	140	369	369	847	193	4.48	0.28
SCCMFA100	500	140	738	0	847	193	4.48	0.28

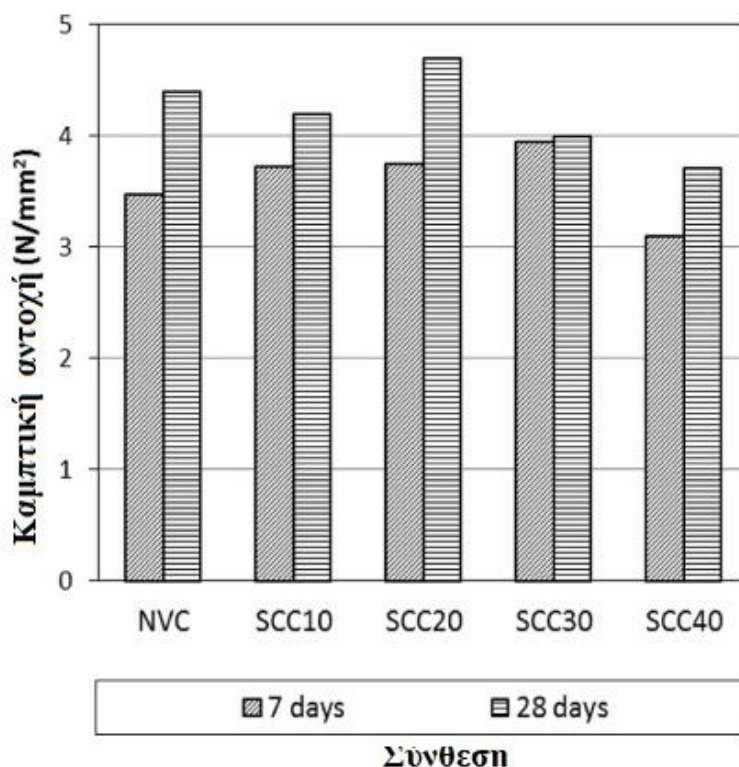
Οι συνθέσεις υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης. Για τις ανάγκες της δοκιμής παρασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 500X100X100 (mm<sup>3</sup>) και υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης 3 σημείων στις ηλικίες των 14 , 28 και 56 ημερών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 1.22**.

**Πίνακας 1.22 Πίνακας αποτελεσμάτων μηχανικών αντοχών συνθέσεων σε συνάρτηση με την ηλικία**

Σύνθεση	Ηλικία	Θλιπτική αντοχή N/mm <sup>2</sup>			Αντοχή σε εφελκυσισμό N/mm <sup>2</sup>			Αντοχή σε κάμψη N/mm <sup>2</sup>		
		14	28	56	14	28	56	14	28	56
SCC (Cement 70% + Fly ash 30% + River sand 100% + Coarse aggregate100%)		47.99	65.34	86.54	4.69	6.41	7.40	7.47	10.16	14.08
SCC + 25% MFA (Cement 70% + Fly ash 30% + River sand 75% + marble powder 25% + Coarse aggregate100%)		45.50	62.23	67.70	3.14	4.77	5.22	5.09	6.71	9.01
SCC + 50% MFA (Cement 70% + Fly ash 30% + River sand 50% + marble powder 50% + Coarse aggregate100%)		39.41	53.98	65.65	2.71	3.09	4.40	4.24	5.99	8.88
SCC + 100% MFA (Cement 70% + Fly ash 30% + River sand 0% + marble powder 100% + Coarse aggregate100%)		32.77	45.74	52.04	2.62	3.01	4.12	4.02	5.57	7.12

Η αντικατάσταση μέρους των λεπτόκοκκων αδρανών από λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό (MFA) οδηγεί σε μείωση της καμπτικής αντοχής σε κάθε ηλικία δοκιμίου και μάλιστα όσο μεγαλύτερο το ποσοστό της αντικατάστασης τόσο μεγαλύτερη και η μείωση. Στις 14 ημέρες η μείωση της καμπτικής αντοχής είναι 31.86 % , 43.24 % και 46.18 % για ποσοστό αντικατάστασης 25 % , 50 % και 100 % αντίστοιχα. Στις 28 ημέρες η μείωση της καμπτικής αντοχής είναι 33.95 % , 41.04 % και 45.18 % για ποσοστό αντικατάστασης 25 % , 50 % και 100 % αντίστοιχα. Ομοίως στις 56 ημέρες η μείωση είναι 36 % , 36.93 % και 49.43 % αντίστοιχα. Αντίστοιχη μείωση παρατηρείται και στις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες ( θλιπτική, εφελκυστική αντοχή ) όταν αντικαθίσταται τα λεπτόκοκκα αδρανή με μαρμαρόσκονη που λειτουργεί ως πληρωτικό υλικό.

Σύμφωνα με τους El-Mohsen et al. η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου από σκόνη αποκονίωσης περιστροφικής καμίνου (CKD) δημιουργεί συνθέσεις ΑΣΣ με παραπλήσιες μηχανικές αντοχές με αυτές ενός συμβατικά δονούμενου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα παρασκευάστηκαν 4 συνθέσεις ΑΣΣ που περιείχαν CKD σε ποσοστά 10 % , 20 % , 30 % και 40 % αντίστοιχα και συγκρίθηκαν με τη σύνθεση αναφοράς που περιλαμβάνει δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος χωρίς πληρωτικά υλικά. Παρατηρήθηκε ότι οι καμπτικές αντοχές των μιγμάτων ΑΣΣ αυξήθηκαν σε σχέση με το μίγμα αναφοράς μέχρι το ποσοστό CKD να φτάσει στο 30 % για ηλικία συνθέσεων 7 ημερών και μάλιστα η αύξηση ήταν ανάλογη με το ποσοστό CKD που περιείχαν. Η μεγαλύτερη αύξηση στην καμπτική αντοχή εμφανίστηκε στη σύνθεση που περιείχε 20 % CKD και ήταν 9 % και 6 % στις ηλικίες 7 και 14 ημερών αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο **Σχήμα 1.2**.



Σχήμα 1.2 Αποτελέσματα καμπτικών δοκιμών συνθέσεων σε ηλικίες 7 και 14 ημερών

Αντιθέτως, η χρήση CKD ως εναλλακτικό τσιμεντοειδές υλικό έχει δυσμενείς επιπτώσεις στα άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ. Η θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ μειώνεται με την αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου και όλες οι συνθέσεις που περιείχαν CKD παρουσιάζουν μειωμένες αντοχές σε κάμψη. Η σύνθεση ΑΣΣ με ποσοστό CKD 20 % είναι η βέλτιστη με αντοχή σε κάμψη που φτάνει στο 97 %, 93 %, 96 % και 93 % της αντίστοιχης του μίγματος αναφοράς σε ηλικίες 7, 28, 56 και 91 ημερών αντίστοιχα.

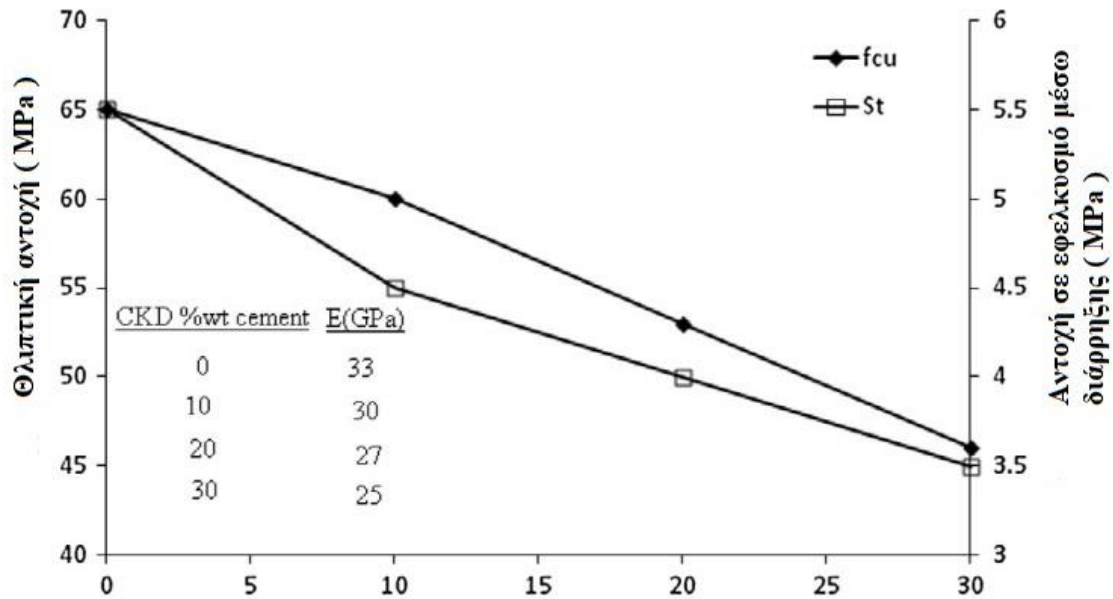
Στη δοκιμή του μέτρου Ελαστικότητας το μίγμα με 20 % CKD παρουσίασε μεγαλύτερη τιμή κατά 7.5 % σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα στις 91 ημέρες, ενώ το μίγμα με 10 % CKD σε ηλικία 28 ημερών είχε την ίδια τιμή μέτρου ελαστικότητας με το συμβατικό, αλλά παρουσίασε μείωση κατά 28 % στις 91 ημέρες. Παρατηρήθηκε ότι περαιτέρω αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου από το λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό (CKD) πέραν του 20 %, οδήγησε σε επιδείνωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ΑΣΣ. Το μέτρο Ελαστικότητας των συνθέσεων που περιείχαν 30 % και 40 % CKD προέκυψε αισθητά μειωμένο σε κάθε ηλικία, με την τελική τιμή να υπολείπεται κατά 70 % και 41 % αντίστοιχα σχέση με το συμβατικό.

Οι Najim et al μελέτησαν την συμπεριφορά συνθέσεων ΑΣΣ που περιείχαν ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό CKD σε διαφορετικά ποσοστά. Παρασκευάστηκαν τρεις συνθέσεις ΑΣΣ που περιείχαν σκόνη αποκονίωσης της περιστροφικής καμίνου σε ποσοστά 10 %, 20 % και 30 % και μία σύνθεση αναφοράς που περιείχε μόνο τσιμέντο Portland ως συνδετικό υλικό. Η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με CKD έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μηχανικών αντοχών του ΑΣΣ. Συγκεκριμένα, η θλιπτική αντοχή μειώθηκε κατά 7.5 %, 18 % και 29 % για περιεκτικότητα CKD 10 %, 20 % και

30 % αντίστοιχα. Η μείωση στη θλιπτική αντοχή εξηγείται από την μείωση της ποσότητας τσιμέντου στο μίγμα λόγω της αντικατάστασής του από CKD που οδηγεί σε μείωση του  $C_3S$  και του  $C_2S$  που αποτελούν τις κύριες ενώσεις που αυξάνουν τις αντοχές του σκυροδέματος. Επίσης, η αυξημένη παρουσία ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου ( $CaO$ ) στο CKD έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας πορτλαντίτη ( $Ca(OH)_2$ ) στο νωπό ΑΣΣ που συντελεί στη μείωση των μηχανικών αντοχών. Αξίζει να αναφερθεί ότι παρά την μείωση στη θλιπτική αγωγή που προκαλείται από την αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου από ένα λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό (CKD), κατέστη εφικτή η παρασκευή μιγμάτων ΑΣΣ υψηλής αντοχής ακόμη και για υψηλή περιεκτικότητα σε αυτό. Συγκεκριμένα, η σύνθεση με 20 % περιεκτικότητα σε CKD εμφάνισε θλιπτική αντοχή 53 MPa, ενώ η σύνθεση με 30 % CKD παρουσίασε θλιπτική αντοχή εντός του φάσματος που χαρακτηρίζει τις συνήθεις κατασκευές έργων πολιτικού μηχανικού (από 28 MPa έως 35 MPa). Στο **Σχήμα 1.3** παρουσιάζονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ΑΣΣ.

Σημαντικά μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στη εφελκυστική αντοχή λόγω διάρρηξης και μάλιστα η μείωση ήταν μεγαλύτερη όσο αυξάνονταν η περιεκτικότητα σε CKD. Συγκεκριμένα, η μείωση της εφελκυστικής αντοχής υπολογίστηκε σε 18 %, 27 % και 36 % για τις συνθέσεις που περιείχαν CKD σε ποσοστό 10 %, 20 % και 30 % αντίστοιχα. Μία πιθανή εξήγηση είναι η αύξηση του ποσοστού των κενών που επιφέρει η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου από CKD, το οποίο λόγω της σφαιρικότητας των σωματιδίων του έχει ως αποτέλεσμα να παγιδεύεται περισσότερος αέρας στην ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα. Τα κενά που δημιουργούνται στη μικροδομή του ΑΣΣ λειτουργούν ως διακοπή της συνέχειας του υλικού, δηλαδή ως μικρορηγματώσεις οι οποίες αυξάνονται με τη φόρτιση των δοκιμίων και οδηγούν σε σημαντική μείωση της αντοχής τους σε εφελκυσμό. Στο **Σχήμα 1.3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τις δοκιμής αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης για κάθε σύνθεση.

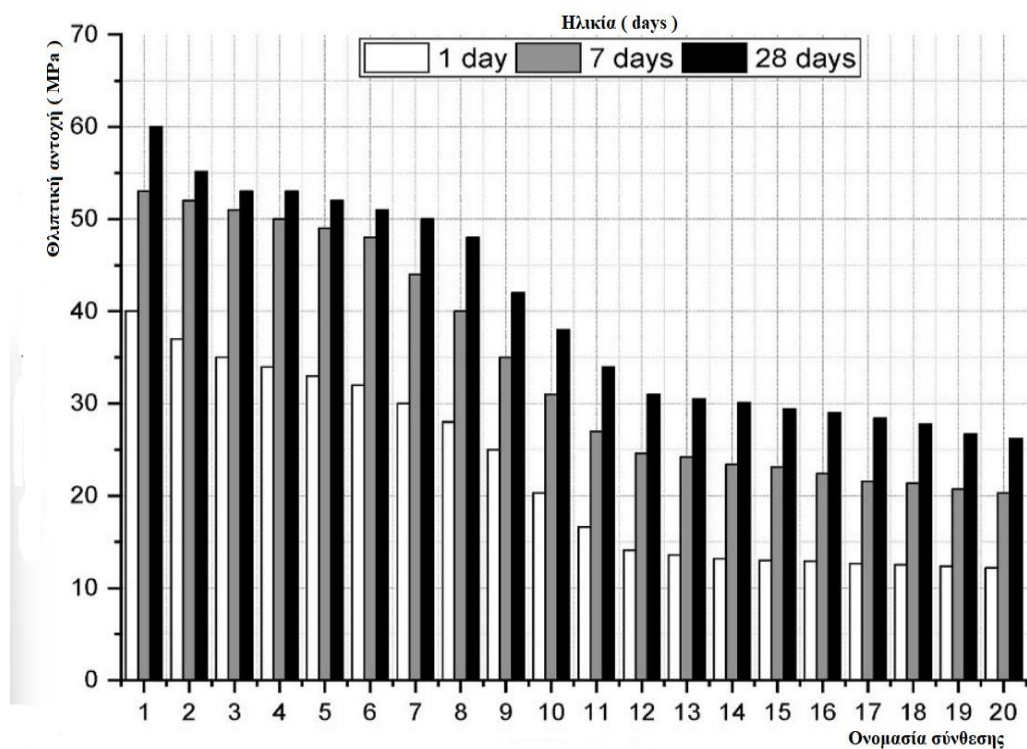
Αντίστοιχα, η τιμή του μέτρου Ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης τσιμέντου από CKD. Σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς, το μέτρο ελαστικότητας γις τις συνθέσεις που περιείχαν CKD σε ποσοστό 10 %, 20 % και 30 % αντίστοιχα, παρουσίασε μείωση κατά 10 %, 22 % και 32 % αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.3**.



Σχήμα 1.3 Τιμές της θλιπτικής αντοχής και της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης σε MPa για διάφορα ποσοστά προσθήκης CKD.

Οι Benaicha et al διερεύνησαν την επίδραση που έχει η εφαρμογή αερακτικών προσθέτων στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων ΑΣΣ. Για το σκοπό αυτόν παρασκευάστηκαν συνθέσεις ΑΣΣ με σταθερές αναλογίες συστατικών, αμετάβλητο λόγο νερού προς τσιμέντο και διαφορετική περιεκτικότητα σε αερακτικό ως προς την ποσότητα τσιμέντου. Συγκεκριμένα, οι συνθέσεις περιείχαν 1 έως 20 % αερακτικό ως προς την σταθερή ποσότητα τσιμέντου στο μίγμα και συγκρίθηκαν με το μίγμα αναφοράς που δεν περιείχε ποσότητα αερακτικού χημικού προσθέτου.

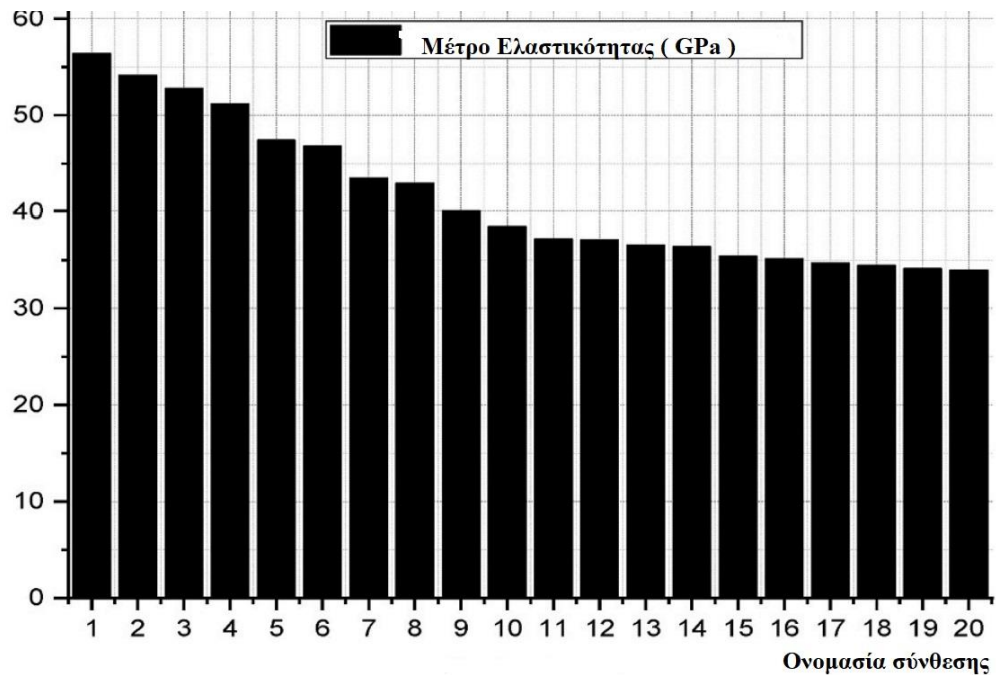
Η θλιπτική αντοχή των συνθέσεων μειώθηκε με την αύξηση της ποσότητας αερακτικού, κάτι που μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα κενά εγκλωβισμένου αέρα διακόπτουν τη συνοχή της τσιμεντόπαστας και λειτουργούν ως μικρορηγματώσεις που τείνουν να επεκταθούν με την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου. Η σχέση θλιπτικής αντοχής με το πορώδες του σκυροδέματος έχει μελετηθεί κατά κόρον και έχει επιβεβαιωθεί ότι αύξηση του ποσοστού των κενών ( πορώδες ) έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Η σύνθεση αναφοράς παρουσίασε τιμές θλιπτικής αντοχής 45, 55 και 63.4 MPa στις ηλικίες 1, 7 και 28 ημερών αντίστοιχα. Η σύνθεση με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε αερακτικό ( 1% ) παρουσίασε αναμενόμενα τη χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη με τιμές 12.2, 20.3 και 26.2 MPa στις ηλικίες 1, 7 και 28 ημερών αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι η μείωση του πορώδους και η αύξηση της ηλικίας των μιγμάτων που επιτρέπει την ολοκλήρωση της διαδικασίας ενυδάτωσης του ΑΣΣ συντελούν καθοριστικά στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής του. Η εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής κάθε σύνθεσης σε σχέση με την ηλικία αποτυπώνεται στο **Σχήμα 1.4**.



Σχήμα 1.4 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ΑΣΣ σε ηλικία 1, 7 και 28 ημερών.

Το μέτρο Ελαστικότητας εμφανίζει αντίστοιχη συμπεριφορά με την αντοχή σε θλίψη, δηλαδή μειώνεται με την αύξηση του πορώδους η οποία προκαλείται από την υψηλότερη συγκέντρωση αερακτικού προσθέτου στα μίγματα. Το μίγμα αναφοράς παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή μέτρου Ελαστικότητας με τιμή 58.34 GPa, ενώ η χαμηλότερη τιμή προέκυψε για το μίγμα με το υψηλότερο ποσοστό αερακτικού ( 20 % ) στα 33.96 GPa. Η σημαντική μείωση που προκύπτει οφείλεται στις φυσαλίδες αέρα που δημιουργούνται στο σκυρόδεμα από την προσθήκη του αερακτικού στο μίγμα. Στο **Σχήμα 1.5** παρουσιάζονται οι τιμές του Μέτρου Ελαστικότητας για κάθε σύνθεση ΑΣΣ όπως προέκυψε από τις αντίστοιχες δοκιμές προσδιορισμού του.





Σχήμα 1.5 Αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας συνθέσεων ΑΣΣ

Οι Sahraoui et Bouziani διερεύνησαν την επίδραση που έχει στα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ η χρήση διαφορετικών ειδών άμμου σε διάφορες αναλογίες. Συντέθηκαν 21 διαφορετικά μίγματα ΑΣΣ που το καθένα περιείχε: 420 kg/m<sup>3</sup> τσιμέντο, 339 kg/m<sup>3</sup> χάλικες ( 3/8 ), 508 kg/m<sup>3</sup> χάλικες ( 8/15 ), 84 kg/m<sup>3</sup> μαρμαρόσκονη ( ΜΡ ) και σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο ( Ν/Τ ) 0,37. Η ποσότητα υπερρευστοποιητή που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0,95 % ως προς το βάρος της συνολικής ποσότητας τσιμέντου του μίγματος, ενώ η συνολική ποσότητα άμμου σε κάθε σύνθεση ορίστηκε στα 877.15 kg/m<sup>3</sup>. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμών αποτυπώνονται στον Πίνακα 1.23.

Πίνακας 1.23 Θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμών σε ηλικία 28 ημερών σε ΜΡα.

Σύνθεση	Θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες ( ΜΡα )
1	63.2
2	65.0
3	67.6
4	63.3
5	64.4
6	66.1
7	61.4
8	62.6
9	66.4
10	66.3

11	68.0
12	60.4
13	63.7
14	61.9
15	63.2
16	56.5
17	60.3
18	62.7
19	55.8
20	58.6
21	51.5

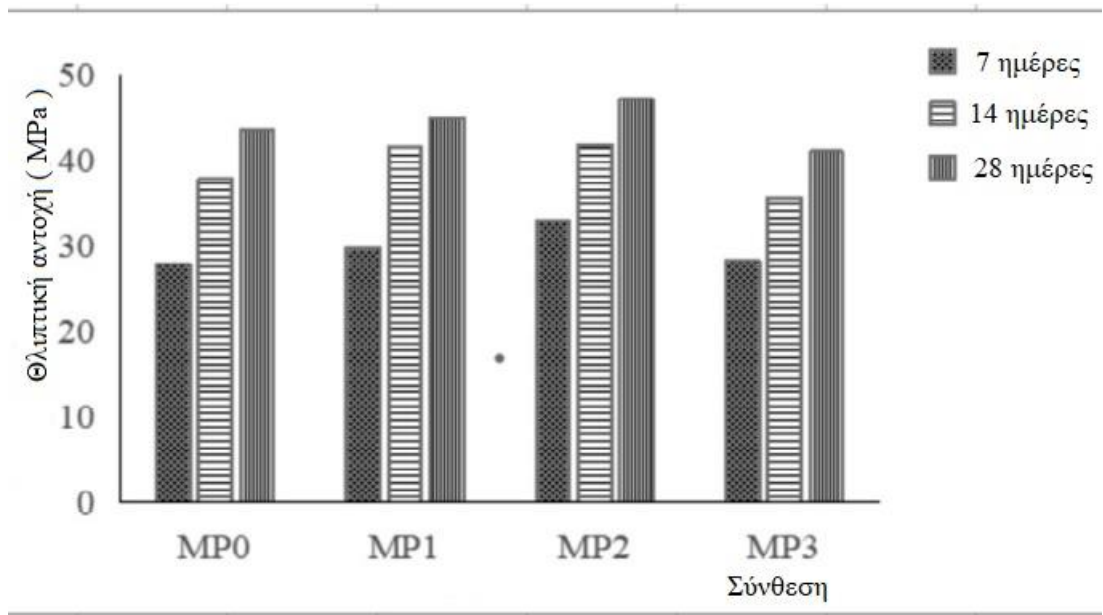
Οι Kanva et Mohan μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες συνθέσεων ΑΣΣ που περιείχαν ιπτάμενη τέφρα ( Fly Ash – FA ) και μαρμαρόσκονη ( MP ) ως υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου και των λεπτόκοκκων αδρανών αντίστοιχα. Παρασκευάστηκαν τρεις συνθέσεις ΑΣΣ ( MP1, MP2 και MP3 ) που περιείχαν σε σταθερή ποσότητα FA σε ποσοστό 25 % ως προς το βάρος του τσιμέντου και MP σε ποσοστά 10 %, 20 % και 30 % αντίστοιχα. Η σύνθεση αναφοράς ( MP0 ) περιείχε μόνο FA ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό στο ίδιο ποσοστό με τις υπόλοιπες συνθέσεις ΑΣΣ, δηλαδή 25 % ως προς το βάρος του τσιμέντου της σύνθεσης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών κάθε σύνθεσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.24 και στον Πίνακα 1.25.

**Πίνακας 1.24** Αποτελέσματα δοκιμών υπολογισμού θλιπτικής αντοχής (MPa) σε διάφορες ηλικίες.

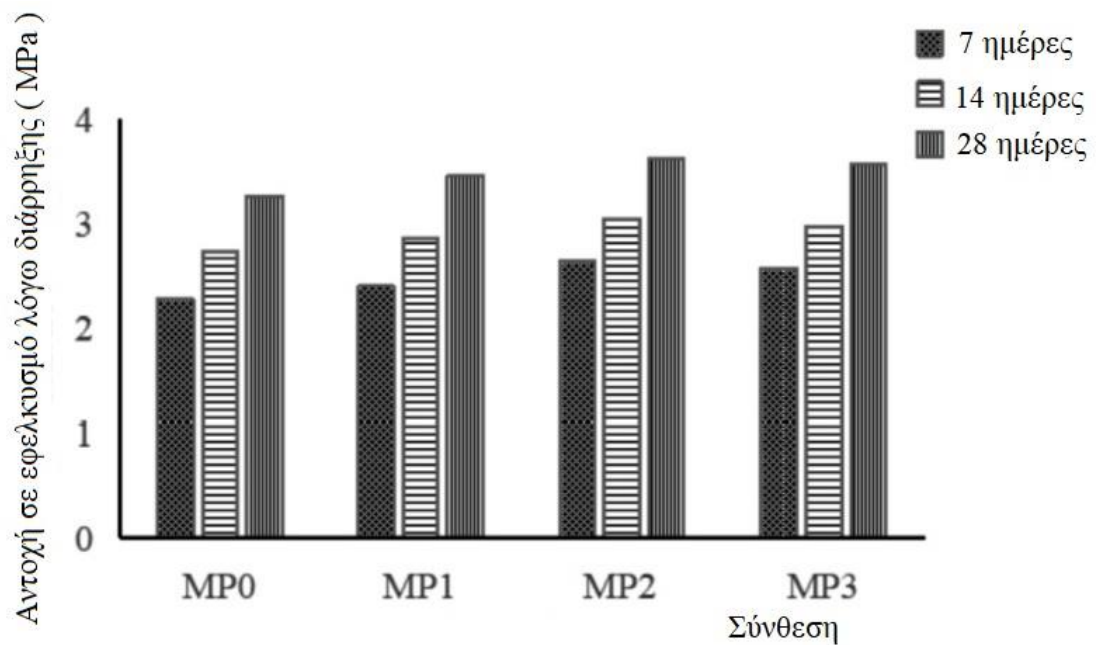
Σύνθεση	Θλιπτική αντοχή ( MPa )		
	7 ημέρες	14 ημέρες	28 ημέρες
MP0	27.84	37.85	43.5
MP1	29.77	41.49	45.1
MP2	33.01	41.76	47.15
MP3	28.3	35.69	41.02

**Πίνακας 1.25** Αποτελέσματα δοκιμών υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη (MPa) σε διάφορες ηλικίες.

Σύνθεση	Αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης ( MPa )		
	7 ημέρες	14 ημέρες	28 ημέρες
MP0	2.28	2.74	3.27
MP1	2.40	2.87	3.46
MP2	2.64	3.05	3.63
MP3	2.58	2.98	3.58



Σχήμα 1.6 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ΑΣΣ σε ΜΡα σε συνάρτηση με την ηλικία τους σε ημέρες.

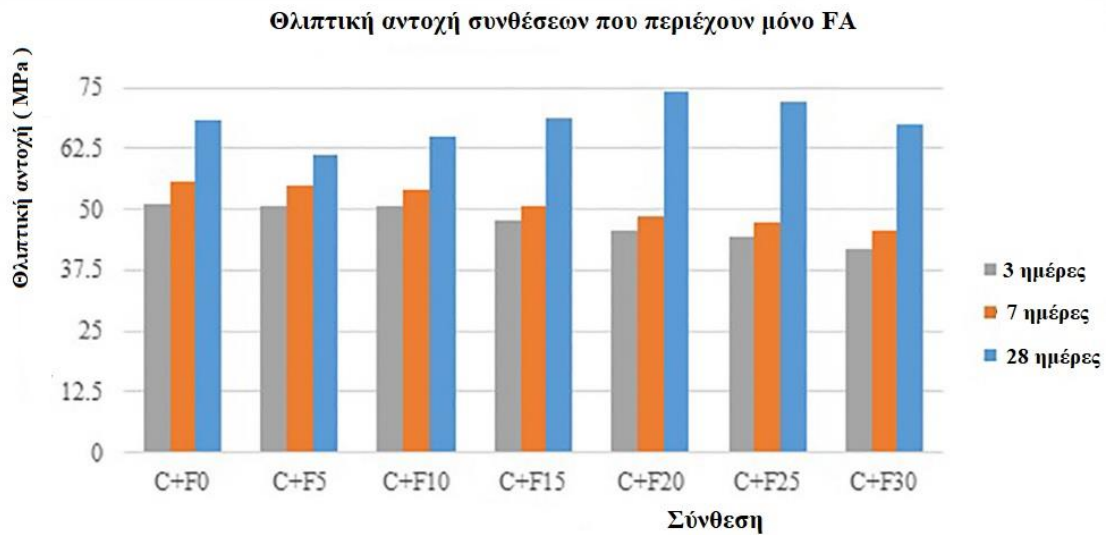


Σχήμα 1.7 Εξέλιξη της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης των συνθέσεων ΑΣΣ σε ΜΡα σε συνάρτηση με την ηλικία τους σε ημέρες.

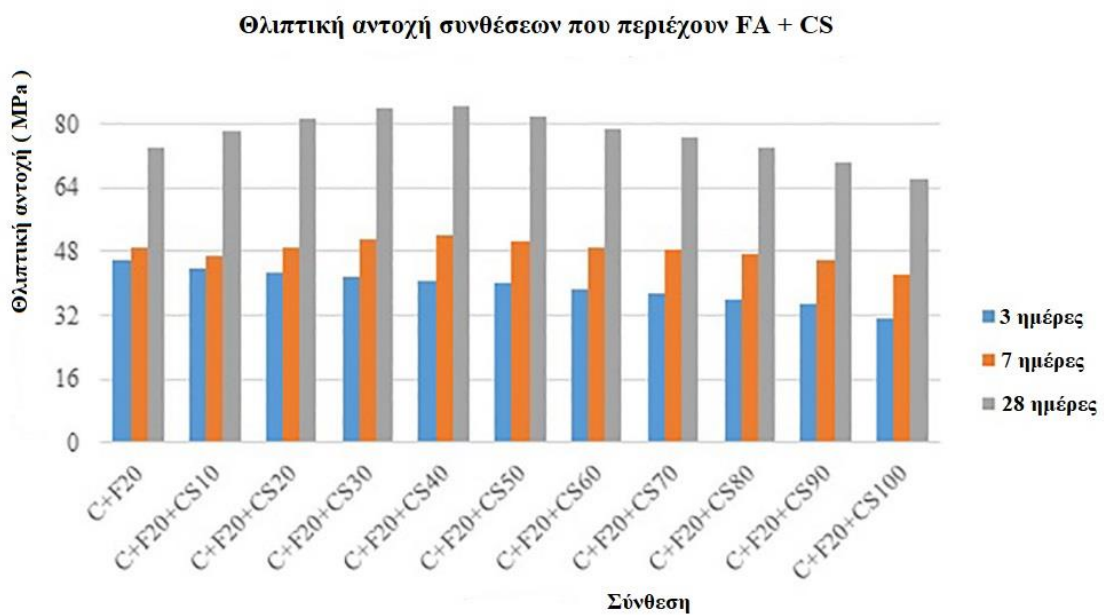
Όπως ήταν αναμενόμενο, η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων αυξάνεται ανάλογα με την ηλικία τους. Η υψηλότερη θλιπτική αντοχή παρατηρείται σε ηλικία 28 ημερών για κάθε σύνθεση. Η προσθήκη MP λειτουργεί ευεργετικά στη θλιπτική αντοχή των συνθέσεων μέχρι την προσθήκη MP στο μίγμα σε ποσοστό 20%. Η σύνθεση που περιείχε MP σε ποσοστό 20 % ( MP2 ) παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής σε κάθε ηλικία ελέγχου. Συγκεκριμένα, η θλιπτική αντοχή της ήταν μεγαλύτερη κατά 8.4 % σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς σε ηλικία 28 ημερών. Αντιθέτως, η σύνθεση MP3 με ποσοστό MP 30 % παρουσίασε κατά 5.7 % μειωμένη θλιπτική αντοχή σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς ( MP0 ) στις 28 ημέρες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.6**.

Η αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης αυξάνεται με την προσθήκη MP στο μίγμα. Η ποσοστιαία αύξηση σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς ( MP0 ) υπολογίστηκε σε 5.8 %, 11 % και 9.5 % αντίστοιχα για τις συνθέσεις MP1, MP2 και MP3. Παρατηρείται ότι όπως και στη θλιπτική αντοχή, η σύνθεση που περιείχε MP σε ποσοστό 20 % ( MP2 ) παρουσίασε την υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης ανεξαρτήτως ηλικίας των δοκιμίων. Στο **Σχήμα 1.7** απεικονίζεται η εξέλιξη της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης για κάθε σύνθεση.

Οι Sambangi et Arunakanthi συνέκριναν τις μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων ΑΣΣ που περιείχαν σε διαφορετικά ποσοστά ιπτάμενη τέφρα ( Fly Ash – FA ) και σκωρία χαλκού ( Copper Slag – CS ). Για τις ανάγκες του πειράματος παρασκευάστηκαν συνολικά 17 συνθέσεις ΑΣΣ. Έξι συνθέσεις περιέχουν μόνο FA ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό σε ποσοστά από 5 % έως 30 % ( C + F5, C + F10, C + F15, C + F20, C + F25 και C + F30 ). Άλλες 10 συνθέσεις περιέχουν FA σε σταθερό ποσοστό ίσο με 20 % και σκωρία χαλκού σε ποσοστά που κυμαίνονται από 10 % έως 100 % ως υλικό αντικατάστασης των λεπτόκοκκων αδρανών υλικών ( C + F20 + CS10, C + F20 + CS20, C + F20 + CS30, C + F20 + CS40, C + F20 + CS50, C + F20 + CS60, C + F20 + CS70, C + F20 + CS80, C + F20 + CS90 και C + F20 + CS100 ). Τέλος, η σύνθεση αναφοράς περιείχε μόνο τσιμέντο ως συνδετική κονία ( C ).



Σχήμα 1.8 Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής ( MPa ) των συνθέσεων που περιέχουν μόνο FA σε διάφορες ηλικίες.



Σχήμα 1.9 Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής ( MPa ) των συνθέσεων που περιέχουν FA και CS σε διάφορες ηλικίες.

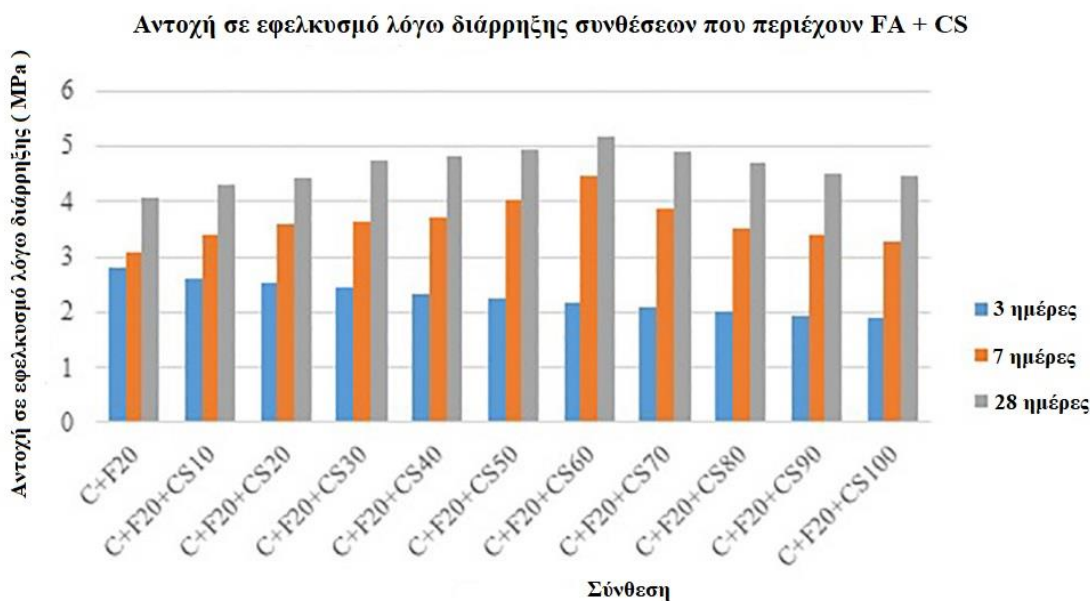
Η πολύ μεγάλη αύξηση της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων που περιείχαν FA στις 28 ημέρες είναι αναμενόμενη λόγω της υψηλής ποζολανικής δράσης που

εμφανίζει το συγκεκριμένο λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό. Η θλιπτική αντοχή των συνθέσεων που περιείχαν μόνο FA παρουσιάζει αυξητική τάση για ποσοστό αντικατάστασης από 5 % μέχρι 20 %, ενώ μειώνεται για περαιτέρω αύξηση του ποσοστού FA στο μίγμα. Η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής εμφανίστηκε στο μίγμα με ποσοστό FA 20 % οριακά κάτω από 75 MPa με όλες τις συνθέσεις να ανήκουν σε κατηγορία σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Στο **Σχήμα 1.8** παρουσιάζονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων FA.

Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής είναι μεγαλύτερη για τις συνθέσεις ΑΣΣ που περιείχαν CS σε ποσοστό μέχρι 40 % σε σχέση με αυτές που περιείχαν μόνο FA. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη τιμή θλιπτικής αντοχής της συγκεκριμένης έρευνας αφορά τη σύνθεση C + F20 + CS40 στα 85.53 MPa. Η θλιπτική αντοχή των συνθέσεων ΑΣΣ που περιείχαν CS παρουσιάζει αυξητικές τάσεις για ποσοστά αντικατάστασης από 10 % CS έως 40 % CS και κυμαίνεται από 79.43 MPa έως 85.53 MPa, ενώ στη συνέχεια μειώνεται για περαιτέρω αύξηση του ποσοστού CS στο μίγμα. Η μικρότερη τιμή θλιπτικής αντοχής ανήκει στην σύνθεση C + F20 + CS100, στην οποία αντικαταστάθηκε το 100 % των λεπτόκοκκων αδρανών από CS. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής με την προσθήκη CS εξηγείται από το μικρό μέγεθος των σωματιδίων του συγκεκριμένου λεπτόκοκκου υλικού που πληρώνει αποτελεσματικά τα κενά των πόρων του ΑΣΣ. Στο **Σχήμα 1.9** παρουσιάζονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων που περιείχαν FA+CS όπως προέκυψαν από τους ελέγχους.



Σχήμα 1.10 Αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης ( MPa ) των συνθέσεων που περιέχουν μόνο FA σε διάφορες ηλικίες.



Σχήμα 1.11 Αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης (MPa) των συνθέσεων που περιέχουν FA και CS σε διάφορες ηλικίες

Η αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης για τις συνθέσεις που περιείχαν μόνο FA παρουσιάζει παρόμοιο ρυθμό μεταβολής με την αντοχή σε θλίψη των συνθέσεων. Συγκεκριμένα, αυξάνεται για ποσοστό FA από 5 % έως 20 %, ενώ στη συνέχεια μειώνεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι συνθέσεις πλην αυτής που περιέχει FA σε ποσοστό 20 %, παρουσίασαν μικρότερες αντοχές σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς που περιείχε μόνο τσιμέντο. Η σύνθεση C + F20 παρουσίασε τη μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης στα 4.2 MPa αυξημένη κατά 8 % σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Οι αντοχές σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης των συνθέσεων απεικονίζονται στο **Σχήμα 1.10**.

Οι συνθέσεις που περιείχαν FA και CS ως υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου και των λεπτόκοκκων αδρανών αντίστοιχα, παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης σε σχέση με αυτές που περιείχαν μόνο FA. Η C + F20 + CS40 εμφάνισε αντοχή σε εφελκυσμό στα 4.82 MPa, μεγαλύτερη κατά 14 % σε σχέση με την σύνθεση C + F20. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.11**.

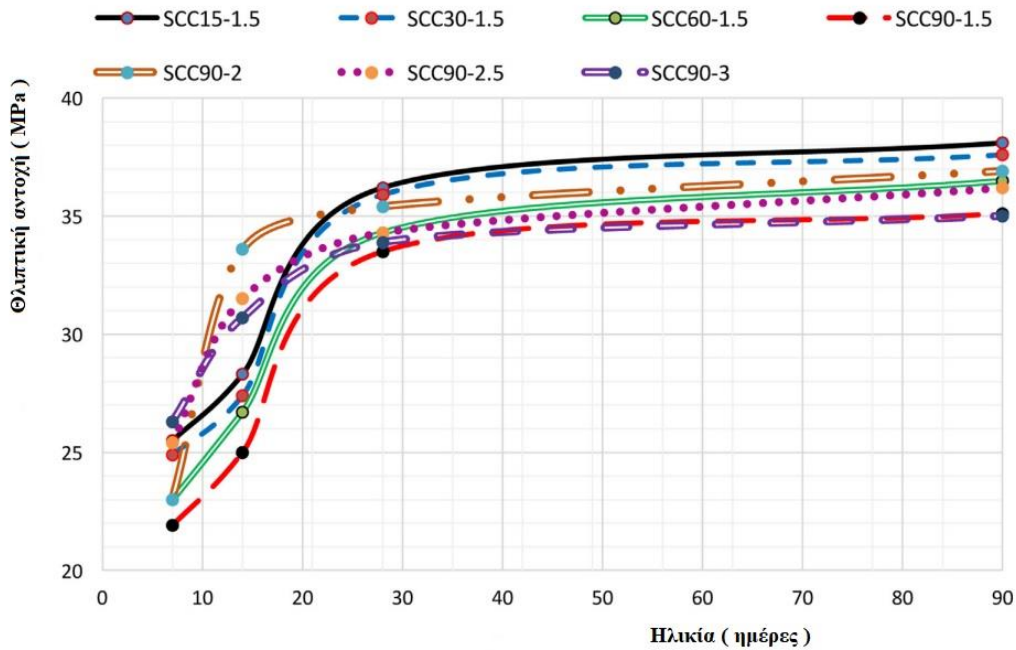
Οι Zeyad et Almakki διερεύνησαν την επίδραση που έχουν ο χρόνος ανάμιξης και η ποσότητα του υπερρευστοποιητή ( Superplasticizer – SP ) στις μηχανικές ιδιότητες του ΑΣΣ. Για τις ανάγκες της έρευνας, παρασκευάστηκαν δέκα συνθέσεις ΑΣΣ με διαφορετικούς χρόνους ανάμιξης των συστατικών του και διαφορετικές ποσότητες υπερρευστοποιητή ως ποσοστό του βάρους του τσιμέντου. Οι χρόνοι ανάμιξης κυμαίνονται από 15 έως 90 λεπτά και η ποσότητα υπερρευστοποιητή ( SP ) από 1.5 % έως 3 % του βάρους του τσιμέντου κάθε σύνθεσης. Οι συνθέσεις περιείχαν την ίδια ποσότητα τσιμέντου, πυριτικής παιπάλης ( SF ) ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό, χονδρόκοκκων αδρανών ( coarse aggregate – CA ), λεπτόκοκκων αδρανών ( fine aggregate – FA ) και νερού. Οι ακριβείς αναλογίες των συστατικών κάθε σύνθεσης αποτυπώνονται στον **Πίνακα 1.26**.



Πίνακας 1.26 Αναλογίες συστατικών συνθέσεων ΑΣΣ.

Σύνθεση	Τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )	SF (kg/m <sup>3</sup> )	C.A. (kg/m <sup>3</sup> )	F.A (kg/m <sup>3</sup> )	Νερό (kg/m <sup>3</sup> )	S.P. (%)	Χρόνος ανάμιξης (min)
SCC <sub>15-1.5</sub>	350	150	822	846	200	1.5	15
SCC <sub>30-1.5</sub>	350	150	822	846	200	1.5	30
SCC <sub>60-1.5</sub>	350	150	822	846	200	1.5	60
SCC <sub>90-1.5</sub>	350	150	822	846	200	1.5	90
SCC <sub>15-2</sub>	350	150	822	846	200	2.0	15
SCC <sub>90-2</sub>	350	150	822	846	200	2.0	90
SCC <sub>15-2.5</sub>	350	150	822	846	200	2.5	15
SCC <sub>90-2.5</sub>	350	150	822	846	200	2.5	90
SCC <sub>15-3</sub>	350	150	822	846	200	3.0	15
SCC <sub>90-3</sub>	350	150	822	846	200	3.0	90

Οι συνθέσεις υποβλήθηκαν σε δοκιμές υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε δοκιμή προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής, καθώς και δοκιμή υπολογισμού της εφελκυστικής αντοχής λόγω διάρρηξης των δοκιμίων κάθε σύνθεσης.



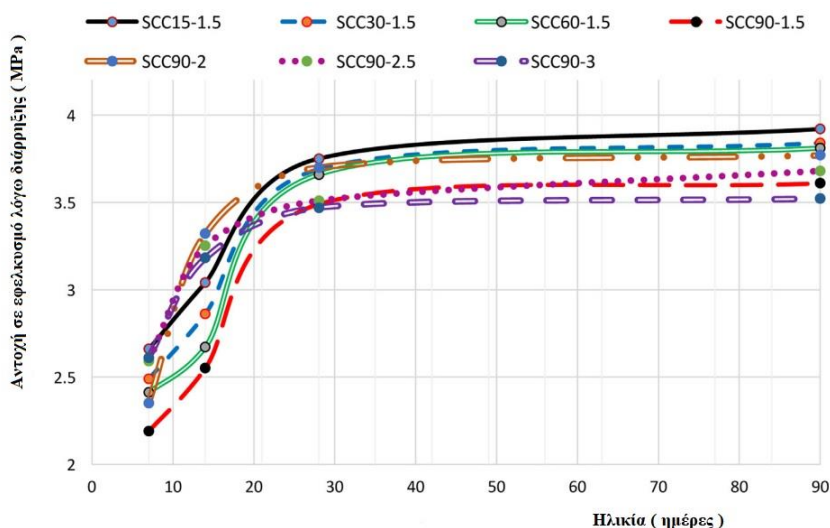
Σχήμα 1.12 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ΑΣΣ σε MPa σε συνάρτηση με την ηλικία τους σε ημέρες.

Είναι φανερό ότι η αύξηση του χρόνου ανάμιξης επιδρά αρνητικά στην θλιπτική αντοχή των δοκιμίων. Η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων στις 7 ημέρες προσδιορίστηκε σε 25.5 MPa, 24.9 MPa, 23 MPa και 21.9 MPa, ενώ στις 90 ημέρες υπολογίστηκε σε 38.1 MPa, 37.1 MPa, 36.5 MPa και 35.1 MPa για χρόνο ανάμιξης 15, 30, 60 και 90



λεπτά αντίστοιχα. Η αύξηση του χρόνου ανάμιξης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εργασιμότητας του μίγματος και την απώλεια της ικανότητας του ΑΣΣ να ρέει υπό το ίδιο βάρος του με αποτέλεσμα να εγκλωβίζεται μεγαλύτερη ποσότητα αέρα στο νωπό ΑΣΣ. Αυτή η αύξηση του περιεχόμενου αέρα στο μίγμα έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της θλιπτικής αντοχής του ΑΣΣ για μεγαλύτερους χρόνους ανάμιξης.

Η αύξηση της ποσότητας υπερρυστοποιητή στο μίγμα ΑΣΣ είχε ως αποτέλεσμα την μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής του. Η θλιπτική αντοχή των δοκιμών στις 28 ημέρες υπολογίστηκε σε 33.5 MPa, 35.4 MPa, 34.3 MPa και 33.9 MPa για περιεκτικότητα υπερρυστοποιητή στο 1.5 %, 2.0 %, 2.5 % και 3 % ως προς το βάρος του τσιμέντου της σύνθεσης. Η μικρή αύξηση της αντοχής σε θλίψη που παρατηρείται με την προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας υπερρυστοποιητή στο μίγμα ίσως εξηγείται από την διατήρηση των ιδιοτήτων του νωπού σκυροδέματος για περισσότερο χρόνο, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να μην χάνεται η ικανότητα του ΑΣΣ να συμπυκνώνεται χωρίς δόνηση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων ΑΣΣ απεικονίζονται στο **Σχήμα 1.12**.



Σχήμα 1.13 Εξέλιξη της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης των συνθέσεων ΑΣΣ σε MPa σε συνάρτηση με την ηλικία τους σε ημέρες.

Η αύξηση του χρόνου ανάμιξης έχει δυσμενείς επιπτώσεις και στην εφελκυστική αντοχή του ΑΣΣ. Η αντοχή των δοκιμών σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης στις 28 ημέρες υπολογίστηκε σε 3.75 MPa, 3.69 MPa, 3.66 MPa και 3.49 MPa, για χρόνους ανάμιξης 15, 30, 60 και 90 λεπτά αντίστοιχα. Όπως συμβαίνει και με την αντοχή του ΑΣΣ σε θλίψη, η μείωση της εργασιμότητας και της ικανότητας αυτοσυμπύκνωσης που παρουσιάζει το ΑΣΣ όταν αυξάνεται ο χρόνος ανάμιξης είναι υπεύθυνες για τη μείωση της αντοχής του σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης. Αντιθέτως, η αύξηση της ποσότητας υπερρυστοποιητή στο μίγμα έχει ως αποτέλεσμα την διατήρηση των χαρακτηριστικών του νωπού ΑΣΣ (ρυστότητα, πληρωτική ικανότητα και ικανότητα ροής υπό το ίδιο βάρος του) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα την ελαφρά αύξηση της

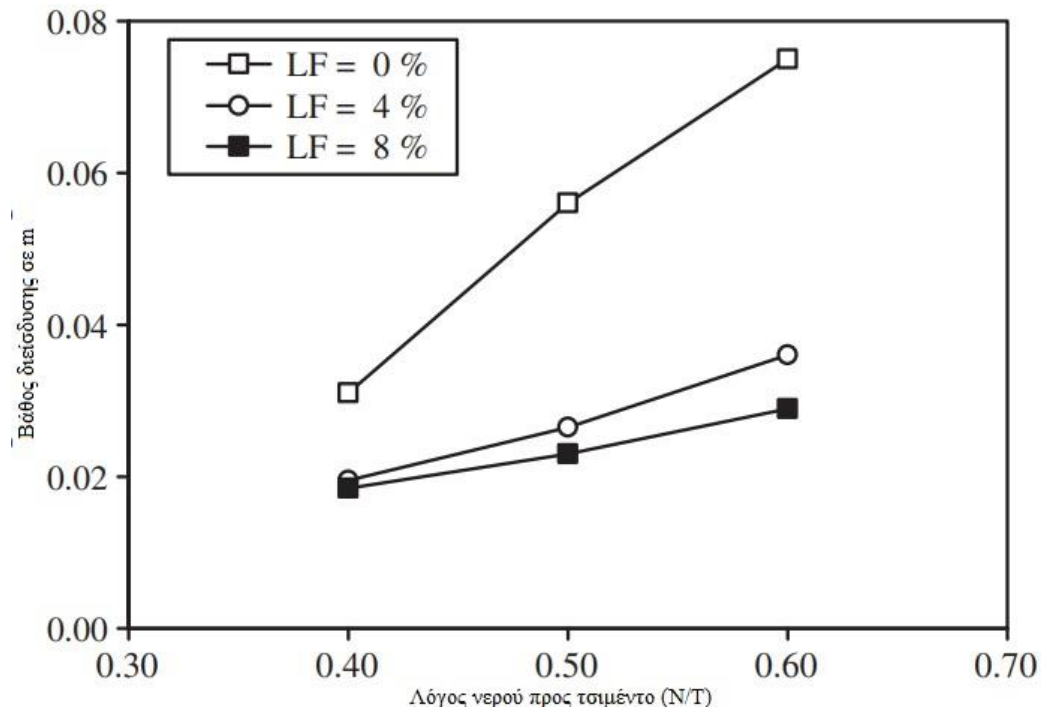
αντοχής του σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης. Στο **Σχήμα 1.13** παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν από τη δοκιμή προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής λόγω διάρρηξης των συνθέσεων ΑΣΣ.

## **1.5 Φυσικές ιδιότητες ΑΣΣ**

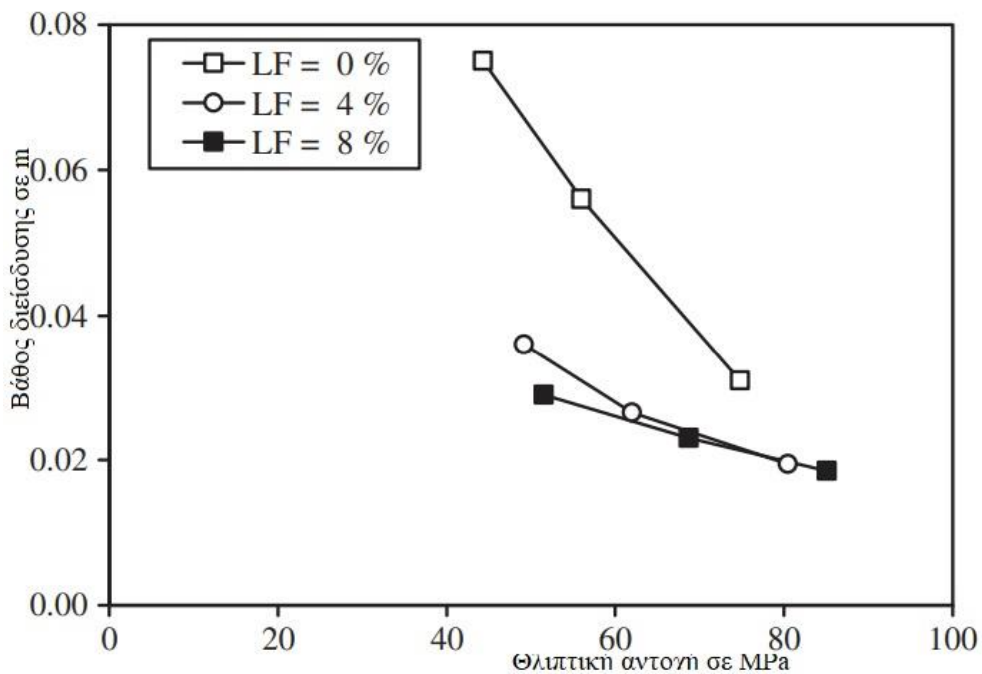
### **1.5.1 Υδατοπερατότητα**

Η Υδατοπερατότητα του σκυροδέματος, δηλαδή η ικανότητα ενός ρευστού υπό πίεση να ρέει διαμέσου της μάζας ενός στερεού υλικού σχετίζεται άμεσα με την αντοχή του. Και οι δύο ιδιότητες είναι στενά συνδυασμένες με το τριχοειδές πορώδες της μικροδομής του σκυροδέματος. Η τιμή του πορώδους καθορίζεται από τον λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T) και το βαθμό της ενυδάτωσης. Η κατανομή του μεγέθους των πόρων και η διασύνδεσή τους είναι αποφασιστικές για την τιμή της Υδατοπερατότητας στη σκληρυμένη κατάσταση. Το ΑΣΣ γενικά έχει σημαντικά χαμηλότερο λόγο κενών από το συμβατικό σκυρόδεμα λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας λεπτόκοκκων αδρανών που χρησιμοποιούνται στις συνθέσεις του. Επίσης, τα μίγματα ΑΣΣ έχουν πάντοτε χαμηλότερο λόγο N/T σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα οπότε το τριχοειδές πορώδες του ΑΣΣ είναι μικρότερο από αυτό του συμβατικού. Δηλαδή το ΑΣΣ διαθέτει μικρότερο αριθμό μεγάλων πόρων οι οποίοι δεν έχουν αναπτύξει σημαντική συνδεσιμότητα μεταξύ τους. Η σημαντικότερη αιτία της αύξησης της τιμής της Υδατοπερατότητας είναι η παρουσία μικρορηγματώσεων στη διεπιφανειακή ζώνη τσιμεντόπαστας – αδρανών. Αυτές οι μικρές ρωγμές οφείλονται στο μέγεθος των αδρανών και στις δυσμενείς επιδράσεις της συστολής ξήρανσης και της θερμικής συστολής. Η πρόοδος των μικρορηγματώσεων οδηγεί στην αύξηση της επικοινωνίας μεταξύ τους και συνεπάγεται την αύξηση της Υδατοπερατότητας του σκυροδέματος.

Οι Chen et al. ερεύνησαν την χρήση λεπτόκοκκου ασβεστολιθικού υλικού (limestone filler ή LF) ως πρόσμικτο στο ΑΣΣ και τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η ανθεκτικότητά του σε Υδατοπερατότητα. Τα ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στο ΑΣΣ έχουν λεπτότητα κόκκου αντίστοιχη με αυτή του τσιμέντου και με τον τρόπο αυτό συντελούν στη μείωση του λόγου των κενών μεταξύ τσιμεντόπαστας – αδρανών και στη δημιουργία περισσότερο συμπαγούς μικροδομής χωρίς κενά εγκλωβισμένου αέρα που μειώνουν τις αντοχές. Παράλληλα η αντικατάσταση από ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά μέρους της ποσότητας τσιμέντου που απαιτείται για επίτευξη της ίδιας αντοχής έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού όγκου της τσιμεντόπαστας και συνεπακόλουθα σημαντική ελάττωση της συστολής ξήρανσης του ΑΣΣ. Η συνεισφορά αυτή των ασβεστολιθικών πληρωτικών υλικών στο ΑΣΣ φαίνεται ήδη από των νωπή φάση καθώς περιορίζονται δραστικά τα φαινόμενα εξίδρωσης ενώ στη σκληρυμένη κατάσταση είναι εμφανής η μείωση του βάθους διείδυσης στη δοκιμή Υδατοπερατότητας. Συγκεκριμένα, το βάθος διείδυσης μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της περιεκτικότητας του μίγματος σε ασβεστολιθικό πληρωτικό και μάλιστα η μείωση είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T).



Σχήμα 1.14 Βάθος διείσδυσης ύδατος σε συνάρτηση με τον λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T)



Σχήμα 1.15 Βάθος διείσδυσης ύδατος σε συνάρτηση με την θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου

Για σταθερό λόγο  $N/T = 0.60$  το βάθος διείσδυσης νερού κατά την πρότυπη δοκιμή υδατοπερατότητας είναι 0.075 , 0.036 και 0.029 m για ποσοστό LF 0 , 4 % , 8

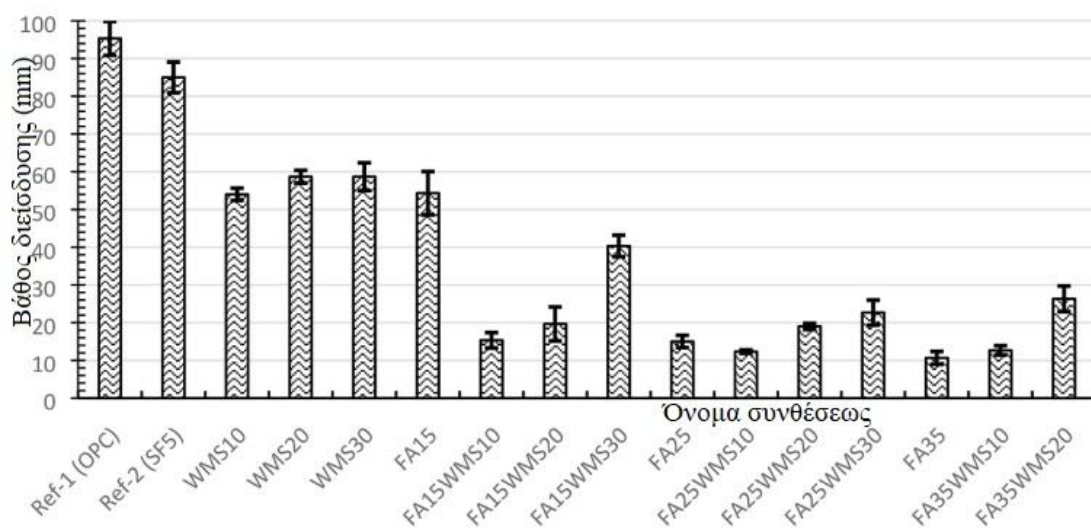
% αντίστοιχα. Δηλαδή το μίγμα που περιέχει 4 % LF παρουσιάζει μείωση του βάθους διείσδυσης νερού κατά 52 % σε σχέση με το μίγμα που δεν περιέχει ασβεστολιθική σκόνη, ενώ το μίγμα που περιέχει 8 % LF εμφανίζει μείωση του βάθους διείσδυσης κατά 19.4 % σε σχέση με αυτό που περιέχει την μισή ποσότητα LF. Ενδιαφέρον είναι επίσης ότι με την αύξηση του λόγου N/T από 0.40 σε 0.50 και 0.60 το βάθος διείσδυσης για τα μίγματα που δεν περιέχουν LF αυξάνεται κατά 80.6 % και 141.9 % αντίστοιχα ενώ στα μίγματα με 4 % LF η αντίστοιχη αύξηση περιορίζεται σε 35.9 % και 84.6 % αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 1.14** και στο **Σχήμα 1.15** παρουσιάζονται το βάθος διείσδυσης σε συνάρτηση με το λόγο N/T και τη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων ΑΣΣ αντίστοιχα.

Αντίστοιχα, η προσθήκη LF οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής κυβικού δοκιμίου ηλικίας 28 ημερών. Τα μίγματα ΑΣΣ με περιεκτικότητα LF 4 % εμφανίζουν αύξηση της θλιπτικής αντοχής 7.6 % , 10.7 % και 11.1 % για λόγους N/T 0.4 , 0.5 και 0.6 αντίστοιχα. Στα μίγματα ΑΣΣ με περιεκτικότητα 8 % LF η αύξηση της θλιπτικής αντοχής είναι ακόμη μεγαλύτερη και συγκεκριμένα 13.8 % , 22.7 % και 16.3 % για λόγους N/T 0.4 , 0.5 και 0.6 αντίστοιχα. Αυτή η αύξηση της θλιπτικής αντοχής για δεδομένο λόγο N/T ίσως οφείλεται στην αύξηση του βαθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου λόγω της επίδρασης των εξαιρετικά λεπτόκοκκων ασβεστολιθικών πληρωτικών υλικών που μειώνουν δραστικά τα φαινόμενα εξίδρωσης στη νωπή φάση.

Οι Choudhari et al. διερεύνησαν την επίδραση που έχουν ορισμένα βιομηχανικά παραπροϊόντα στην αντοχή σε υδατοπερατότητα ΑΣΣ υψηλής αντοχής. Συγκεκριμένα δημιούργησαν συνθέσεις με διαφορετικά ποσοστά ιπτάμενης τέφρας (FA – Flying Ash ) , μαρμαροπολτού (WMS - Waste Marble Slurry) και σταθερή ποσότητα πυριτικής παιπάλης (SF – Silica Fume) 5% και τις υπέβαλαν σε πρότυπη δοκιμή υδατοπερατότητας κατά DIN 1048 – 1991. Το πρώτο μίγμα αναφοράς (Ref-1) περιέχει μόνο τσιμέντο ενώ το δεύτερο δείγμα αναφοράς περιέχει πυριτική παιπάλη ως εναλλακτικό τσιμεντοειδές υλικό σε ποσοστό 5 %. Όλα τα υπόλοιπα μίγματα περιέχουν FA σε ποσοστά που κυμαίνονται από 15 % έως 35 % και WMS από 10 % έως 30 % σε επαναλαμβανόμενες, σταθερές αναλογίες. Οι ακριβείς συνθέσεις φαίνονται στον **Πίνακα 1.27**.

**Πίνακας 1.27 Συστατικά και αναλογίες συνθέσεων ΑΣΣ.**

Μίγμα	Νερό (kg/m <sup>3</sup> )	Τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )	SF (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	WMS (kg/m <sup>3</sup> )	Άμμος (kg/m <sup>3</sup> )	Αδρανή (kg/m <sup>3</sup> )	SP (% of total binder)
Ref-1 (OPC)	181.5	550	-	-	-	970	722	1.40
Ref-2 (SF5)	181.5	522.5	27.5	-	-	970	722	1.50
WMS10	181.5	467.5	27.5	-	55	970	722	1.10
WMS20	181.5	412.5	27.5	-	110	970	722	0.90
WMS30	181.5	357.5	27.5	-	165	970	722	0.65
FA15	181.5	440	27.5	82.5	-	970	722	0.60
FA15WMS10	181.5	385	27.5	82.5	55	970	722	0.35
FA15WMS20	181.5	330	27.5	82.5	110	970	722	0.30
FA15WMS30	181.5	275	27.5	82.5	165	970	722	0.33
FA25	181.5	385	27.5	137.5	-	970	722	0.30
FA25WMS10	181.5	330	27.5	137.5	55	970	722	0.25
FA25WMS20	181.5	275	27.5	137.5	110	970	722	0.20
FA25WMS30	181.5	220	27.5	137.5	165	970	722	0.25
FA35	181.5	330	27.5	192.5	-	970	722	0.22
FA35WMS10	181.5	275	27.5	192.5	55	970	722	0.20
FA35WMS20	181.5	220	27.5	192.5	110	970	722	0.19



Σχήμα 1.16 Βάθος διείσδυσης ύδατος σε πρότυπη δοκιμή υδατοπερατότητας.

Συγκρίνοντας τα δύο δοκίμια αναφοράς γίνεται εμφανής η ευνοϊκή επίδραση της ύπαρξης πυριτικής παιπάλης ακόμη και σε μικρή ποσότητα. Το βάθος διείσδυσης μειώνεται από τα 95 mm σε 85 mm. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα της εξαιρετικά λεπτόκοκκης SF να δρα ως πληρωτικό υλικό μειώνοντας το ποσοστό των διασυνδεδεμένων πόρων του ΑΣΣ. Είναι εμφανής η δραστική επίδραση της προσθήκης FA στην μείωση της Υδατοπερατότητας σε σχέση με τις συνθέσεις αναφοράς. Χάρη στην ποζολανική συμπεριφορά της επιδρά στους πόρους μειώνοντας το μέγεθός τους και τη διασύνδεσή τους συμβάλλοντας στην μεγάλη μείωση του βάθους διείσδυσης. Σε ποσοστό περιεκτικότητας FA 15 % το βάθος διείσδυσης περιορίζεται κατά 42 % και 35 % αντίστοιχα σε σχέση με το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> μίγμα αναφοράς, ενώ σε ποσοστό FA 25 % τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 84.2 % και 82.3 % αντίστοιχα. Όταν η περιεκτικότητα σε FA φτάνει το 35 % το βάθος διείσδυσης νερού πέφτει στα 11 mm που είναι το χαμηλότερο της δοκιμής. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως τα μίγματα που περιέχουν FA και WMS ( που δεν έχει ποζολανική δράση ) συνεργάζονται πολύ καλά στην αύξηση της αντοχής σε διαπερατότητα καθώς όλες οι συνθέσεις (πλην μίας) στις οποίες συνυπάρχουν ως υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου εμφανίζουν βάθος διείσδυσης μικρότερο από 50 mm. Φαίνεται πως η ύπαρξη ενός ποζολανικού υλικού (FA) και ενός υλικού με ασβεστολιθική προέλευση (WMS) αυξάνουν την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν την μείωση της ποσότητας τσιμέντου που απαιτείται με προφανείς ευεργετικές συνέπειες στο περιβάλλον. Στο **Σχήμα 1.16** καταγράφεται το βάθος διείσδυσης για κάθε σύνθεση ΑΣΣ.

Οι Danish et Ganez ισχυρίζονται ότι η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου από μετακαολίνη (metakaolin – MK), ένα εξαιρετικά λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό με ισχυρή ποζολανική δράση, οδηγεί σε αύξηση της ανθεκτικότητάς των μιγμάτων ΑΣΣ. Συγκεκριμένα, η ποζολανική αντίδραση που οφείλεται στην υψηλή συγκέντρωση SiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> στη σύσταση του μετακαολίνης, οδηγεί σε μείωση του ρυθμού της ενυδάτωσης

με αποτέλεσμα να παράγεται μικρότερη θερμότητα κατά την εξώθερμη αντίδραση. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στη σημαντική μείωση των μικρορηγματώσεων στη μικροδομή του ΑΣΣ καθώς και στη μείωση του μεγέθους των πόρων του υλικού. Η προσθήκη μετακαολίνη στο μίγμα ΑΣΣ έχει ως αποτέλεσμα επίσης, το σχηματισμό επιπλέον ποσότητας C-S-H ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τη δημιουργία πορτλαντίτη (Ca(OH)<sub>2</sub>). Ο σχηματισμός C-S-H υπό τη μορφή γέλης σφραγίζει τα κενά στη μικροδομή του ΑΣΣ μειώνοντας τις διαστάσεις των πόρων και την επικοινωνία μεταξύ τους και οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής του ΑΣΣ σε Υδατοπερατότητα. Χαρακτηριστικά, παρατηρήθηκε ότι διπλασιασμός του ποσοστού μετακαολίνη από 5 % σε 10 % μείωσε το μέγεθος των μικρορηγματώσεων στο μισό.

Οι El Mir et Nehme διερεύνησαν την επίδραση που έχει η προσθήκη διογκωμένου περλίτη (Expanded Perlite – EP), μετακαολίνη (MK) και σκόνη ασβεστολίθου (Limestone Powder - LP) στην ανθεκτικότητα του ΑΣΣ. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν τέσσερις συνθέσεις συμβατικά δονούμενου σκυροδέματος και οκτώ συνθέσεις ΑΣΣ που περιείχαν τα ως άνω εναλλακτικά πληρωτικά υλικά σε διάφορες αναλογίες. Οι ακριβείς αναλογίες των συνθέσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.28.

**Πίνακας 1.28 Αναλογίες συστατικών συνθέσεων ελέγχου.**

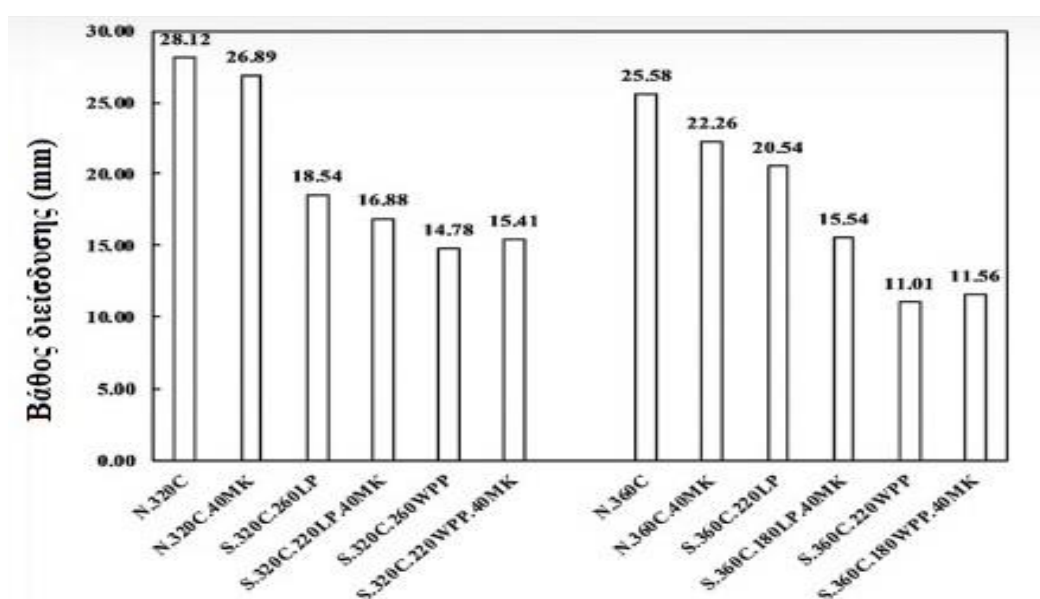
Σύνθεση	Περιγραφή
NVC320C	Συμβατικό σκυρόδεμα με 320 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο
NVC320C40MK	Συμβατικό σκυρόδεμα με 320 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο και 40 kg/m <sup>3</sup> MK
SCC320C260LP	ΑΣΣ με 320 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο και 260 kg/m <sup>3</sup> LP
SCC320C220LP40MK	ΑΣΣ με 320 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο 220 kg/m <sup>3</sup> LP 40 kg/m <sup>3</sup> MK
SCC320C260WPP	ΑΣΣ με 320 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο 260 kg/m <sup>3</sup> WPP
SCC320C220WPP40MK	ΑΣΣ με 320 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο και 220 kg/m <sup>3</sup> WPP 40 kg/m <sup>3</sup> MK
NVC360C	Συμβατικό σκυρόδεμα με 360 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο
NVC360C40MK	Συμβατικό σκυρόδεμα με 360 kg/m <sup>3</sup> και 40 kg/m <sup>3</sup> MK
SCC360C220LP	ΑΣΣ με 360 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο και 220 kg/m <sup>3</sup> LP
SCC360C180LP40MK	ΑΣΣ με 360 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο και 180 kg/m <sup>3</sup> LP 40 kg/m <sup>3</sup> MK
SCC360C220WPP	ΑΣΣ με 360 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο και 220 kg/m <sup>3</sup> WPP
SCC360C180WPP40MK	ΑΣΣ με 360 kg/m <sup>3</sup> τσιμέντο και 180 kg/m <sup>3</sup> WPP 40kg/m <sup>3</sup> MK

Γίνεται άμεσα φανερό ότι η προσθήκη διογκωμένου περλίτη στο ΑΣΣ οδηγεί σε σημαντική μείωση του βάθους διείσδυσης σε πρότυπη δοκιμή Υδατοπερατότητας. Η σύνθεση SCC320C260WPP παρουσίασε μείωση του βάθους διείσδυσης κατά 20 % σε σχέση με τη σύνθεση SCC320C260LP, ενώ η σύνθεση SCC320C220WPP40MK εμφάνισε μειωμένο βάθος διείσδυσης κατά 8.7 % σε σχέση με τη σύνθεση SCC320C220LP40MK. Η συνεισφορά του διογκωμένου περλίτη (WPP) στην αύξηση της αντοχής του ΑΣΣ σε Υδατοπερατότητα αυξάνεται ακόμη περισσότερο με την αύξηση της ποσότητας τσιμέντου στο μίγμα. Χαρακτηριστικά, το βάθος διείσδυσης της σύνθεσης SCC360C220WPP υπολογίστηκε μειωμένο κατά 46 % σε σχέση με το αντίστοιχο της σύνθεσης SCC360C220LP. Αντίστοιχα η σύνθεση SCC360C180WPP40MK παρουσίασε μικρότερο κατά 25 % βάθος διείσδυσης σε σχέση με τη σύνθεση SCC360C180LP40MK. Παρατηρείται ότι η αντικατάσταση της σκόνης ασβεστολίθου (LP) από διογκωμένα σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (WPP)

ίδιας ποσότητα οδηγεί σε σημαντική μείωση του βάθους διείσδυσης, δηλαδή σε μεγάλη αύξηση της αντοχής σε Υδατοπερατότητα του ΑΣΣ. Αυτό οφείλεται στις ποζολανικές ιδιότητες του WPP που επιτρέπουν την μείωση της ποσότητας πορτλαντίτη που παράγεται κατά την ενυδάτωση και την αύξηση του C-S-H που μειώνει το μέγεθος των πόρων και το δίκτυο επικοινωνίας τους. Τα αποτελέσματα της δοκιμής σε Υδατοπερατότητα των συνθέσεων περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1.29 και στο Σχήμα 1.17.

**Πίνακας 1.29 Αποτελέσματα πρότυπης δοκιμής Υδατοπερατότητας συνθέσεων.**

Σύνθεση	Βάθος διείσδυσης σε mm
NVC320C	28.13
NVC320C40MK	26.90
SCC320C260LP	18.55
SCC320C220LP40MK	16.89
SCC320C260WPP	14.78
SCC320C220WPP40MK	15.41
NVC360C	25.58
NVC360C40MK	22.26
SCC360C220LP	20.54
SCC360C180LP40MK	15.54
SCC360C220WPP	11.01
SCC360C180WPP40MK	11.56



Σχήμα 1.17 Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της πρότυπης δοκιμής ελέγχου σε Υδατοπερατότητα.



### 1.5.2 Αυτογενής Συστολή

Το ΑΣΣ παρουσιάζει μεγαλύτερη αυτογενή συστολή σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα καθώς οι συνθέσεις του χαρακτηρίζονται κατά κανόνα από χαμηλότερο λόγο νερού προς τσιμέντο και συνολικά μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου και τσιμεντοειδών υλικών. Σε περίπτωση δε, που στη σύνθεσή του περιλαμβάνονται πρόσθετα υλικά με ποζολανική δράση η αυτογενής συστολή αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Για την αποφυγή του φαινομένου πρέπει να εξετάζεται η αύξηση του λόγου νερού προς τσιμέντο.

### 1.5.3 Συστολή ξήρανσης

Η συστολή ξήρανσης (dry shrinkage) είναι μία φυσική ιδιότητα του σκυροδέματος που οφείλεται στις μεταβολές που συμβαίνουν στην ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα. Οφείλεται κατά κύριο λόγο στην απομάκρυνση του φυσικά προσροφημένου νερού από τις ασβεστοπυριτικές ενώσεις κατά την διαδικασία της ενυδάτωσης όταν η υγρασία περιβάλλοντος είναι μικρότερη από την υγρασία κορεσμού. Μία δευτερεύουσα αιτία της συστολής ξήρανσης είναι η απομάκρυνση του νερού που βρίσκεται υπό υδροστατική πίεση στους μικρούς τριχοειδείς πόρους σκυροδέματος, δηλαδή τους πόρους μεγέθους έως 50 nm λόγω των ξηρών συνθηκών έκθεσης. Γενικά, σε ξηρές συνθήκες η συστολή ξήρανσης τείνει να αυξάνεται με τον χρόνο. Το ΑΣΣ χαρακτηρίζεται από αυξημένη ποσότητα λεπτόκοκκων υλικών σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερο όγκο τσιμεντόπαστας στην οποία οφείλονται τα φαινόμενα που οδηγούν σε συστολή ξήρανσης. Αυτό εξηγεί την σημαντικά μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης που εμφανίζει το ΑΣΣ σε σχέση με το συμβατικό τσιμέντο. Επίσης τα λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά που περιέχουν οι συνθέσεις ΑΣΣ εκ των πραγμάτων οδηγούν σε μείωση του μεγέθους των μικρών πόρων στα οποία εγκλωβίζεται νερό οδηγώντας σε ευκολότερη απομάκρυνση του νερού και επομένως σε μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης. Τέλος, η υποχρεωτική χρήση υπερρευστοποιητή στις συνθέσεις ΑΣΣ που προκαλεί καλύτερη διανομή των μη ενυδατωμένων κόκκων τσιμέντου ενδέχεται να συνεισφέρει στην μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Οι Abdalhmud et al. διερεύνησαν τη μακροπρόθεσμη συστολή ξήρανσης συνθέσεων ΑΣΣ που περιείχαν ιπτάμενη τέφρα (FA) σε διαφορετικά ποσοστά ως πληρωτικό υλικό. Μελέτησαν την επίδραση που έχουν η υγρασία και η ηλικία του δοκιμίου στην εξέλιξη του φαινομένου της συστολής και προσπάθησαν να τη συσχετίσουν με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε συνθέσεως. Στις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος χημικός παράγοντας μείωσης συστολών (Shrinkage reducing agent – SRA). Τα συστατικά και οι αναλογίες των συνθέσεων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.30**.

**Πίνακας 1.30** Συστατικά και αναλογίες συνθέσεων ΑΣΣ.

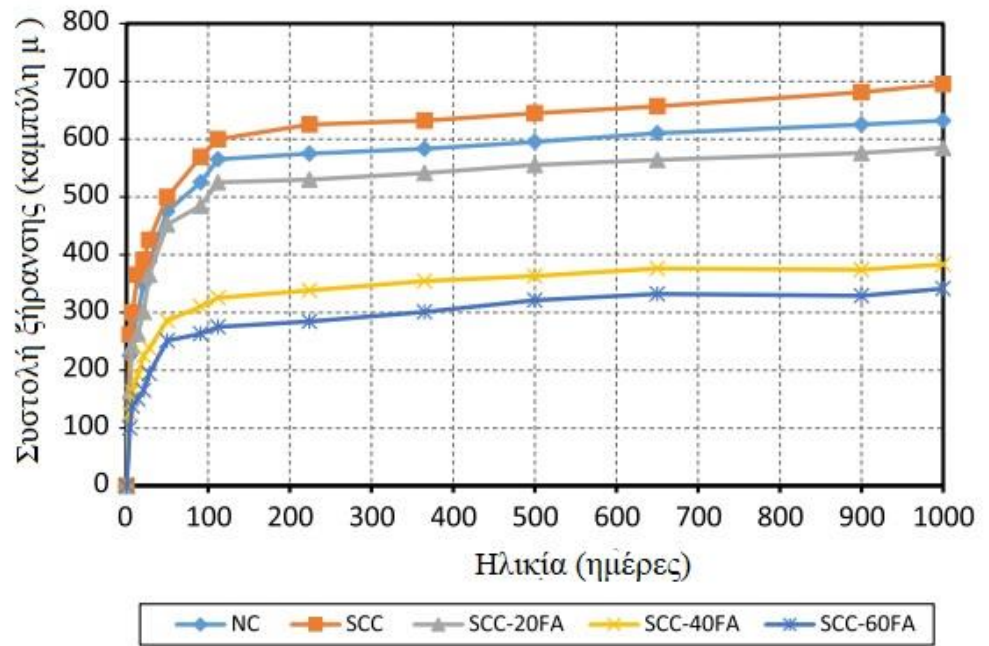


Σύνθεση	Λόγος N/T	Τσιμέντο + FA (Kg)	Τσιμέντο	FA	Νερό	Λεπτ. Άδρανή	Χονδρ. Άδρανή	SP (%)	SRA	A
NC-0.44	0.44	466	466	0	205	924	755	0	0	1.5
NC-0.33	0.33	622	622	0	205	883	640	0	0	1.5
SCC-0.44	0.44	450	450	0	198	780	890	1	0	1.5
SCC-0.33	0.33	550	550	0	180	780	890	1	0	1.5
SCC-0.44-20	0.44	450	360	90	198	780	890	1	1	1.5
SCC-0.33-20	0.33	550	440	110	180	780	890	1	1	1.5
SCC-0.44-40	0.44	450	270	180	198	780	890	1	1	1.5
SCC-0.33-40	0.33	550	330	220	180	780	890	1	1	1.5
SCC-0.44-60	0.44	450	180	270	198	780	890	1	1	1.5
SCC-0.33-60	0.33	550	220	330	180	780	890	1	1	1.5

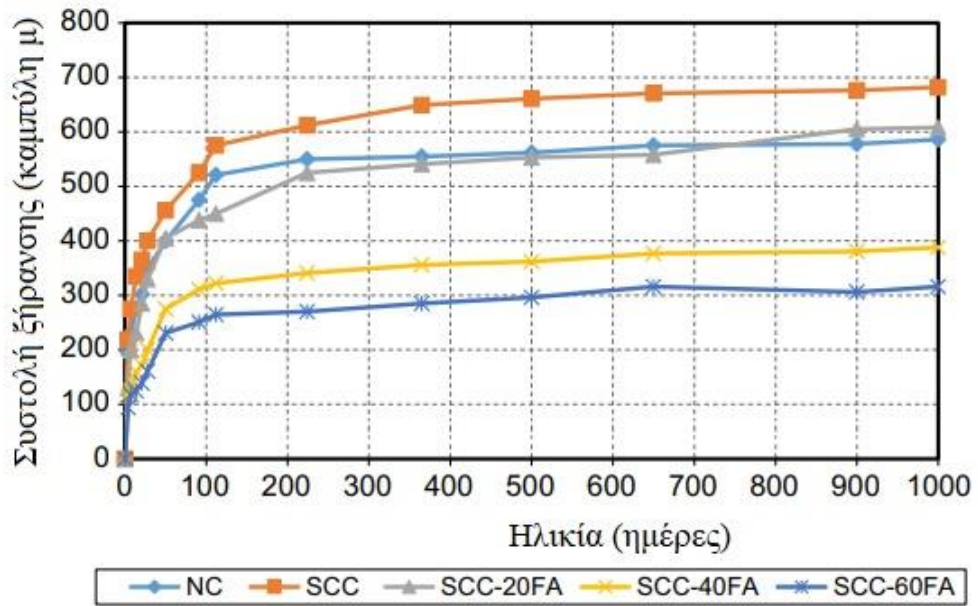
**Πίνακας 1.31** Συστολή ξήρανσης σε συνάρτηση με την ηλικία των δοκιμίων ΑΣΣ.

Σύνθεση	Ηλικία (ημέρες)						
	28	50	112	365	500	900	1000
NC-0.44	388	475	565	583	595	625	632
NC-0.33	350	400	521	555	562	578	586
SCC-0.44	425	500	600	632	645	681	695
SCC-0.33	400	456	575	649	661	676	682
SCC-0.44-20	365	452	525	541	555	576	585
SCC-0.33-20	330	405	450	541	553	605	608
SCC-0.44-40	238	286	325	354	363	374	383
SCC-0.33-40	200	275	322	356	362	381	388
SCC-0.44-60	194	251	275	301	321	329	341
SCC-0.33-60	161	231	265	285	296	306	316

Από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.31** παρατηρείται ότι οι συνθέσεις ΑΣΣ εμφανίζουν κατά μέσο όρο 10 % – 15 % μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης από αυτές του συμβατικά δονούμενου σκυροδέματος για κάθε ηλικία. Επίσης, η αύξηση του λόγου N/T οδηγεί σε αύξηση της συστολής στο ΑΣΣ ανάλογα με την ποσότητα FA που περιέχουν καθώς η λεπτόκοκκη σύσταση και η ποζολανική δράση της FA οδηγεί σε αύξηση της υδατοαπορροφητικότητας. Επειδή η FA περιέχει ελάχιστη ποσότητα ασβεστολίθου, όταν αντικαθιστά μέρος του τσιμέντου στο μίγμα ο ρυθμός ενυδάτωσης μειώνεται σημαντικά, ελαττώνοντας και τη συστολή ξήρανσης. Το μίγμα ΑΣΣ με το μεγαλύτερο ποσοστό (60 % ) FA παρουσίασε μειωμένη συστολή ξήρανσης κατά 49 % σε σχέση με αυτό που δεν περιείχε FA σε ηλικία 1000 ημερών. Στο **Σχήμα 1.18** και στο **Σχήμα 1.19** φαίνεται η εξέλιξη της συστολής ξήρανσης σε σχέση με την ηλικία των συνθέσεων για λόγο N/T =0.44 και για λόγο N/T=0.33 αντίστοιχα.

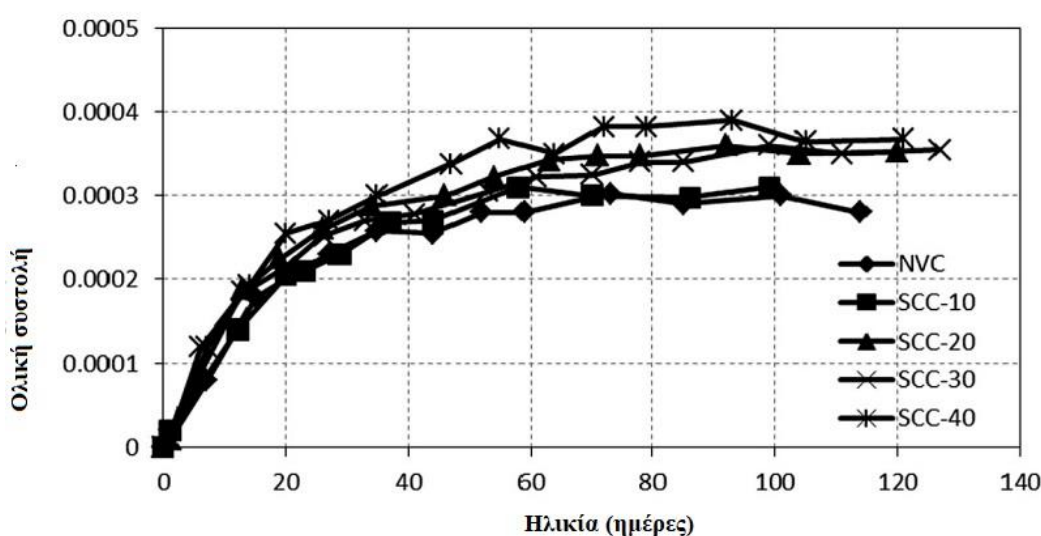


Σχήμα 1.18 Διάγραμμα συστολής ξήρανσης σε σχέση με την ηλικία των συνθέσεων για λόγο N/T=0.44



Σχήμα 1.19 Διάγραμμα συστολής ξήρανσης σε σχέση με την ηλικία των συνθέσεων για λόγο N/T=0.33

Οι El-Mohsen et al μελέτησαν ως προς τη συστολή ξήρανσης 4 συνθέσεις ΑΣΣ που περιείχαν CKD σε ποσοστά 10 % , 20 % , 30 % και 40 % αντίστοιχα. Οι συνθέσεις ΑΣΣ συγκρίθηκαν με τη σύνθεση αναφοράς που περιλαμβάνει δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος χωρίς πληρωτικά υλικά. Η συστολή ξήρανσης όλων των συνθέσεων ΑΣΣ παρουσιάζεται μεγαλύτερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος και παρατηρείται ότι τα μίγματα ΑΣΣ με υψηλότερο ποσοστό CKD συνεχίζουν να συστέλλονται για περισσότερο χρονικό διάστημα (πέραν των 100 ημερών ) σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Η σύνθεση που περιείχε το μικρότερο ποσοστό CKD (10 % ) είχε περίπου την ίδια συστολή με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Όλα τα μίγματα παρουσίασαν το 50 % της συνολικής συστολής τις πρώτες 28 ημέρες. Το μίγμα που περιείχε 20 % CKD παρουσίασε μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης κατά 22 % σε σχέση με το συμβατικό. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο **Σχήμα 1.20**.



Σχήμα 1.20 Διάγραμμα ολικής συστολής πρισματικών δοκιμίων σε σχέση με την ηλικία

Φαίνεται λοιπόν πως η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου με CKD για δημιουργία συνθέσεων ΑΣΣ είναι εφικτή αλλά λόγω της απουσίας ποζολανικής δραστηριότητας του λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού οι μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων συνθέσεων δεν βελτιώνονται με τον χρόνο εκτός από την αντοχή σε κάμψη ,μόνο όμως στις συνθέσεις που περιέχουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό CKD. Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων ΑΣΣ είναι απολύτως αποδεκτά που σημαίνει ότι το CKD μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό πληρωτικό υλικό στην παραγωγή μιγμάτων ΑΣΣ.

#### 1.5.4 Πλαστική συστολή

Το ΑΣΣ δεν παρουσιάζει σημαντικά φαινόμενα εξίδρωσης. Η πιο συμπαγής μικροδομή του, συνεπεία των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών και της καλύτερης διαβάθμισης των αδρανών του ,περιορίζει τα φαινόμενα μεταφοράς στους πόρους του

σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι συντήρησή του σε υγρές συνθήκες τις πρώτες 24 ώρες από τη σύνθεσή του για την αποφυγή ξήρανσης. Αντιθέτως, σε συνθέσεις ΑΣΣ με υψηλό λόγο Ν/Τ και μικρότερο κλάσμα λεπτόκοκκων αδρανών το φαινόμενο της εξίδρωσης είναι έντονο.

### **1.5.5 Ερπυσμός**

Ο ερπυσμός (creep) όπως και η συστολή ξήρανσης είναι φαινόμενα που προέρχονται από την φάση της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας και εξελίσσονται στον χρόνο με παρόμοιο τρόπο. Αιτία του ερπυσμού είναι η απώλεια του προσροφημένου ύδατος όταν η τσιμεντόπαστα βρίσκεται υπό σταθερό φορτίο. Όπως και με τη συστολή ξήρανσεως, οι μικρορηγματώσεις που παρουσιάζονται στην διεπιφανειακή ζώνη συνεισφέρουν στην ερπυστική παραμόρφωση του σκυροδέματος. Σημαντικό ρόλο παίζει και η σταδιακή μεταφορά των τάσεων από την τσιμεντόπαστα στα αδρανή τα οποία παραμορφώνονται ελαστικά υπό το αυξημένο φορτίο και αυτή η χρονική υστέρηση στην ανάληψη τάσης ανάμεσα στις δύο φάσεις του σκυροδέματος συνεισφέρει στην ερπυστική συμπεριφορά. Το ΑΣΣ λόγω των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών που περιέχει, εμφανίζει μειωμένο μέγεθος πόρων σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Επειδή γενικά η συστολή και ο ερπυσμός συνδέονται με την υγρασία που εγκλωβίζεται στους μικρούς πόρους, το ΑΣΣ εμφανίζει μεγαλύτερες ερπυστικές παραμορφώσεις από το συμβατικό σκυρόδεμα. Για τις ίδιες αναλογίες συστατικών ο ερπυσμός είναι περίπου ίδιος

### **1.5.6 Παραμόρφωση**

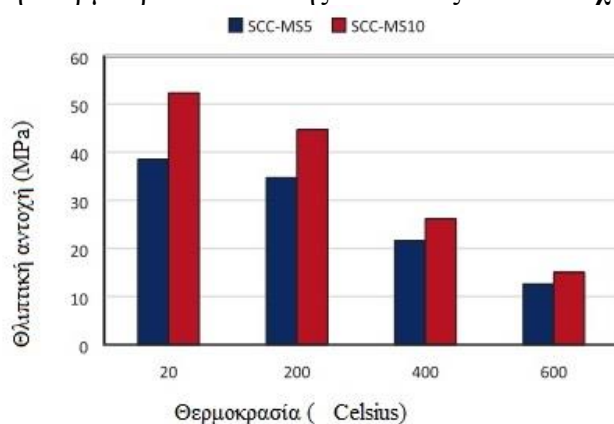
Η παραμόρφωση του σκυροδέματος προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους παραμορφώσεων από τη συστολή ξήρανσης, ερπυσμό, χαλάρωση τάσεων και φυσικά τις φορτιστικές συνθήκες στις οποίες επιβάλλεται το μείγμα. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, ένα μείγμα ΑΣΣ που έχει σχεδιαστεί με τις ίδιες αναλογίες συστατικών με το συμβατικό σκυρόδεμα εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά παραμόρφωσης. Κρίσιμοι παράγοντες για την παραμόρφωση του σκυροδέματος διαδραματίζουν η διεπιφανειακή ζώνη, η μικροδομή της ενυδατωμένης πάστας, το πορώδες και η δυσκαμψία των αδρανών, οι συνθήκες συντήρησης του υλικού στα αρχικά στάδια της πήξης και η ηλικία του μείγματος.

## **1.6 Θερμικά χαρακτηριστικά ΑΣΣ**

Η συμπεριφορά του ΑΣΣ σε υψηλές θερμοκρασίες είναι πιο δυσμενής σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα καθώς η μικρότερη διαπερατότητα του ΑΣΣ έχει ως αποτέλεσμα την πιο αργή εκτόνωση της πίεσης ατμού που σχηματίζεται από την εξάτμιση της υγρασίας στο εσωτερικό του. Αυτό οδηγεί σε κίνδυνο εκρηκτικής αποφλοίσωσης σε υψηλές θερμοκρασίες όταν η πίεση του ατμού ξεπεράσει την

εφελκυστική αντοχή του μίγματος. Με δεδομένο τον περιορισμό της εξίδρωσης στο ΑΣΣ λόγω της χρήσης λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών η περιεχόμενη υγρασία στο σύστημα των πόρων είναι μεγαλύτερη κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη πίεση ατμού που δυσκολεύεται να διαφύγει.

Σύμφωνα με τους Ahmad et al. η θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ μειώνεται με διαφορετικό ρυθμό ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε πληρωτικό υλικό και την θερμοκρασία έκθεσης. Συγκεκριμένα, η σύνθεση που περιείχε μικροπυριτία (MS) σε ποσοστό 5 % (SCC-MS5) , εμφάνισε μείωση της θλιπτικής αντοχής 10 %, 44 % και 68 % μετά από έκθεση στους 200<sup>0</sup> , 400<sup>0</sup> και 600<sup>0</sup> C. Η σύνθεση που περιείχε (MS) σε διπλάσιο ποσοστό (10%) (SCC-MS10) παρουσίασε μείωση θλιπτικής αντοχής κατά 15 % , 50 % και 72 % αντίστοιχα, δηλαδή η σύνθεση που περιείχε διπλάσιο ποσοστό του ίδιου πληρωτικού υλικού παρουσίασε μείωση της θλιπτικής αντοχής κατά 50 % , 13.64 % και 5.88 % αντίστοιχα στις ίδιες θερμοκρασίες. Η εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την θερμοκρασία έκθεσης απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.21**.



Σχήμα 1.21 Θλιπτική αντοχή μίγματος σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Ο λόγος που η θλιπτική αντοχή μειώνεται με διαφορετικό ρυθμό στις δύο συνθέσεις ,είναι η ιδιότητα της μικροπυριτίας (MS) να δημιουργεί πολύ πυκνό δίκτυο πόρων στο οποίο συγκρατείται νερό. Έτσι, όσο η θερμοκρασία έκθεσης του δοκιμίου αυξάνει, μεγαλώνει η πίεση του εξατμιζόμενου νερού στους πόρους και προκαλούνται εφελκυστικές τάσεις στο υλικό που προκαλούν μικρορηγματώσεις και μειώνουν την αντοχή του σε θλίψη. Παρατηρείται επίσης πως η διαφορά στο ρυθμό μείωσης της θλιπτικής αντοχής ελαχιστοποιείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εξατμιζόμενη υγρασία τελικά εκτονώνεται από τους πόρους και πλέον η πτώση της θλιπτικής αντοχής οφείλεται στην ρηγμάτωση της διεπιφανειακής ζώνης η οποία προκαλείται από την διαφορετική θερμική συμπεριφορά τσιμεντόπαστας - αδρανών. Συγκεκριμένα, η τσιμεντόπαστα έχοντας απωλέσει το προσροφημένο αλλά και ένα μέρος του ενεργού νερού συστέλλεται ενώ τα ασβεστολιθικά αδρανή διαστέλλονται.

Οι Pineaud et al. διερεύνησαν τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται οι μηχανικές και θερμοφυσικές ιδιότητες του ΑΣΣ σε σχέση με τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, υπολόγισαν την αντοχή σε θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας και τη

θερμική διαστολή συνθέσεων ΑΣΣ με διαφορετικούς λόγους νερού προς τσιμέντο (N/T) και διαφορετικούς όγκους πάστας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ειδικό κλίβανο και εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες από 20<sup>0</sup> C έως 120<sup>0</sup> C για 2 ώρες και από 120<sup>0</sup> C έως 600<sup>0</sup> C για 1 ώρα.

Παρατηρήθηκε ότι σε θερμοκρασία 20<sup>0</sup> C η αντοχή σε θλίψη δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον όγκο της τσιμεντόπαστας ,αλλά κυρίως από τον λόγο N/T.Η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα την θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ καθώς όλες οι συνθέσεις έχασαν 25 % - 30 % της αντοχής τους μετά από έκθεση στους έως 120<sup>0</sup> C.Η μείωση αυτή είναι παραπλήσια με αυτή στο συμβατικά δονούμενο σκυρόδεμα. Το ΑΣΣ όμως παρουσιάζει μεγαλύτερη μείωση της θλιπτικής αντοχής του μετά από έκθεση σε υψηλότερη θερμοκρασία κάτι που φαίνεται να οφείλεται στον όγκο της τσιμεντόπαστας και όχι στο λόγο N/T. Για παράδειγμα η μείωση της θλιπτικής αντοχής του ΑΣΣ είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα και έχουν πολύ μικρή απόκλιση σε σχέση με τις τιμές που προτείνουν ο Ευρωκώδικας 2.

Ο δείκτης θερμικής καταπόνησης επηρεάζεται κυρίως από την διαστολή των αδρανών υλικών .Γενικά η τσιμεντόπαστα διαστέλλεται μέχρι τους 180<sup>0</sup> C , ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται λόγω της προκύπτουσας συστολής από τη διαφυγή του ενεργού ύδατος. Μετά τους 300<sup>0</sup> C όγκος της τσιμεντόπαστας ασκεί μεγαλύτερη επίδραση στο δείκτη θερμικής διαστολής σε σχέση με το λόγο N/T.

## 2 Πειραματικό μέρος

### 2.1 Υλικά και συνθέσεις ΑΣΣ

#### Ασβεστολιθικά αδρανή

Και στις 4 συνθέσεις χρησιμοποιήθηκαν τρία κλάσματα ασβεστολιθικών αδρανών: άμμος (0 – 4mm), ριζάκι (4 – 8 mm), γαρμπίλι (8 – 16 mm). Τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.1**.

**Πίνακας 2.1** Φυσικά χαρακτηριστικά των τριών κλασμάτων αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (kg/m<sup>3</sup>).

Μέγεθος κόκκου (mm)	Κλάσμα		
	0 - 4	4 - 8	8 - 16
Φαινόμενο ειδικό βάρος	2.71	2.71	2.71
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος	6.65	6.65	6.65
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος εν κορεσμού	2.67	2.67	2.61

#### Τσιμέντο

Στις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM I 42.5 R σύμφωνα με το πρότυπο EN 12620:2013 με ειδικό βάρος 3150 kg/m<sup>3</sup> και ειδική επιφάνεια 3470 cm<sup>2</sup>/g, ενώ η χημική σύσταση και η κοκκομετρική διαβάθμισή του παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.2** και στο **Σχήμα 2.1** αντίστοιχα.

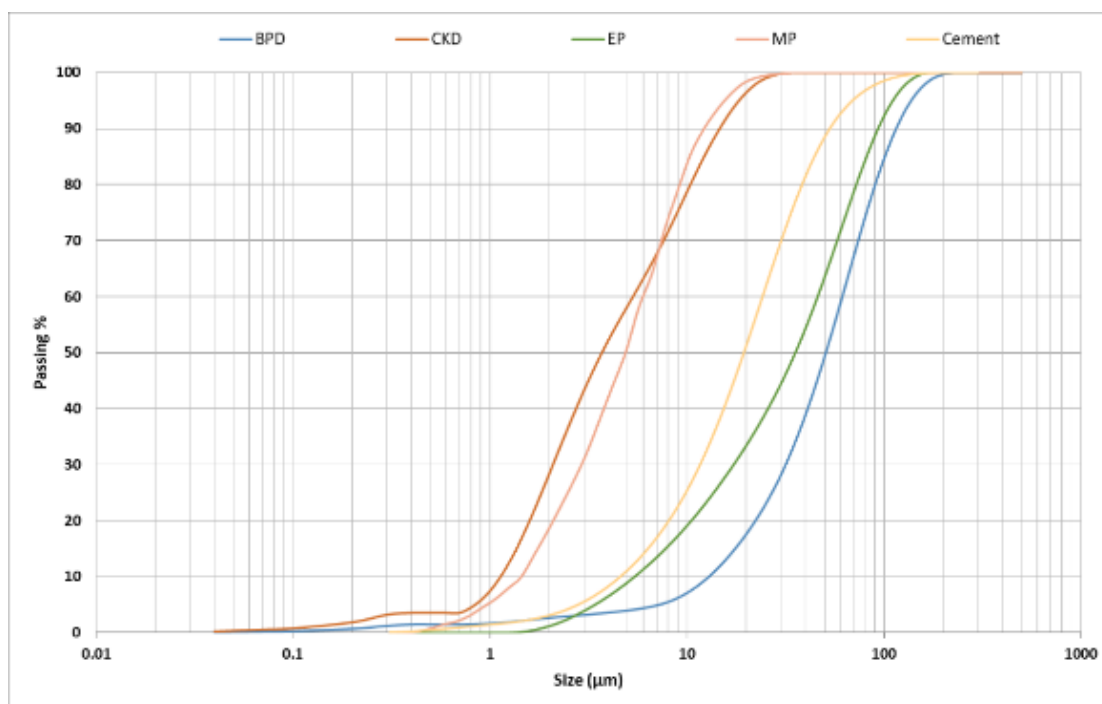
#### Νερό ανάμιξης

Το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή σκυροδέματος γενικά πρέπει να είναι καθαρό και να μην περιέχει επιβλαβείς προσμίξεις που μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή, τον χρόνο πήξεως και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Το πόσιμο νερό ύδρευσης θεωρείται κατάλληλο για τη σύνθεση μιγμάτων ΑΣΣ καθώς δεν περιέχει σημαντικές ποσότητες θεικών αλάτων, ενώ στάσιμο νερό από έλη καθώς και βιομηχανικά απόβλητα θεωρείται ακατάλληλο και πρέπει να αποφεύγεται. Ομοίως, το θαλασσινό νερό το οποίο περιέχει διαλυμένα άλατα σε υψηλές συγκεντρώσεις πρέπει να αποφεύγεται γιατί ακόμη κι αν δεν είναι επιβλαβές για το σκυρόδεμα, οδηγεί σε φαινόμενα διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού.

Στις συνθέσεις ΑΣΣ που παρασκευάστηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε νερό από το δίκτυο ύδρευσης με pH 7, θερμοκρασία 20°C χωρίς επιβλαβείς ουσίες.

### Λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας διερευνήθηκε η συμπεριφορά τεσσάρων διαφορετικών λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών. Συγκεκριμένα, τα πληρωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η Μαρμαρόσκονη (MP), η σκόνη αποκονίωσης περιστροφικής καμίνου (CKD), η σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης περιστροφικής καμίνου (BPD) και τα σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP). Η κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών αποτυπώνεται στο **Σχήμα 2.1** και η χημική σύστασή τους στον **Πίνακα 2.2**. Η μαρμαρόσκονη (MP) που χρησιμοποιήθηκε στις συνθέσεις προέρχεται από τα λατομεία λευκού μαρμάρου στο Διόνυσο Αττικής. Το ειδικό βάρος της είναι  $2700 \text{ kg/m}^3$  και η ειδική επιφάνειά της  $12700 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Η σκόνη αποκονίωσης περιστροφικής καμίνου (CKD) που χρησιμοποιήθηκε είχε ειδικό βάρος  $2700 \text{ kg/m}^3$  και η ειδική επιφάνειά της υπολογίστηκε σε  $25000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Αντίστοιχα, η σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης περιστροφικής καμίνου (BPD) είχε ειδικό βάρος  $2800 \text{ kg/m}^3$  και ειδική επιφάνεια  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Τέλος, τα σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP) παρουσίασαν ειδικό βάρος στα  $1500 \text{ kg/m}^3$  και ειδική επιφάνεια στα  $2335 \text{ cm}^2/\text{g}$ .



Σχήμα 2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση τσιμέντου και λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών



**Πίνακας 2.2 Χημική ανάλυση (κ.β. ,%) του τσιμέντου και των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών.**

<b>Συστατικό</b>	<b>Τσιμέντο</b>	<b>MP</b>	<b>CKD</b>	<b>BPD</b>	<b>EP</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	19.02	0.35	10.18	19.39	74.91
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4.59	-	3.64	5.13	10.47
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.63	0.07	2.06	3.46	0.97
<b>CaO</b>	63.43	55.41	43.53	52.73	1.02
<b>MgO</b>	2.02	0.76	1.31	2.22	0.16
<b>MnO</b>	-	0.01	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	3.48	-	1.18	6.73	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.47	-	1.71	4.84	5.77
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.28	-	0.37	0.46	3.8
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.17	-	-	-	-
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.28	-	-	-	0.09
<b>Cl</b>	-	-	0.35	2.16	-
<b>LOI</b>	2.62	43.4	35.65	2.88	2.82

### **Χημικά πρόσμικτα**

Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 1.2 τα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται στη σύνθεση των μιγμάτων ΑΣΣ είναι οι υπερρευστοποιητές – superplasticizers (SP) και οι ρυθμιστές ιξώδους – viscosity modifying agents (VMA). Ειδικότερα, στις εργαστηριακές δοκιμές της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν:

### **Υπερρευστοποιητής (Superplasticizer - SP)**

Ο υπερρευστοποιητής CHEMIUM NT 2 της εταιρείας DOMYLCO Construction Chemicals ο οποίος είναι υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυμερών έτοιμο για χρήση, πολύ υψηλής απόδοσης συμμορφούμενος με τις προδιαγραφές του προτύπου EN 934 – 2. Το συγκεκριμένο προϊόν είναι ιδανικό για σκυροδέματα υψηλών απαιτήσεων ειδικά όπου ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T) είναι πολύ χαμηλός.

Για την διερεύνηση των ρεολογικών χαρακτηριστικών των συνθέσεων έγινε η δοκιμή της ανεμπόδιστης εξάπλωσης (slump-flow test) και υπολογίστηκε ο χρόνος εξάπλωσης ( $t_{500}$ ) σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8. Η ποσότητα υπερρρευστοποιητή προσδιορίστηκε με δοκιμές ώστε η διάμετρος της δοκιμής ανεμπόδιστης εξάπλωσης να κυμαίνεται από 690-710 mm για κάθε σύνθεση.



Εικόνα 9 Προσδιορισμός ρεολογικών ιδιοτήτων νωπού ΑΣΣ.

Στη συνέχεια ακολούθησαν η δοκιμή χοάνης σχήματος V, η δοκιμή δοχείου U, η δοκιμή δοχείου L και η δοκιμή δακτυλίου J σύμφωνα με τα πρότυπα EN 12350-9, UNI 11044, EN 12350-10 και EN 12350-12, αντίστοιχα, βάσει των διαδικασιών που αναλυτικά περιγράφονται στην Ενότητα 1.3.

Παράλληλα με τις παραπάνω δοκιμές και σύμφωνα με τα πρότυπα EN 12350-11, EN 12350-6 και EN 12350-7, ακολούθησαν οι δοκιμές σταθερότητας μέσω κοσκίνισης (sieve segregation) και η μέτρηση της πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε αέρα των μειγμάτων ΑΣΣ αντίστοιχα.

Παρασκευάστηκαν τέσσερα (4) μίγματα ΑΣΣ με σταθερή αναλογία ενεργού νερού προς τσιμέντο (W/C) και ενεργού νερού προς συνολική ποσότητα λεπτόκοκκου υλικού (W/P) με τιμές 0.66 και 0.36 αντίστοιχα, εκτός από την σύνθεση EP που έχει αναλογία (W/P) ίση με 0.40. Τονίζεται πως η παραπάνω διαφοροποίηση οφείλεται στην επιλογή σχεδιασμού της σύνθεσης EP με βάση τον όγκο των υλικών λόγω της σημαντικής διαφοράς στο ειδικό βάρος του περλίτη σε σχέση με τα υπόλοιπα λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά. Το μίγμα αναφοράς περιέχει  $250 \text{ kg/m}^3$  μαρμαρόσκονη (MP) η οποία αντικαταστάθηκε σε ποσοστό 60% κ.ό. από άλλα λεπτόκοκκα υλικά. Τα υπόλοιπα συστατικά του ΑΣΣ ( τσιμέντο, νερό, λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή ) παρέμειναν σταθερά.

Για την ανάμειξη και παραγωγή όλων των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε αναμεικτήρας πλανητικού τύπου με περιστρεφόμενες λεπίδες, χωρητικότητας 100 L.

Για κάθε σύνθεση ΑΣΣ παρασκευάστηκε μίγμα 40 L ως εξής: Όλα τα ξηρά συστατικά (τσιμέντο, χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή καθώς και λεπτόκοκκα υλικά πλήρωσης) εισήχθησαν στον αναμεικτήρα με τη σειρά από τα περισσότερο χονδρόκοκκα στα πλεον λεπτόκοκκα και αναμείχθησαν για 60 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια προστέθηκε το 80% της ποσότητας νερού και το μείγμα αναμείχθηκε για 180 δευτερόλεπτα. Το υπόλοιπο 20% της ποσότητας νερού αναμειγμένο με την συνολική απαιτούμενη ποσότητα υπερρυστοποιητή (SP) προστέθηκε και ακολούθησε ανάμειξη του μείγματος για 60 δευτερόλεπτα. Για κάθε επιπλέον προσθήκη υπερρυστοποιητή (SP) έγινε ανάμειξη για επιπλέον 60 δευτερόλεπτα μέχρις ότου να επιτευχθεί η επιθυμητή εξάπλωση. Τα συστατικά των συνθέσεων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.3**.

**Πίνακας 2.3 Συστατικά (kg/m<sup>3</sup>) και αναλογίες συνθέσεων ΑΣΣ**

Σύνθεση	Νερό	T	MP	CKD	BPD	EP	0-4	4-8	8-16	SP/T (%)	N/T	N/K
SCC-MP	198	300	250	0	0	0	900	525	225	1.5	0.66	0.36
SCC-CKD	198	300	100	150	0	0	900	525	225	2.3	0.66	0.36
SCC-BPD	198	300	100	0	150	0	900	525	225	2.7	0.66	0.36
SCC-EP	198	300	100	0	0	83	900	525	225	0.7	0.66	0.40

Όπου:

N: Νερό ανάμιξης, T: Τσιμέντο, MP: Μαρμαρόσκονη, Filler: Λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό, 0-4: λεπτόκοκκα αδρανή ( mm), 4-8: μεσαίου μεγέθους αδρανή ( mm), 8-16: Χονδρόκοκκα αδρανή ( mm), N/T: λόγος νερού προς τσιμέντο, N/K: λόγος νερού προς συνολική ποσότητα κονίας.

Για τη χύτευση όλων των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες μήτρες κατάλληλων διαστάσεων για κάθε δοκιμή. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 13 κυβικές μήτρες των 100 mm, 6 κυλινδρικές διαμέτρου 100 mm, 2 πρισματικές διαστάσεων 100X100X500 mm. Η αποχύτευση των δειγμάτων κάθε σύνθεσης έγινε μετά την παρέλευση 24 ωρών. Στη συνέχεια τα δείγματα συντηρήθηκαν στο νερό μέχρι την ημέρα της εκάστοτε δοκιμής. ( εκτός των πρισμάτων που τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας 24°C και υγρασίας 67 % ) στα οποία μετρήθηκε η συστολή ξήρανσης.



Εικόνα 10 Ανάμιξη των συστατικών του ΑΣΣ και χύτευση του νωπού ΑΣΣ σε μεταλλικές μήτρες τυποποιημένων διαστάσεων.

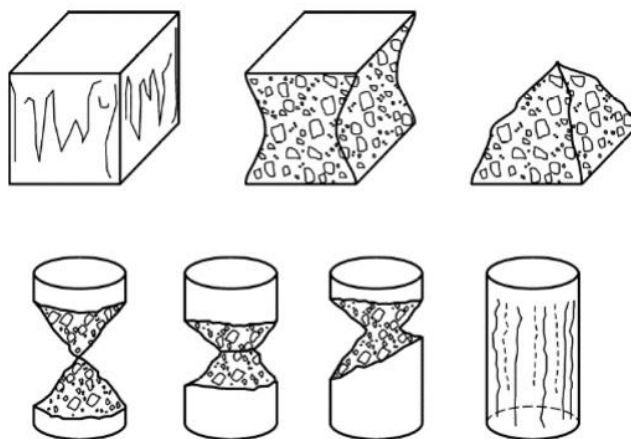
## 2.2 Δοκιμές χαρακτηρισμού μηχανικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών ΑΣΣ

### 2.2.1 Δοκιμή θλιπτικής αντοχής

Η πιο βασική μηχανική ιδιότητα στον σκυροδέματος στις κατασκευές είναι η θλιπτική αντοχή. Το πρότυπο που ακολουθείται είναι το EN 12390 – 3. Για τον προσδιορισμό της σε διάφορες ηλικίες απαιτείται ένας συγκεκριμένος αριθμός δοκιμίων τα οποία θα υποβληθούν σε δοκιμή κεντρικής θλίψης σε κατάλληλη διάταξη (πρέσα). Μετά την αφαίρεσή τους από τις μήτρες χύτευσης τα δοκίμια τοποθετούνται σε υγρό περιβάλλον μέχρι την ημέρα της δοκιμής ώστε να εξασφαλίζονται συνθήκες κορεσμού. Την ημέρα της δοκιμής, αφού τοποθετηθούν σε ξηρό περιβάλλον για να στεγνώσουν πλήρως, ζυγίζονται και τοποθετούνται στην πρέσα όπου φορτίζονται μέχρι να αστοχήσουν σε κεντρική θλίψη. Μία τυπική συσκευή προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής φαίνεται στην εικόνα 1 ενώ οι τυπικές μορφές αστοχίας των κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων σε κεντρική θλίψη φαίνονται στην εικόνα 2.



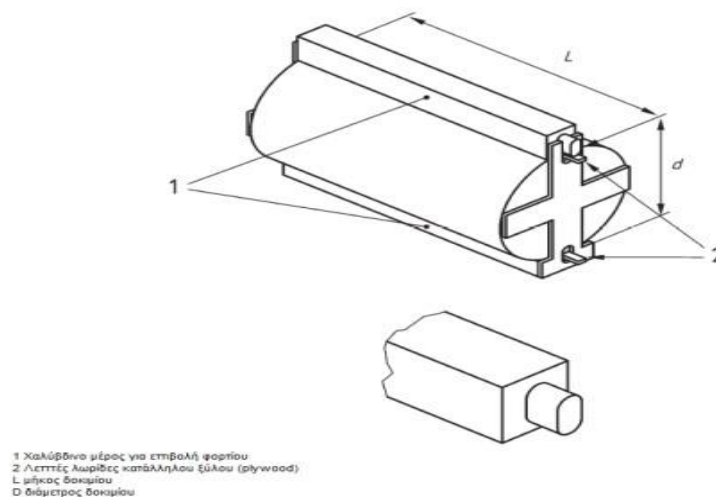
Εικόνα 11 Συσκευή προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής.



Εικόνα 12 Μορφές αστοχίας κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών σε θλίψη.

### 2.2.2 Δοκιμή εφελκυστικής αντοχής έναντι διάρρηξης

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα καθώς οι συνθήκες στήριξης των δοκιμίων εισάγουν δευτερογενείς τάσεις στο σκυρόδεμα που δεν μπορούν να αγνοηθούν. Για το λόγο αυτόν η αντοχή σε εφελκυσμό υπολογίζεται έμμεσα μέσω διάρρηξης του δοκιμίου. Το πρότυπο που ακολουθείται είναι το EN 12390-6. Το νωπό ΑΣΣ χυτεύεται σε κυλινδρικές μήτρες και αφήνεται για 24 ώρες σε συνθήκες υγρασίας. Στη συνέχεια τα δοκίμια αφαιρούνται από τις μήτρες και τοποθετούνται σε υγρό περιβάλλον. Σε ηλικία 90 ημερών τα δοκίμια απομακρύνονται από την δεξαμενή νερού, αφήνονται να στεγνώσουν σε ξηρές συνθήκες, ζυγίζονται και κατόπιν τοποθετούνται σε κατάλληλη διάταξη υπολογισμού της εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης. Στην εικόνα 3 φαίνεται μία τυπική συσκευή που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης.



Εικόνα 13 Τυπική διάταξη υπολογισμού εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης.

Η εφελκυστική αντοχή μέσω διάρρηξης του ΑΣΣ υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

όπου:

$f_{ct,sp}$  : η εφελκυστική αντοχή μέσω διάρρηξης, σε MPa

F : το μέγιστο φορτίο σε N

L : το μήκος γραμμής επαφής του δοκιμίου σε mm



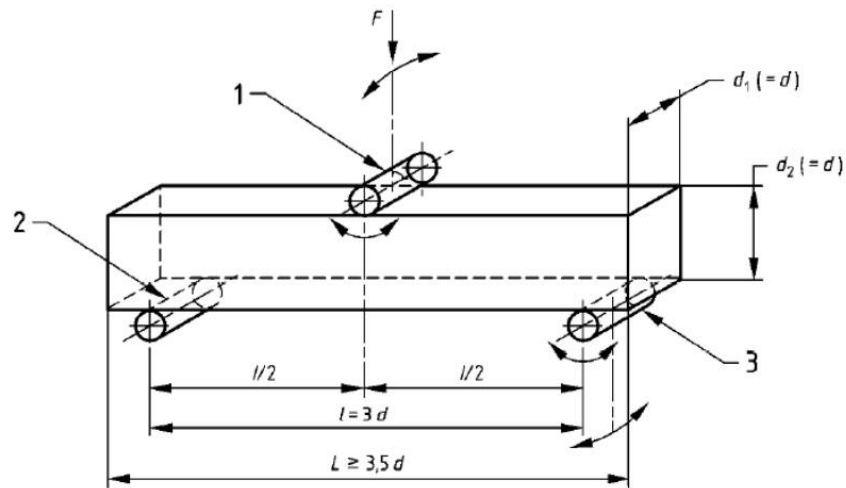
d : η καθορισμένη διάσταση διατομής σε mm



Εικόνα 14 Διαδικασία προσδιορισμού εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμίων ΑΣΣ.

### 2.2.3 Δοκιμή καμπτικής αντοχής

Η δοκιμή κάμψης τριών σημείων γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390–5. Στη συγκεκριμένη εργασία τα δοκίμια που υπεβλήθησαν στη δοκιμή καμπτικής αντοχής είναι τα ίδια πρισματικά δοκίμια με τα οποία υπολογίστηκε η συστολή ξήρανσης, στην ηλικία των 90 ημερών. Αφού πρώτα ζυγίζονται, τοποθετούνται σε κατάλληλη διάταξη με τρόπο ώστε ο διαμήκης άξονάς τους να σχηματίζει ορθή γωνία με τους διαμήκεις άξονες των άνω και κάτω κυλίνδρων, που αντιστοιχούν στις 2 στηρίξεις και στο σημείο φορτίσεως αντίστοιχα. Αφού εξασφαλιστεί ότι η διεύθυνση της σημειακής φορτίσεως είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της χύτευσης του δοκιμίου εφαρμόζεται φορτίο με ρυθμό αύξησης 167 N / sec μέχρι την αστοχία των δοκιμίων σε κάμψη.



- 1 Κύλινδρος φόρτισης ( ικανός να περιστρέφεται και να περιβάλλεται)  
 2 Υποστηρικτικός κύλινδρος  
 3 Υποστηρικτικός κύλινδρος ( ικανός να περιστρέφεται και να περιβάλλεται)

Εικόνα 15 Τυπική διάταξη υπολογισμού καμπτικής αντοχής σε φόρτιση 3 σημείων.

Η καμπτική αντοχή του δοκιμίου υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f_{ct,fl} = (F \times L) / (d_1 \times d_2^2)$$

όπου :

$f_{ct,fl}$  : η καμπτική αντοχή σε MPa

$F$  : το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε σε N

$L$  : η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων που αποτελούν τις στηρίξεις

$d_1$  και  $d_2$ : οι πλευρικές διαστάσεις του δοκιμίου σε mm

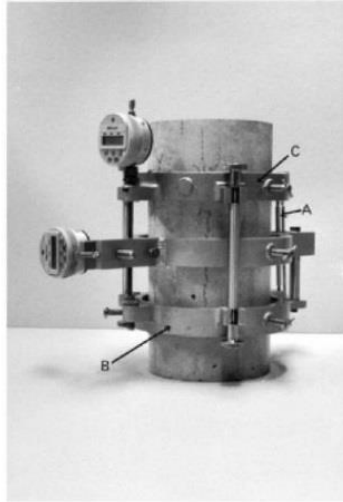




Εικόνα 16 Συσκευή για τον υπολογισμό της αντοχής σε κάμψη τριών σημείων πρισματικών δοκιμών ΑΣΣ.

### 2.2.1 Δοκιμή μέτρησης μέτρου Ελαστικότητας

Για την δοκιμή μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας του ΑΣΣ ακολουθείται η διαδικασία που προβλέπει το πρότυπο ASTM C 469. Το νερό μίγμα ΑΣΣ χυτεύεται σε κατάλληλες κυλινδρικές μήτρες και αφήνεται σε υγρές συνθήκες για 24 ώρες. Κατόπιν αφαιρούνται από το νερό, αφήνονται να στεγνώσουν σε ξηρές συνθήκες, ζυγίζονται και τοποθετούνται σε κατάλληλη συσκευή – συμπιεσόμετρο όπως αυτή που απεικονίζεται στην εικόνα 5.15. Η διαδικασία υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας είναι επαναληπτική και γίνεται ως εξής : Διατηρώντας σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία και υγρασία του χώρου εκτέλεσης της δοκιμής) το κυλινδρικό δοκίμιο τοποθετημένο στο συμπιεσόμετρο εδράζεται στην επιφάνεια της μηχανής δοκιμών, ευθυγραμμίζεται και ξεκινάει ο πρώτος κύκλος φόρτισης με σταθερό ρυθμό αύξησης του φορτίου έως ότου φτάσει στην προβλεπόμενη τιμή που έχει οριστεί ως μέγιστη της δοκιμής. Στη συνέχεια ξεκινάει η αντίστροφη διαδικασία της αποφόρτισης με τον ίδιο ρυθμό μεταβολής του φορτίου μέχρι να φτάσει στην τιμή 0. Τα δύο αυτά στάδια της δοκιμής αποτελούν τον πρώτο κύκλο φορτίσεων που χρησιμεύει κυρίως στη βαθμονόμηση της δοκιμής αλλά και στον προσανατολισμό – ανακατανομή της υφιστάμενης μικρορηγματώσης της μεταβατικής ζώνης. Προβλέπονται τουλάχιστον δύο αυτούσιες επαναλήψεις της δοκιμής ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η επαναληψιμότητά της και για αποφυγή χονδροειδούς σφάλματος. Το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου υπολογίζεται από τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων των επαναληπτικών δοκιμών.



Εικόνα 17 18 Συμπιεσόμετρο για τον προσδιορισμό του Μέρου Ελαστικότητας και του λόγου Poisson.



Εικόνα 19 Μετρητικές διατάξεις για τον προσδιορισμό του Μέρου Ελαστικότητας δοκιμών ΑΣΣ.

## 2.3 Δοκιμές χαρακτηρισμού φυσικών ιδιοτήτων

### 2.3.1 Οπτικός δείκτης σταθερότητας

Μετά τη δοκιμή διάρρηξης, τα δοκίμια ελέγχονται οπτικά για πιθανά σημεία συγκέντρωσης τσιμεντόπαστας ή κονιάματος στο άνω μέρος του δοκιμίου ή για ανομοιόμορφη κατανομή χονδρόκοκκων / λεπτόκοκκων αδρανών καθ' ύψος των δοκιμίων. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ποσότητα τσιμεντόπαστας ή κονιάματος στο

άνω μέρος του κυλίνδρου, ούτε ανομοιόμορφη κατανομή των αδρανών καθ' ύψος τότε το δείγμα θεωρείται σταθερό και αξιολογείται ως 0 στην κλίμακα του οπτικού δείκτη σταθερότητας. Εάν παρατηρείται ελαφρώς ανομοιόμορφη κατανομή των χονδρόκοκκων αδρανών το δείγμα θεωρείται σταθερό και λαμβάνει την τιμή 1. Σε περίπτωση που παρατηρείται ανομοιόμορφη συγκέντρωση αδρανών καθ' ύψος με ταυτόχρονη παρουσία τσιμεντόπαστας ή κονιάματος στο άνω μέρος τότε η σταθερότητα του δείγματος λαμβάνει τιμή 2 ή 3 στη δοκιμή του οπτικού δείκτη σταθερότητας ανάλογα με την έκταση του προβλήματος.

### 2.3.2 Δοκιμή συστολής ξήρανσης

Για τη μέτρηση της συστολής ξήρανσης ακολουθείται η διαδικασία που προβλέπεται στο πρότυπο EN 12390 – 16. Το ναπό ΑΣΣ χυτεύεται σε πρισματικές μήτρες και αφήνεται να σκληρυνθεί σε συνθήκες εργαστηρίου για διάστημα 24 ωρών. Στη συνέχεια τα πρισματικά δοκίμια ξεκαλουπώνονται, ζυγίζονται και γίνεται μέτρηση του μήκους τους με κατάλληλο εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας. Έπειτα τα δοκίμια εισέρχονται σε ειδικό θάλαμο με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας όπου παραμένουν μέχρι την ημέρα της εκάστοτε δοκιμής. Συγκεκριμένα η θερμοκρασία θαλάμου που επιλέχθηκε είναι 24<sup>0</sup> C και το ποσοστό υγρασίας του ορίστηκε στο 65 %. Μετρήσεις της μάζας και της θερμοκρασίας έγιναν στις ηλικίες 7,14,28,56 και 90 ημερών.

Η συστολή ξήρανσης κάθε δοκιμίου υπολογίζεται για κάθε μέτρηση με τον τύπο:

$$\varepsilon_{cs(t,t_0)} = (L_{(t_0)} - L_{cs(t)}) / L_0$$

όπου:

$L_0$  : το μήκος του μετρητή σε mm

$L_{(t_0)}$  : το αρχικό μήκος του δοκιμίου τη χρονική στιγμή  $t_0$  σε mm

$L_{cs(t)}$  : το μήκος του δοκιμίου τη χρονική στιγμή  $t$  σε mm

$\varepsilon_{cs(t,t_0)}$  : η συνολική συστολή ξήρανσης του δοκιμίου τη χρονική στιγμή  $t$

### 2.3.3 Υδατοπερατότητα

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή ελέγχου Υδατοπερατότητας σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-8. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρία κυβικά δοκίμια 150X150X150 mm<sup>3</sup> από κάθε διαφορετική σύνθεση, τα οποία αφού ζυγίστηκαν προ της δοκιμής ,τοποθετήθηκαν στην συσκευή ελέγχου υπό σταθερή πίεση 5 bar και

αφέθησαν εκεί για 72 ώρες σε στεγανές συνθήκες. Στη συνέχεια, αφού καταγράφηκαν οι ενδείξεις αρχικής και τελικής στάθμης πίεσεως, εξήλθαν της μανομετρικής συσκευής, σκουπίστηκαν και ζυγίστηκαν εκ νέου. Το τελικό στάδιο της δοκιμής ήταν η διάρρηξη των δοκιμίων και η καταγραφή του βάθους διείσδυσης του νερού στη μάζα τους.



Εικόνα 20 Κυβικά δοκίμια 150X150X150 mm στη συσκευή ελέγχου Υδατοπερατότητας.



Εικόνα 21 Μανομετρικές ενδείξεις κατά τη δοκιμή ελέγχου Υδατοπερατότητας.



Εικόνα 22 Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της αντοχής κυβικών δοκιμίων ΑΣΣ σε Υδατοπερατότητα.

## 2.4 Αξιολόγηση πυραντίστασης ΑΣΣ

### 2.4.1 Θλιπτική αντοχή κατόπιν θερμικής καταπόνησης

Η διαδικασία είναι ίδια με προηγουμένως με μοναδική διαφορά ότι τα δοκίμια αφού απομακρυνθούν από το νερό, αφεθούν να στεγνώσουν και ζυγιστούν εισέρχονται σε ειδικό κλίβανο όπου θερμαίνονται σε δεδομένη θερμοκρασία για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια και τέλος τοποθετούνται στη συσκευή υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής.





Εικόνα 23 Εισαγωγή κυβικών δοκιμίων ΑΣΣ σε ειδικό κλίβανο για θερμική καταπόνηση σε διαδικασίες υψηλών θερμοκρασιών.

#### 2.4.2 Δοκιμή ταχύτητας διέλευσης υπερήχων σε υψηλές θερμοκρασίες

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ταχύτητας διέλευσης υπερήχων ( UPV – test ) κατά το πρότυπο ASTM C597 – 02 μετά από έκθεση δύο δοκιμίων  $7X7X7 \text{ mm}^3$  από κάθε σύνθεση σε αυξανόμενη θερμοκρασία στον κλίβανο. Το θερμοκρασιακό εύρος της δοκιμής κυμάνθηκε από  $100^{\circ} \text{C}$  έως  $800^{\circ} \text{C}$ . Η δοκιμή έγινε ως εξής: Τα δοκίμια, αφού συντηρήθηκαν σε ξηρές συνθήκες στο εργαστήριο υπεβλήθησαν σε δοκιμή προσδιορισμού της ταχύτητας διέλευσης υπερήχων με κατάλληλη συσκευή ( PROSEC 2000 ). Αξιοποιήθηκε η μέθοδος άμεσου υπολογισμού της ταχύτητας διέλευσης τοποθετώντας τις δύο κεφαλές της συσκευής σε δύο αντικριστές πλευρές του κυβικού δοκιμίου και καταγράφηκαν η ταχύτητα και ο χρόνος διέλευσης. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στον κλίβανο για δύο ώρες στη θερμοκρασία επιλογής και με την παρέλευση αυτών αφέθησαν άλλες 24 ώρες μέσα στο σβησμένο φούρνο. Ακολούθησε η έξοδός τους από τον κλίβανο και η συντήρησή τους σε ξηρές συνθήκες σε θερμοκρασία δωματίου για άλλες 24 ώρες.

### 2.4.3 Απόλεια βάρους λόγω θερμικής καταπόνησης

Στον ίδιο χρόνο με την δοκιμή ταχύτητας διέλευσης υπερήχων πραγματοποιήθηκε και δοκιμή ελέγχου της απώλειας βάρους των δοκιμίων ΑΣΣ λόγω της έκθεσής τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Υπεβλήθησαν σε έλεγχο τα ίδια κυβικά δοκίμια  $7X7X7\text{mm}^3$  από κάθε σύνθεση, τα οποία μελετήθηκαν ως προς την ταχύτητα διέλευσης υπερήχων διαμέσου της μάζας τους. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν πανομοιότυπη: Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε ξηρές συνθήκες στο εργαστήριο και κατόπιν μετρήθηκε το βάρος τους σε κατάλληλο ζυγό. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στον κλίβανο για δύο ώρες στη θερμοκρασία επιλογής και με την παρέλευση αυτών παρέμειναν άλλες 24 ώρες μέσα στο σβησμένο φούρνο. Ακολούθησε η έξοδός τους από τον κλίβανο και η συντήρησή τους σε ξηρές συνθήκες σε θερμοκρασία δωματίου για άλλες 24 ώρες. Η θερμική καταπόνηση των δοκιμίων ξεκίνησε από τους  $100^{\circ}\text{C}$  και ολοκληρώθηκε στους  $800^{\circ}\text{C}$ , με ρυθμό αύξησης τους  $50^{\circ}\text{C}$  κλιμακωτά, σε κάθε στάδιο της δοκιμής.

### 3 Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

#### 3.1 Δοκιμές νωπού σκυροδέματος

Όλες οι δοκιμές του νωπού σκυροδέματος που πραγματοποιήθηκαν μετά την παρασκευή των συνθέσεων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.1**. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται επίσης, οι δοσολογίες του υπερρρευστοποιητή (SP) που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε σύνθεση, καθώς και το μοναδιαίο βάρος κάθε σύνθεσης.

**Πίνακας 3.1 Ρεολογικά και φυσικά χαρακτηριστικά συνθέσεων νωπού ΑΣΣ**

Σύνθεση	Μοναδιαίο βάρος (kg/m <sup>3</sup> )	Περιεχόμενος αέρας (%)	Ελεύθερη εξάπλωση (mm)	T <sub>500</sub> (sec)	Χοάνη V (sec)	Δοχείο U	Δοχείο L	Αντίσταση σε απόμιξη λόγω κοσκίνισης (%)
MP	2256	2.9	690	1.59	5.10	0.93	0.88	7.5
CKD	2264	3.3	695	1.07	3.60	0.89	0.90	8.0
BPD	2358	1.5	700	2.82	15.30	0.78	0.71	2.2
EP	2251	1.6	700	0.63	2.05	0.99	0.94	5.3

Όλες οι συνθέσεις ανήκουν στην κατηγορία SF2 και η δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης έδωσε αποτελέσματα που κυμαίνονται από 690 – 710 mm. Διαπιστώνεται επομένως ότι η δοσολογία υπερρρευστοποιητή θα μπορούσε να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τα ρεολογικά χαρακτηριστικά κάθε σύνθεσης, αλλά και την επίδραση του κάθε λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού στην τάση διαρροής του ΑΣΣ.

Δεν απαιτήθηκε η προσθήκη ρυθμιστή ιξώδους σε καμία σύνθεση καθώς δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα απόμιξης ή εξίδρωσης. Η μεγαλύτερη ποσότητα SP ( 2.7 % ) για την επίτευξη της αναγκαίας εξάπλωσης απαιτήθηκε στη σύνθεση BPD, ενώ η χαμηλότερη ποσότητα SP ( 0.7 % ) χρησιμοποιήθηκε στην σύνθεση EP. Η σύνθεση BPD παρουσίασε σημαντικά μεγαλύτερο ιξώδες από τις υπόλοιπες, όπως προκύπτει από τον χρόνο εκκένωσης της δοκιμής χοάνης V, χωρίς όμως να ξεπεράσει το όριο των 25 δευτερολέπτων. Η μεγαλύτερη συνεκτικότητα της ίδιας σύνθεσης ( BPD ) προκύπτει επίσης από τον μεγαλύτερο χρόνο εξάπλωσης T<sub>500</sub> που υπολογίστηκε στα 2.82 δευτερόλεπτα, κατατάσσοντάς την στην κατηγορία VS2. Οι υπόλοιπες συνθέσεις κατατάσσονται στην κατηγορία VS1 έχοντας χρόνους εξάπλωσης μικρότερους από το όριο των 2 δευτερολέπτων, με την σύνθεση EP να παρουσιάζει την μικρότερη τιμή T<sub>500</sub> ( 0.63 sec ) . Η ίδια σύνθεση παρουσίασε και τον μικρότερο χρόνο εκκένωσης της δοκιμής V με 2.05 δευτερόλεπτα, επαληθεύοντας την λιγότερο συνεκτική συμπεριφορά



της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από το εξαιρετικά στρογγυλό σχήμα των σωματιδίων του διογκωμένου περλίτη ( EP ) που επιδρά σημαντικά στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ΑΣΣ. Αντιθέτως, το περισσότερο τραχύ και ακανόνιστο σχήμα των σωματιδίων της σκόνης βαλβίδας παράκαμψης υνικαμίνου ( BPD ) επηρεάζει τη ρεολογική συμπεριφορά του ΑΣΣ με αντίθετο αποτέλεσμα, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση του ιξώδους.

Παρατηρήθηκε ότι όλες οι συνθέσεις ΑΣΣ βρίσκονται εντός ορίων στη δοκιμή σταθερότητας μέσω κοσκίνισης, με την σύνθεση που περιέχει CKD να εμφανίζει την υψηλότερη τιμή ( 8 % ), αλλά σημαντικά χαμηλότερα από το επιτρεπόμενο όριο που θέτει ο κανονισμός ( 20 % ).

Τα διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις ΑΣΣ επηρέασαν σημαντικά την περιεκτικότητα σε αέρα με τη σύνθεση αναφοράς ( MP ) και την σύνθεση CKD να παρουσιάζουν διπλάσιο ποσοστό περιεχόμενου αέρα σε σχέση με τις BPD και EP. Αντίθετα, τα μοναδιαία βάρη των συνθέσεων δεν παρουσίασαν μεγάλες αποκλίσεις καθώς κυμάνθηκαν από 2251 kg έως 2358 kg, κάτι που εξηγείται από την σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά.

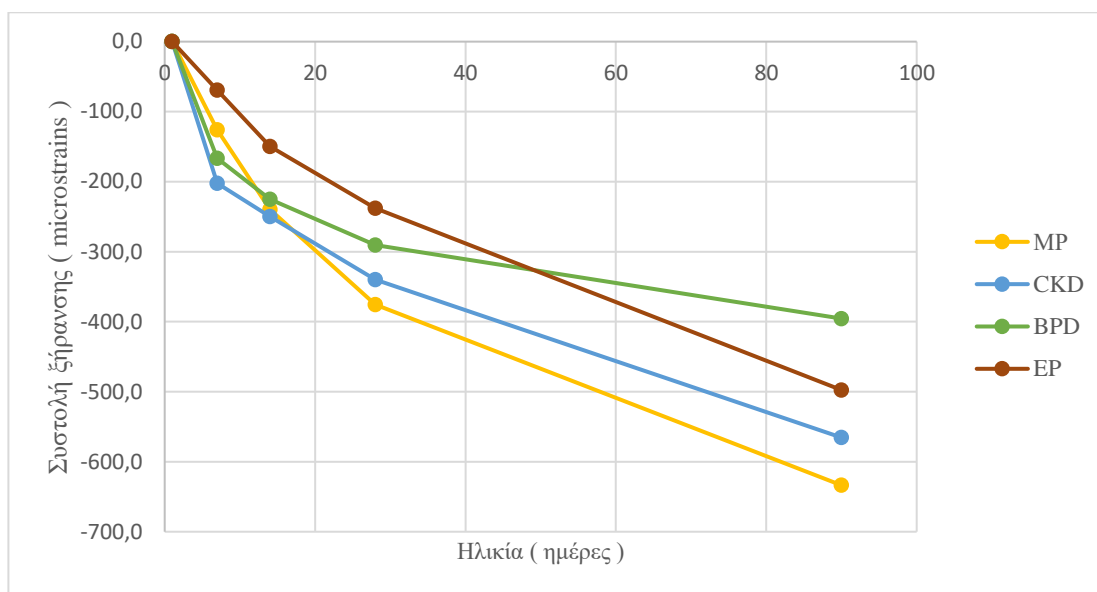
## 3.2 Αποτελέσματα δοκιμών σκληρυμένου ΑΣΣ

### 3.2.1 Συστολή ξήρανσης

Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται οι ακριβείς τιμές των μετρήσεων της παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης των δοκιμίων κάθε σύνθεσης σε ηλικία 1, 7, 14, 28 και 90 ημερών, ενώ στο Σχήμα 3.1 αποτυπώνεται η εξέλιξή της σε συνάρτηση με την ηλικία των δοκιμίων. Στις πρώτες επτά ημέρες τις υψηλότερες τιμές συστολής ξήρανσης παρουσιάζουν οι συνθέσεις CKD και BPD. Παρατηρείται ότι στις 90 ημέρες η υψηλότερη τιμή συστολής ξήρανσης ανήκει στη σύνθεση αναφοράς MP με τιμή 633.7 microstrain, ενώ η σύνθεση CKD παρουσιάζει την δεύτερη υψηλότερη τιμή συστολής ξήρανσης στα 565.5 microstrain. Η EP είχε τιμή συστολής ξήρανσης 497.6 microstrain, με τη μικρότερη τιμή συστολής ξήρανσης να εμφανίζεται στη σύνθεση BPD στα 395.6 microstrain. Έως τις 28 ημέρες, ο μικρότερος ρυθμός αύξησης της συστολής ξήρανσης εμφανίζεται στη σύνθεση ( EP ), κάτι που ενδεχομένως οφείλεται στην έντονη ποζολανική δραστηριότητα του περλίτη, η οποία καθυστερεί την διαδικασία της ενυδάτωσης του τσιμέντου και μειώνει τον ρυθμό και την ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας των εξώθερμων αντιδράσεων ενυδάτωσης. Από τις τρεις συνθέσεις που περιείχαν ασβεστολιθικής προέλευσης εναλλακτικά πληρωτικά υλικά (MP, CKD και BPD), παρατηρείται ότι ο ρυθμός αύξησης της συστολής ξήρανσης των συνθέσεων στις 28 ημέρες είναι ανάλογος του ποσοστού SiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> που περιείχαν τα αντίστοιχα εναλλακτικά πληρωτικά υλικά τους. Είναι πιθανό, η ύπαρξη έστω και ήπιας ποζολανικής δραστηριότητας να επηρεάζει την αθροιστική συστολή ξήρανσης των συνθέσεων ΑΣΣ, καθώς και την εξέλιξή της στο χρόνο.

Πίνακας 3.2 Συστολή ξήρανσης (microstrain) συνθέσεων ΑΣΣ σε διάφορες ηλικίες.

Σύνθεση	Ηλικία ( ημέρες )				
	1	7	14	28	90
MP	0,0	-125,9	-240,1	-375,5	-633,7
CKD	0,0	-202,4	-249,9	-340,0	-565,5
BPD	0,0	-166,7	-225,2	-290,6	-395,6
EP	0,0	-69,2	-149,9	-238,0	-497,6



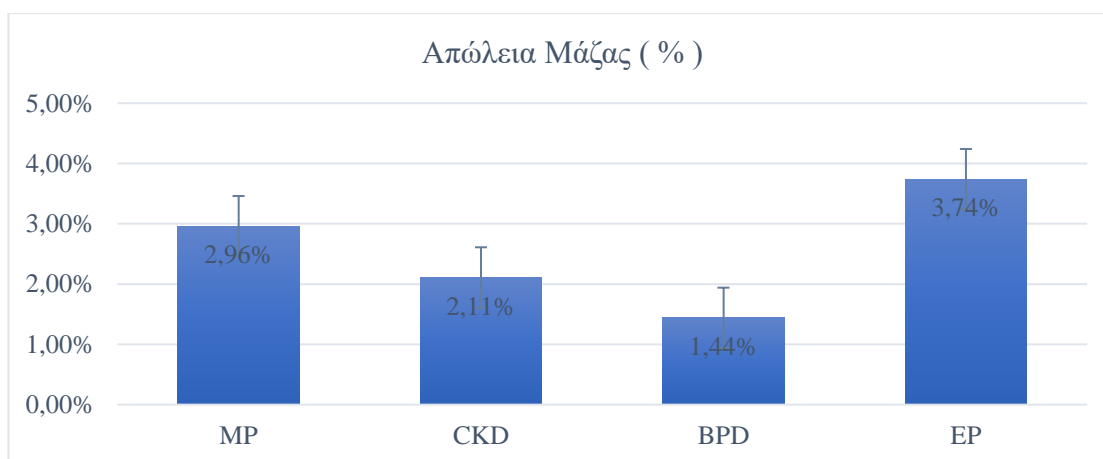
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα εξέλιξης συστολής ξήρανσης συνθέσεων ΑΣΣ σε σχέση με την ηλικία τους σε ημέρες.

### 3.2.2 Απόλεια μάζας δοκιμίων ΑΣΣ, λόγω ξήρανσης

Η μεγαλύτερη απώλεια μάζας μετά από 90 ημέρες παρατηρήθηκε στη σύνθεση EP με ποσοστό 3.74 % ως προς την αρχική μάζα των δοκιμίων της σύνθεσης. Σημαντική μείωση στη μάζα των δοκιμίων παρουσιάστηκε και στη σύνθεση αναφοράς MP με ποσοστό 2.96 %, κάτι αναμενόμενο αφού η ίδια σύνθεση εμφάνισε και τη μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης στις 90 ημέρες. Οι συνθέσεις CKD και BPD παρουσίασαν σχετικά μικρές απώλειες μάζας με ποσοστά 2.11 % και 1.44 % αντίστοιχα. Η μικρότερη τιμή απώλειας μάζας που παρουσιάστηκε στη σύνθεση BPD βρίσκεται σε συμφωνία με την αντίστοιχη τιμή της στη δοκιμή υπολογισμού της συστολής ξήρανσης, κατά την οποία η σύνθεση παρουσίασε τη μικρότερη τιμή σε ηλικία 90 ημερών. Τα αποτελέσματα της δοκιμής απώλειας μάζας λόγω ξήρανσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3 και απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 3.2.

**Πίνακας 3.3 Ποσοστιαία απώλεια μάζας συνθέσεων ΑΣΣ μετά από 90 ημέρες.**

Σύνθεση	Απώλεια Μάζας ( % )
MP	2.96
CKD	2.11
BPD	1.44
EP	3.74



Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση της συνολικής απώλειας μάζας συνθέσεων ΑΣΣ.

### 3.2.3 Θλιπτική αντοχή

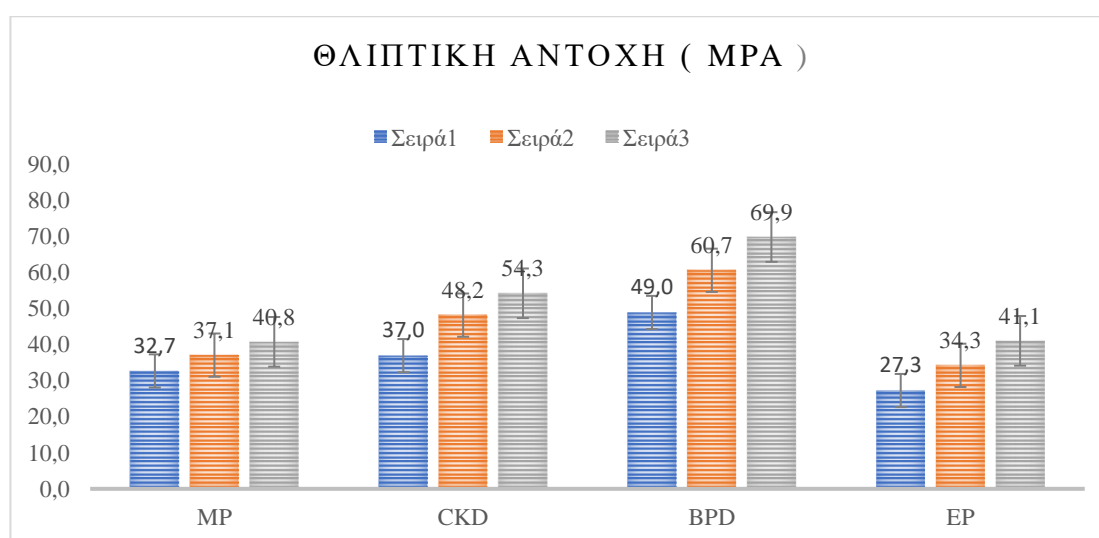
Η μεγαλύτερη τιμή θλιπτικής αντοχής ανεξαρτήτως ηλικίας παρουσιάστηκε στη σύνθεση BPD. Η δοκιμή υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων στις 28 ημέρες έδωσε τιμές στα 60.7 MPa, 48.2 MPa, 37.1MPa και 34.3 MPa για τις συνθέσεις BPD, CKD, MP και EP αντίστοιχα. Στις 90 ημέρες, η αντοχή σε θλίψη της σύνθεσης BPD υπολογίστηκε στα 69.9 MPa με τη σύνθεση CKD να ακολουθεί με 54.3 MPa και τις συνθέσεις EP και MP να υπολείπονται σημαντικά με τιμές 41.1 και 40.8 MPa αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι μέχρι την ηλικία των 28 ημερών η σύνθεση αναφοράς εμφάνισε μεγαλύτερες τιμές αντοχής σε θλίψη σε σχέση με στη σύνθεση EP αλλά στις 90 ημέρες τα αποτελέσματα αντιστράφηκαν. Τα αποτελέσματα των δοκιμών υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.4** και αποτυπώνονται γραφικά στο **Σχήμα 3.3**.

Όπως ήταν αναμενόμενο η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων αυξήθηκε με την ηλικία τους. Χαρακτηριστικά, η αύξηση προσδιορίστηκε σε 13.5 %, 30 %, 24 % και 25 % για τις συνθέσεις MP, CKD, BPD και EP αντίστοιχα μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Ομοίως, η ποσοστιαία αύξηση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων από τις 28 ημέρες έως την ηλικία των 90 ημερών υπολογίστηκε σε 10 %, 12.5 %, 15 % και 20.7 % για τις συνθέσεις MP, CKD, BPD EP αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη αθροιστική αύξηση της αντοχής σε θλίψη παρουσιάστηκε στη σύνθεση EP με ποσοστό 46 % γεγονός που οφείλεται στην έντονη ποζολανική δραστηριότητα των σωματιδίων του διογκωμένου

περλίτη που έχει ως αποτέλεσμα την πιο αργή ενυδάτωση του τσιμέντου, γεγονός που αιτιολογεί τις μικρότερες πρώιμες αντοχές της συγκεκριμένης σύνθεσης.

**Πίνακας 3.4 Θλιπτική αντοχή συνθέσεων ΑΣΣ σε ΜΡα.**

Σύνθεση	Θλιπτική αντοχή σε ΜΡα		
	Ηλικία σε ημέρες		
	7	28	90
MP	32.7	37.1	40.8
CKD	37.0	48.2	54.3
BPD	49.0	60.7	69.9
EP	27.3	34.3	41.1



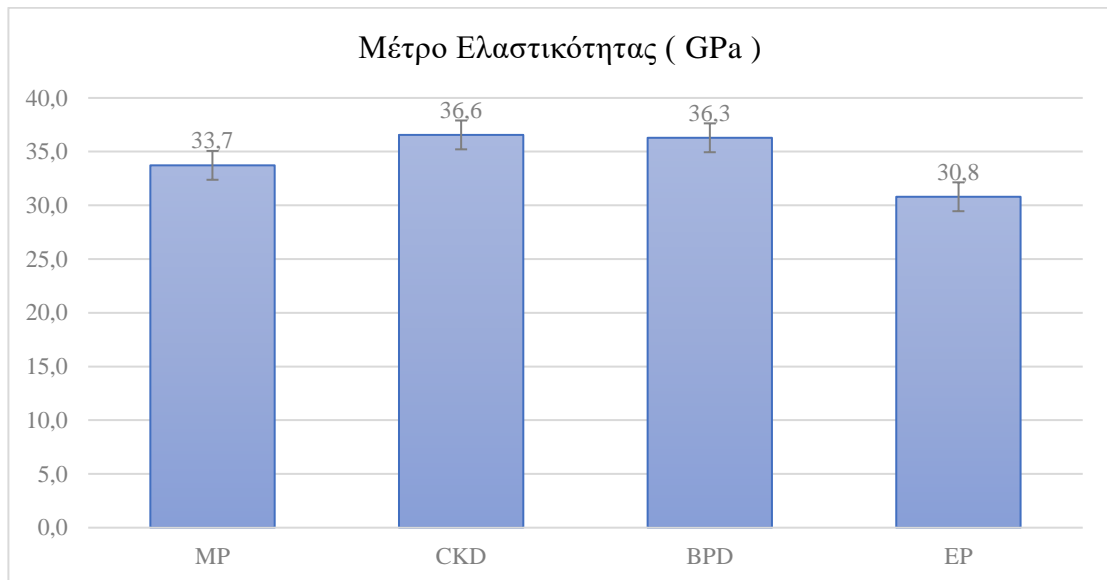
Σχήμα 3.3 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής συνθέσεων ΑΣΣ σε διάφορες ηλικίες ( ΜΡα ).

### 3.2.4 Μέτρο Ελαστικότητας

Η δοκιμή προσδιορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε στις 28 ημέρες. Η σύνθεση CKD παρουσίασε την υψηλότερη τιμή Μέτρου ελαστικότητας στα 36.6 GPa με τη σύνθεση BPD να έπεται με παραπλήσια τιμή στα 36.3 GPa και τις συνθέσεις MP και EP να ακολουθούν με τιμές 33.7 GPa και 30.8 GPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας για κάθε σύνθεση ΑΣΣ περιλαμβάνονται στον **Πίνακα 3.5** και απεικονίζονται γραφικά στο **Σχήμα 3.4**.

**Πίνακας 3.5 Μέτρο Ελαστικότητας συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμών ηλικίας 28 ημερών.**

Σύνθεση	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	T.A.
MP	33.7	2.31
CKD	36.6	0.75
BPD	36.3	5.15
EP	30.8	0.85



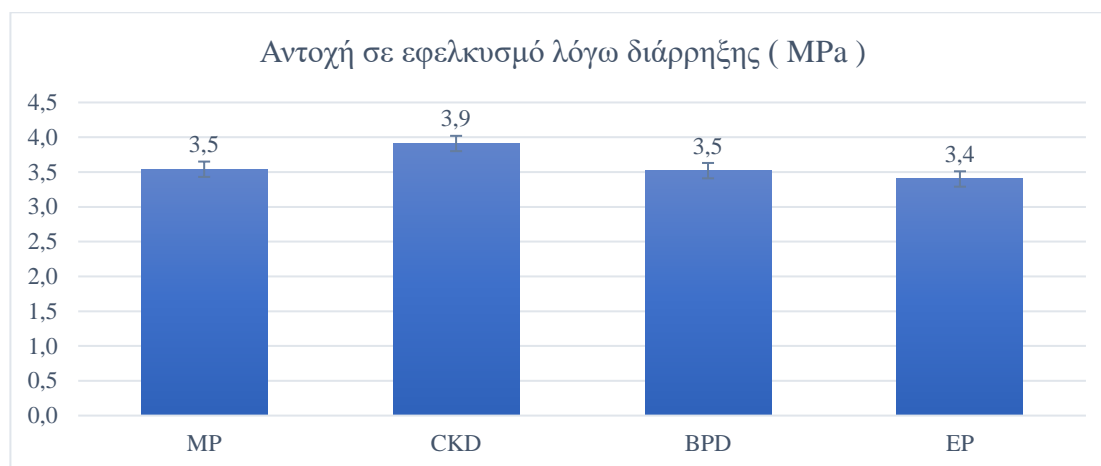
Σχήμα 3.4 Σχηματική απεικόνιση Μέτρου Ελαστικότητας συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμίων ηλικίας 28 ημέρων.

### 3.2.5 Αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης

Η δοκιμή προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής λόγω διάρρηξης των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στις 90 ημέρες. Η σύνθεση CKD παρουσίασε την υψηλότερη τιμή αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης με 3.9 MPa με τις συνθέσεις BPD και αναφοράς να ακολουθούν με την ίδια τιμή στα 3.5 MPa. Η μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης παρουσιάστηκε στη σύνθεση EP και προσδιορίστηκε σε 3.4 MPa, δηλαδή μειωμένη κατά 3% σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Αντίστοιχα, η σύνθεση CKD που παρουσίασε την υψηλότερη τιμή της δοκιμής ήταν αυξημένη κατά 11 % σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Εντύπωση προκαλεί ότι η σύνθεση BPD, η οποία παρουσίασε την υψηλότερη αντοχή σε θλίψη της δοκιμής, εμφάνισε μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης σε σχέση με τη σύνθεση CKD παρότι είναι γνωστή η αναλογική σχέση των δύο ιδιοτήτων. Ενδεχομένως, η μεγαλύτερη λεπτότητα του CKD σε σχέση με το BPD ως πληρωτικό υλικό να οδηγεί σε πιο συμπαγή μικροδομή στη διεπιφανειακή ζώνη του ΑΣΣ, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης των συνθέσεων ΑΣΣ εμφανίζονται στον **Πίνακα 3.6** και στο **Σχήμα 3.5**.

**Πίνακας 3.6 Αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών.**

Σύνθεση	Αντοχή σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης ( MPa )	T.A. (MPa)
MP	3.5	0.30
CKD	3.9	0.63
BPD	3.5	0.87
EP	3.4	0.16



Σχήμα 3.5 Σχηματική καταγραφή αντοχής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών.

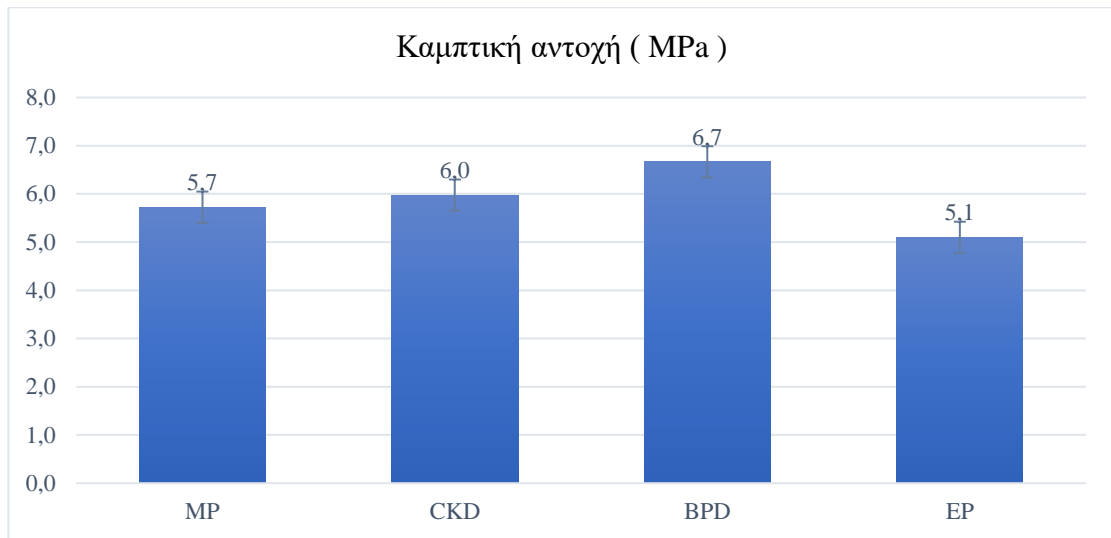
### 3.2.6 Καμπτική αντοχή

Η σύνθεση BPD παρουσίασε την υψηλότερη αντοχή της δοκιμής σε κάμψη τριών σημείων με τιμή 6.7 MPa. Η σύνθεση CKD παρουσίασε την δεύτερη υψηλότερη τιμή καμπτικής αντοχής στα 6.0 MPa, με τη σύνθεση αναφοράς να ακολουθεί στα 5.7 MPa. Τελευταία, η σύνθεση EP η οποία παρουσίασε την μικρότερη αντοχή σε κάμψη στα 5.1 MPa, μικρότερη κατά 12 % σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς και κατά 31 % σε σχέση με τη σύνθεση BPD. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καμπτική αντοχή των συνθέσεων ΑΣΣ ενδεχομένως να εμφάνιζε υψηλότερες τιμές αν τα δοκίμια είχαν συντηρηθεί σε νερό. Αντιθέτως, τα πρισματικά δοκίμια που εξετάστηκαν είχαν συντηρηθεί σε θάλαμο ξήρανσης με σταθερή θερμοκρασία 24°C και υγρασία 67 % καθώς προηγουμένως υπεβλήθησαν σε μέτρηση συστολής ξήρανσης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3.7 και στο Σχήμα 3.6.

**Πίνακας 3.7 Καμπτική αντοχή συνθέσεων ΑΣΣ σε MPa μετά από 90 ημέρες.**

Σύνθεση	Καμπτική αντοχή ( MPa )
MP	5.7
CKD	6.0

BPD	6.7
EP	5.1



Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση της καμπτικής αντοχής συνθέσεων ΑΣΣ δοκιμίων ηλικίας 90 ημέρων.

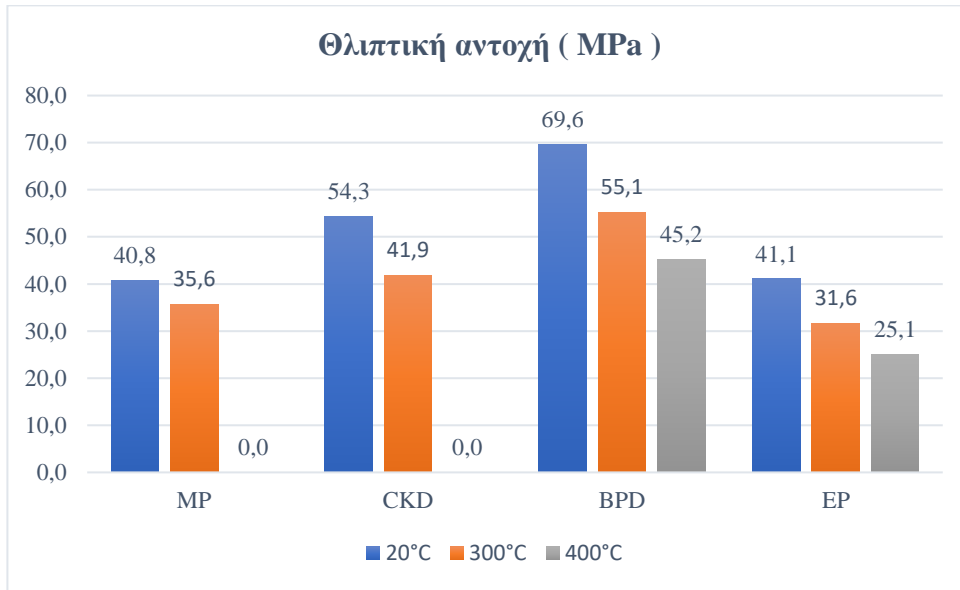
### 3.2.7 Θλιπτική αντοχή μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες

Στους 300<sup>0</sup>C η μεγαλύτερη μείωση στη θλιπτική αντοχή εμφανίστηκε στη σύνθεση EP με ποσοστό 23.1 %, με τη σύνθεση CKD να εμφανίζει την δεύτερη μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση με 22.8 %. Η σύνθεση BPD ανταποκρίθηκε καλύτερα στη θερμική καταπόνηση με ποσοστό απώλειας της αντοχής της σε θλίψη 20.8 %. Η μικρότερη μείωση στη θλιπτική αντοχή παρουσιάστηκε στη σύνθεση αναφοράς με 12.7 %. Σε θερμοκρασία έκθεσης 400<sup>0</sup>C τα δοκίμια των συνθέσεων αναφοράς και CKD υπέστησαν εκρηκτική αποφλοίωση. Η σύνθεση EP παρουσίασε τη μεγαλύτερη μείωση στη θλιπτική αντοχή της με ποσοστό 39 %, ενώ η σύνθεση BPD εμφάνισε πτώση της θλιπτικής αντοχής της κατά 35 %. Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8 και γραφικά στο Σχήμα 3.7.

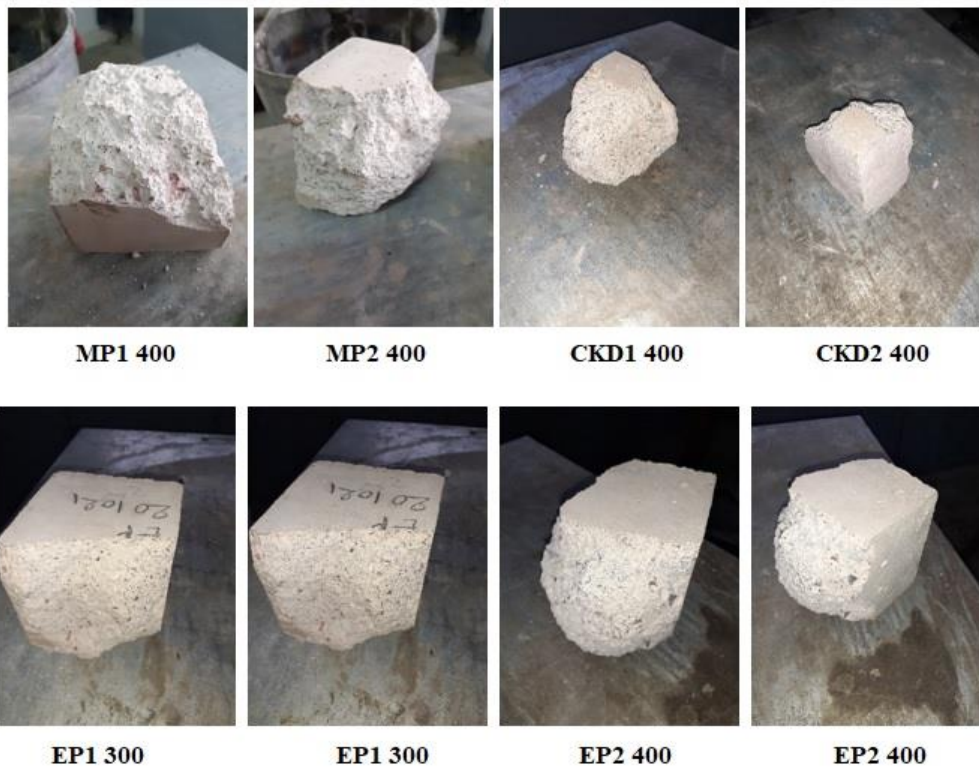
Πίνακας 3.8 Μεταβολή (%) θλιπτικής αντοχής (MPa) συνθέσεων ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.

Σύνθεση	Μεταβολή θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την αρχική (%)		
	Θερμοκρασία σε <sup>0</sup> C		
	20	300	400
MP	40.8	-12.7	-
CKD	54.3	-22.8	-
BPD	69.6	-20.8	-35.0

EP	41.1	-23.1	-39.0
----	------	-------	-------



Σχήμα 3.7 Εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής συνθέσεων ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών ( MPa ).



Εικόνα 24 Εκρηκτική αποφλοιώση δοκιμών ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης στους 3000C και 4000C.



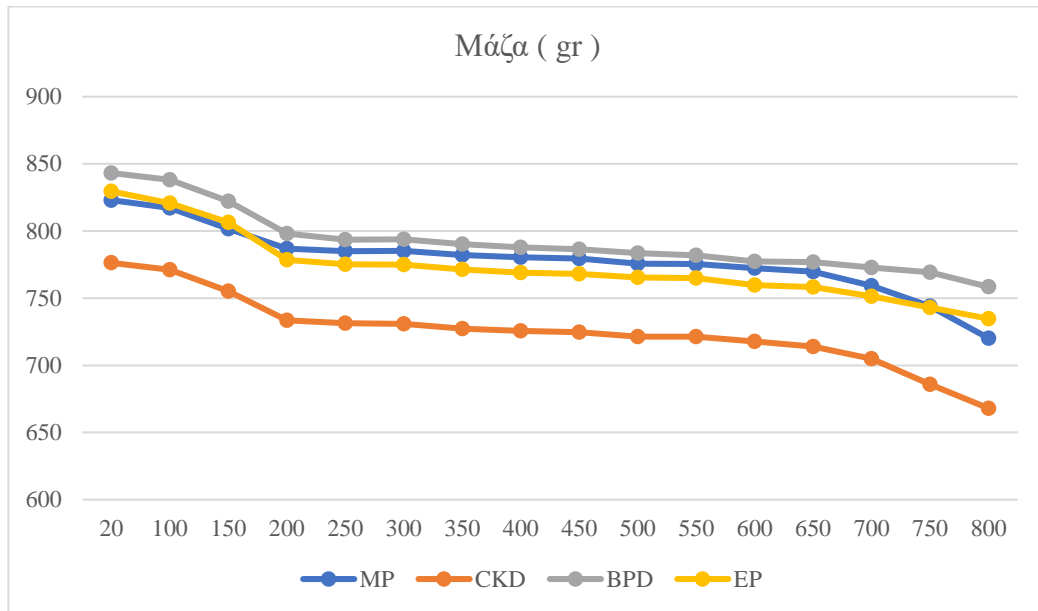
### 3.2.8 Απόλεια μάζας λόγω θερμικής καταπόνησης

Στον Πίνακα 3.9 περιλαμβάνονται τα στοιχεία που καταδεικνύουν την μείωση της μάζας των δοκιμίων μετά από την έκθεσή τους σε θερμοκρασίες από 20<sup>0</sup>C έως 800<sup>0</sup>C. Η μεγαλύτερη αθροιστική απώλεια μάζας της δοκιμής καταγράφηκε στα δοκίμια της σύνθεσης CKD και προσδιορίστηκε σε 14 %, με τη σύνθεση αναφοράς MP να καταγράφει επίσης σημαντική απώλεια στη μάζα των δοκιμίων που προσδιορίστηκε σε 12.5 %. Ελάχιστα μικρότερη ήταν η συνολική απώλεια μάζας της σύνθεσης EP που υπολογίστηκε σε 11.5 %, ενώ η σύνθεση BPD παρουσίασε την υψηλότερη αντίσταση στη θερμική καταπόνηση των δοκιμίων της με την απώλεια μάζας να ανέρχεται σε ποσοστό 10 %. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απώλεια μάζας των συνθέσεων ΑΣΣ ακολούθησε διαφορετικούς ρυθμούς μεταβολής ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος της έκθεσής τους. Συγκεκριμένα, από τους 20<sup>0</sup>C έως τους 200<sup>0</sup>C η μείωση υπολογίστηκε σε 4.2 %, 5.4 %, 5.2 % και 6 % για τις συνθέσεις MP, CKD, BPD και EP αντίστοιχα. Από τους 200<sup>0</sup>C έως τους 600<sup>0</sup>C η μείωση της μάζας των συνθέσεων MP, CKD, BPD και EP εκτιμήθηκε σε 1.8 %, 1.9 %, 2.5 % και 2.3 % αντίστοιχα. Στο τελευταίο στάδιο της δοκιμής, από τους 600<sup>0</sup>C έως τους 800<sup>0</sup>C η μείωση της μάζας υπολογίστηκε σε 6.5 %, 6.7 %, 2.3 % και 3.2 % για τις συνθέσεις MP, CKD, BPD και EP αντίστοιχα. Από την ανάλυση των στοιχείων, προκύπτει ότι κατά το πρώτο στάδιο της δοκιμής για θέρμανση από τους 20<sup>0</sup> C έως τους 200<sup>0</sup> C, η απώλεια μάζας των συνθέσεων BPD και EP ανήλθε σε 53 % και 54 % της συνολικής απώλειας μάζας τους για όλα τα στάδια της δοκιμής. Αντιθέτως, η απώλεια μάζας των συνθέσεων MP και CKD ανήλθαν σε ποσοστά 50 % και 46 % της αθροιστικής απώλειας μάζας τους στο τελευταίο στάδιο της θέρμανσης από τους 600<sup>0</sup>C έως τους 800<sup>0</sup>C. Οι μικρότερες ποσοστιαίες απώλειες μάζας ως προς τις συνολικές απώλειες μάζας για όλη τη δοκιμή, παρουσιάστηκαν στο θερμοκρασιακό εύρος από 20<sup>0</sup>C έως 600<sup>0</sup>C με ποσοστά 14 %, 14.5 %, 24.8 % και 24 % για τις συνθέσεις MP, CKD, BPD και EP αντίστοιχα. Η εξέλιξη της απώλειας μάζας των δοκιμίων ΑΣΣ σε συνάρτηση με την θερμοκρασία στην οποία εκτίθενται παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.

Πίνακας 3.9 Εξέλιξη της απώλειας μάζας συνθέσεων ΑΣΣ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών

Θερμοκρασία ( Celsius )	Μάζα ( gr )			
	MP	CKD	BPD	EP
20	822.97	776.285	843.145	829.515
100	817.125	771.165	838.20	820.71
150	801.615	755.14	822.17	806.305
200	786.955	733.5	798.18	778.615
250	784.95	731.28	793.59	775.245
300	785.22	730.79	793.715	774.985
350	782.125	727.375	790.235	771.35
400	780.395	725.525	787.76	768.955
450	779.495	724.575	786.465	768.025
500	775.645	721.35	783.455	765.52

550	775.50	721.28	781.93	764.97
600	772.35	717.825	777.25	759.745
650	769.73	714.03	776.815	758.215
700	759.28	704.785	772.90	751.43
750	743.91	685.735	769.315	743.005
800	720.195	668.02	758.425	734.73



Σχήμα 3.8 Σχηματική καταγραφή της απώλειας μάζας συνθέσεων ΑΣΣ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.



Εικόνα 25 Εκρηκτική αποφλοίωση δοκιμίων ΑΣΣ κατόπιν θερμικής καταπόνησης στους 8000C.

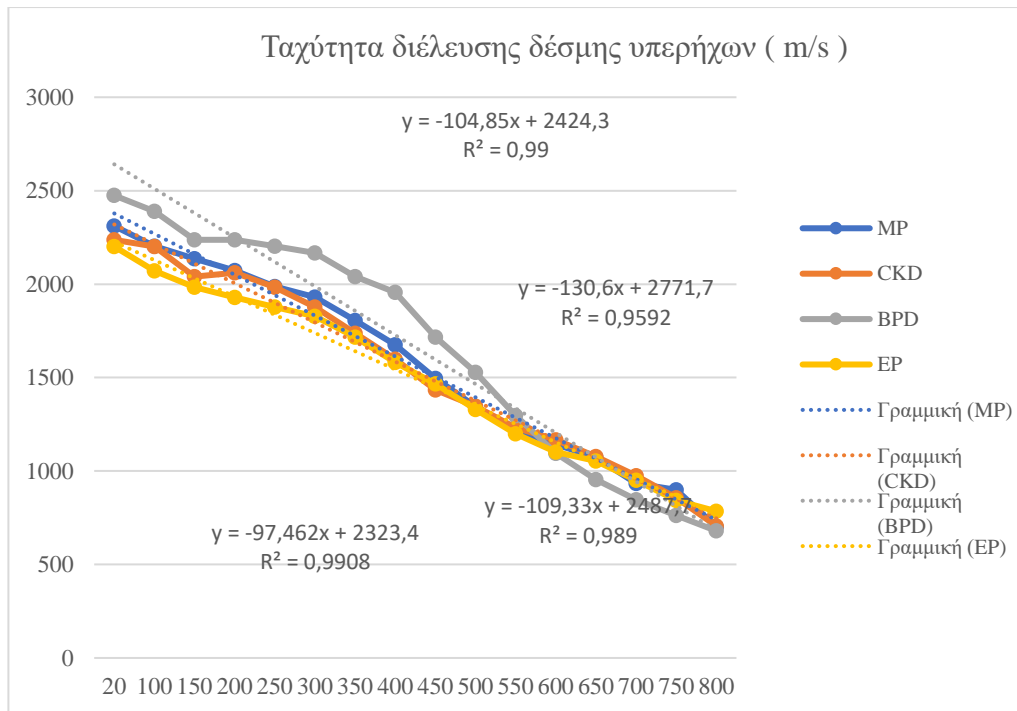
### 3.2.9 Ταχύτητα διέλευσης υπερήχων (UPV-test) κατόπιν θερμικής καταπόνησης

Τα δοκίμια των συνθέσεων ΑΣΣ υπεβλήθησαν σε δοκιμή ταχύτητας διέλευσης υπερήχων πριν και κατόπιν θερμικής καταπόνησης σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Η μεγαλύτερη ταχύτητα διέλευσης υπερήχων σε θερμοκρασία 20<sup>0</sup>C (συνθήκες εργαστηρίου ) καταγράφεται στη σύνθεση BPD με 2474.5 m/sec με τη σύνθεση αναφοράς να εμφανίζει τη δεύτερη υψηλότερη τιμή στις ίδιες συνθήκες στα 2311.0 m/sec. Η σύνθεση CKD εμφανίζει αρχική ταχύτητα δέσμης υπερήχων στα 2237.0 m/sec, οριακά χαμηλότερη από αυτή της σύνθεσης αναφοράς, ενώ η σύνθεση EP παρουσιάζει την μικρότερη ταχύτητα διέλευσης υπερήχων στους 20<sup>0</sup>C με τιμή 2201.0 m/sec. Η αθροιστική μείωση της ταχύτητας διέλευσης υπερήχων στο πέρας της δοκιμής ( 800<sup>0</sup> C ) υπολογίστηκε σε 70 %, 68 %, 72 % και 64 % για τις συνθέσεις MP, CKD, BPD και EP αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη παραμένουσα τιμή της ταχύτητας διέλευσης υπερήχων καταγράφηκε στη σύνθεση EP στα 785 m/sec με τη μικρότερη να αφορά στη σύνθεση BPD στα 680 m/sec. Η ποσοστιαία μείωση των ταχυτήτων διέλευσης για τις συνθέσεις MP, CKD, BPD και EP στην περιοχή θερμοκρασιών από 20<sup>0</sup> έως 200<sup>0</sup>C υπολογίστηκε σε 10 %, 8 %, 10 % και 12 % αντίστοιχα. Από τους 200<sup>0</sup> έως τους 400<sup>0</sup> C η ποσοστιαία μείωση ανήλθε σε 27.5 %, 28.5%, 21 % και 28 % αντίστοιχα, ενώ στο θερμοκρασιακό εύρος 400<sup>0</sup>C έως 600<sup>0</sup>C η αντίστοιχη πτώση έφτασε σε 50.5 %, 48 %, 56 % και 50 % αντίστοιχα. Τέλος, στο τελευταίο στάδιο της θερμικής καταπόνησης, από 600<sup>0</sup>C έως τους 800<sup>0</sup>C, η ποσοστιαία μείωση έφτασε σε

70 %, 68 %, 72.5 % και 64 % για τις συνθέσεις MP, CKD, BPD και EP αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ταχύτητας διέλευσης υπερήχων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.10**, ενώ η γραφική απεικόνιση της πτώσης της ταχύτητας διέλευσης υπερήχων σε σχέση με τη θερμοκρασία παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.9**.

**Πίνακας 3.10 Ταχύτητα διέλευσης δέσμης υπερήχων διαμέσου δοκιμίων ΑΣΣ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.**

Θερμοκρασία ( Celsius )	Ταχύτητα διέλευσης δέσμης υπερήχων ( m/s )			
	MP	CKD	BPD	EP
20	2311.0	2237.0	2474.5	2201.0
100	2203.5	2201.0	2390.0	2071.0
150	2136.0	2041.0	2237.0	1983.0
200	2072.5	2060.5	2237.0	1929.0
250	1986.5	1983.0	2203.5	1877.0
300	1931.5	1877.0	2167.5	1828.0
350	1805.5	1737.5	2041.0	1717.0
400	1676.0	1598.0	1956.5	1582.0
450	1496.0	1434.0	1716.0	1467.0
500	1344.5	1346.0	1528.0	1330.0
550	1222.0	1232.0	1297.0	1200.0
600	1143.0	1166.5	1094.5	1102.5
650	1072.0	1077.0	954.0	1053.5
700	933.0	975.5	847.0	951.5
750	899.5	856.0	762.5	842.5
800	701.5	706.0	680.0	785.0



Σχήμα 3.9 Σχηματική απεικόνιση όμως μεταβολής όμως ταχύτητας δέσμης υπερήχων διαμέσου δοκιμών ΑΣΣ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.

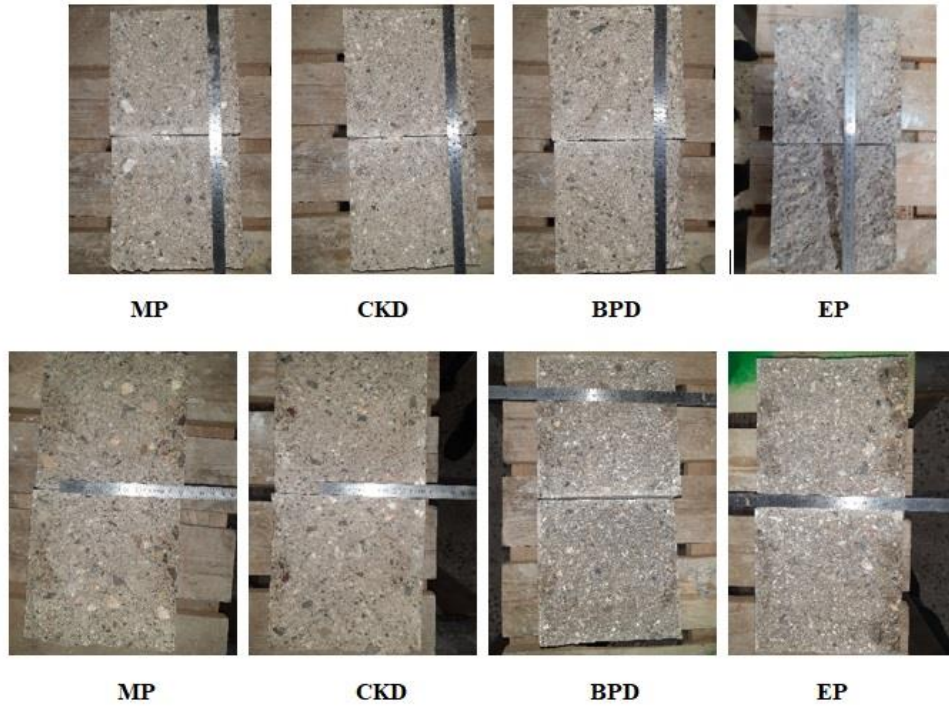
### 3.2.10 Διαπερατότητα σε νερό

Η μικρότερη τιμή του βάθους διείσδυσης σε πρότυπη δοκιμή Υδατοπερατότητας παρατηρήθηκε στη σύνθεση EP με τιμή 1.4 cm. Η σύνθεση BPD σημείωσε σημαντικά μεγαλύτερη τιμή του βάθους διείσδυσης στα 2.1 cm σε σχέση με την EP με τη σύνθεση CKD που ακολουθεί να εμφανίζει σημαντικά μικρότερη αντίσταση σε Υδατοπερατότητα με το βάθος διείσδυσης να υπολογίζεται σε 2.7 cm. Τέλος, η σύνθεση αναφοράς παρουσίασε τη μικρότερη τιμή όμως δοκιμής αντίστασης σε Υδατοπερατότητα με το βάθος διείσδυσης να φτάνει στα 2.8 cm, τιμή παραπλήσμως της σύνθεσης CKD. Παρατηρείται η συνόμωςφορά της ποζολανικής δραστηριότητας των σφαιριδίων διογκωμένου περλίτη ( EP ) στη μείωση του βάθους διείσδυσης σε πρότυπη δοκιμή Υδατοπερατότητας. Σύμφωνα με την ερευνητική μελέτη των Abdulkader et al, οι συνθέσεις που περιείχαν ασβεστολιθικής φύσης εναλλακτικά πληρωτικά υλικά εμφάνισαν κατά 20% μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης σε σχέση με αυτά που περιείχαν σφαιρίδια διογκωμένου περόμως (EP) ίδιας ποσότητας. Μάλιστα η διαφορά αυτή έφτασε στο 46% όταν οι ποσότητες εναλλακτικού πληρωτικού υλικού μειώθηκε εξίσου κατά 15 %. Φαίνεται ότι η χρησιμοποίηση διογκωμένου περλίτη απομονώνει καλύτερα την επικοινωνία των πόρων σε σχέση με τα ασβεστολιθικής προέλευσης πληρωτικά. Η σύνθεση CKD εμφανίζει περίπου το ίδιο βάθος διείσδυσης ( μικρότερο κατά μόλις 3.5% ) με την σύνθεση αναφοράς ( MP ) αλλά έχει σημαντική διαφορά με την σύνθεση BPD που έχει

κατά 25 % μικρότερο βάθος διείσδυσης σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς ( MP ). Οι Peerzada et al παρατήρησαν ότι η αύξηση του ποσοστού μετακαολίνη σε συνθέσεις ΑΣΣ οδήγησε σε σημαντική μείωση του τριχοειδούς των πόρων λόγω αύξησης των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων ( C-S-H ) με ταυτόχρονη μείωση του υδροξειδίου του ασβεστίου ( CH ). Η μείωση του τριχοειδούς κενού βελτίωσε κατά πολύ την αντοχή του ΑΣΣ σε Υδατοπερατότητα. Η μαρμαρόσκονη ( MP ), η σκόνη αποκονίωσης περιστροφικής καμίνου ( CKD ) και η σκόμωσ αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης περιστροφικής καμίνου ( BPD ) δεν θεωρούνται όμως λανικά υλικά , όμως δεν είναι τελείως αδρανή, καθώς περιέχουν διοξείδιο του πυριτίου ( SiO<sub>2</sub> ) σε ποσοστά 0.35 % , 10.18 % και 19.39 % αντίστοιχα. Ενδεχομένως, η προσθήκη σφαιριδίων διογκωμένου περλίτη ( EP ) η οποία αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την υδατοαπορροφητικότητα του ΑΣΣ και πληρώνει τα τριχοειδή αγγεία των πόρων του, καθιστά δυσκολότερη τη διείσδυση νερού υπό πίεση κατά την πρότυπη δοκιμή Υδατοπερατότητας λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται στη μικροδομή του ΑΣΣ. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.11**.

**Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα δοκιμής Υδατοπερατότητας συνθέσεων ΑΣΣ.**

Σύνθεση	α/α	Μάζα ( gr )	Στάθμη 0	Στάθμη 1	Βάθος διείσδυσης ( cm )	Μέσο βάθος διείσδυσης ( cm )	Τυπική απόκλιση	Τυπική απόκλιση ( % )	Φορτίο αστοχίας λόγω διάρρηξης ( KN )
MP	1	7782	65	130	3.5	2.8	0.6	21	60.977
	2	7731	130	110	2.6				
	3	7808	110	110	2.4				
CKD	1	7838	150	210	2.4	2.7	0.7	26	50.075
	2	7812	200	200	3.5				
	3	7766	200	200	2.3				
BPD	1	8124	290	300	2.2	2.1	0.1	5	59.95
	2	8122	280	240	2.0				
	3	8274	285	290	2.1				
EP	1	7766	305	325	1.2	1.4	0.3	25	71.429
	2	7806	350	300	1.7				
	3	7744	355	360	1.2				



Εικόνα 26 Προσδιορισμός βάθους διείσδυσης κυβικών δοκιμίων ΑΣΣ κατά την πρότυπη δοκιμή Υδατοπερατότητας.



## 4 Κόστος υλικών και εργασιών ΑΣΣ

### 4.1 Κόστος Υλικών

Η παρασκευή ΑΣΣ απαιτεί την προμήθεια αδρανών υλικών υψηλότερης λεπτότητας σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα καθώς και προσθήκη χημικών προσμίκτων που βελτιώνουν τη ρευστότητα (Superplasticiser - SP) και τροποποιούν το ιξώδες του (Viscosity Modifying Agent - VMA). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους παραγωγής του σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου από εναλλακτικά πληρωτικά υλικά που αποτελούν βιομηχανικά παραπροϊόντα μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό του κόστους παραγωγής, καθώς και στη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος που θα προέκυπτε από την απόρριψή τους σε αυτό. Στους Πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές αγοράς ορισμένων εναλλακτικών πληρωτικών υλικών, καθώς και χημικών προσμίκτων που χρησιμοποιούνται ευρέως.

Πίνακας 4.1 Ενδεικτικό κόστος λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών ΑΣΣ (τιμές 2011).

Λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό	Ενδεικτικό κόστος (€/tn)
Marble powder 20	85
Marble powder 80	66
Micro silica (MS)	225

Πίνακας 4.2 Ενδεικτικές τιμές χημικών προσμίκτων που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή ΑΣΣ (τιμές 2011)

Χημικό πρόσμικτο	Ενδεικτικό κόστος (€/kg)
Chemium VMA	0.95
Chemium NT2	0.89

### 4.2 Κόστος κατασκευής ΑΣΣ

Η ιδιότητα του ΑΣΣ να ρέει υπό το ίδιο βάρος του, σε συνδυασμό με τα ανώτερα ρεολογικά χαρακτηριστικά του σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα επιφέρει σημαντική μείωση του χρόνου εργασιών και επιτρέπει καλύτερο προγραμματισμό στην εκτέλεση των τεχνικών έργων. Χαρακτηριστικά, η χρονική διάρκεια της άντλησης του νοπού ΑΣΣ είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερη από την αντίστοιχη του συμβατικού σκυροδέματος, κάτι που επιτρέπει την συντομότερη παραμονή των φορτηγών αναμικτήρων στο εργοτάξιο και περιορίζει τις ανάγκες ελιγμών τους



επιτρέποντας οικονομία καυσίμου. Ομοίως, η απουσία ανάγκης μηχανικής δόνησης αλλά και οι ανώτερες ποιοτικά επιφάνειες που σχηματίζει το ΑΣΣ, μειώνουν σημαντικά το χρόνο διάστρωσης και τελικού επιχρίσματος των επιφανειών, οδηγώντας σε μείωση του κόστους αποζημίωσης για το προσωπικό και τον εξοπλισμό που απασχολείται. Οι Glass et al διερεύνησαν τη σχέση κόστους μεταξύ αντίστοιχων κατασκευών από ΑΣΣ και συμβατικό σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της μελέτης, εξετάστηκαν 13 πλάκες ισάριθμων κατοικιών και εκτιμήθηκαν ο χρόνος εκτέλεσης των εργασιών και το κόστος των εργατικών. Οι 6 πλάκες κατασκευάστηκαν με συμβατικό σκυρόδεμα και οι υπόλοιπες 7 με ΑΣΣ. Στον **Πίνακα 4.3** και στον **Πίνακα 4.4** παρουσιάζεται η χρονική διάρκεια των εργασιών κατασκευής των πλακών από συμβατικό σκυρόδεμα και ΑΣΣ αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.3 Χρόνος διάρκειας εργασιών κατασκευής πλακών από συμβατικό σκυρόδεμα.**

Ονομασία πλάκας	Χρόνος άντλησης (min)	Επιφάνεια (m <sup>2</sup> )	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Ελάχιστος χρόνος κατασκευής (min/m <sup>2</sup> )	Μέγιστος χρόνος κατασκευής (min/m <sup>2</sup> )
T1	82:54'	41.83	3.14	01:59'	26:24'
T2	86:05'	37.80	2.84	02:17'	30:19'
T3	80:15'	37.80	2.84	02:07'	28:16'
T4	47:57'	16.50	1.24	02:54'	38:45'
T5	47:07'	16.50	1.24	02:51'	38:04'
T6	84:15'	56.77	4.26	01:29'	19:47'
Μέσος όρος χρόνου κατασκευής των 6 πλακών				02:16'	30:16'

**Πίνακας 4.4 Χρόνος διάρκειας εργασιών κατασκευής πλακών από ΑΣΣ**

Ονομασία πλάκας	Χρόνος άντλησης (min)	Επιφάνεια (m <sup>2</sup> )	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Ελάχιστος χρόνος κατασκευής (min/m <sup>2</sup> )	Μέγιστος χρόνος κατασκευής (min/m <sup>2</sup> )
ΑΣΣ1	28:40'	36.73	3.67	0:47'	07:49'
ΑΣΣ2	23:15'	49.49	4.95	0:28'	04:42'
ΑΣΣ3	45:40'	69.31	5.20	0:40'	08:47'
ΑΣΣ4	23:15'	42.80	3.21	0:33'	07:15'
ΑΣΣ5	30:50'	42.85	3.21	0:43'	09:36'
ΑΣΣ6	22:15'	46.33	3.47	0:29'	06:25'
ΑΣΣ7	23:30'	41.46	3.11	0:34'	07:33'
Μέσος όρος χρόνου κατασκευής των 7 πλακών				0:36'	07:26'

Παρατηρείται ότι ο μέσος χρόνος κατασκευής ενός m<sup>2</sup> πλάκας από ΑΣΣ είναι 36 δευτερόλεπτα, ενώ ο αντίστοιχος χρόνος κατασκευής με συμβατικό σκυρόδεμα υπολογίστηκε σε 136 δευτερόλεπτα σε ευνοϊκές συνθήκες. Στις δυσμενέστερες συνθήκες οι αντίστοιχοι χρόνοι προσδιορίστηκαν σε 7 λεπτά και 26 δευτερόλεπτα για το ΑΣΣ και 30 λεπτά και 16 δευτερόλεπτα για το συμβατικό σκυρόδεμα. Το ΑΣΣ επιτρέπει την μείωση του χρόνου κατασκευής κατά 73 % και τις συνολικό χρόνο απασχόλησης του προσωπικού κατά 70 % σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

**Πίνακας 4.5 Κόστος εργασιών και υλικών σε £ ( τιμές 2011 )**

Είδος δαπάνης	Κόστος (£)		
	ΑΣΣ	Συμβατικό σκυρόδεμα δυσμενείς συνθήκες	Συμβατικό σκυρόδεμα ευμενείς συνθήκες
Υπερβάσεις	2.00	43.33	43.33
Τοποθέτηση	15.22	57.02	57.02
Τελείωμα	0	2.37	14.20
Υπερωρίες	0	334.00	-
Υλικά	380.63	252.59	252.59
Τρίψιμο επιφανειών	-	Περιλαμβάνεται στο κόστος υπερωριών	2.09
Προϊόν για τρίψιμο επιφανειών	6.75	6.75	6.75
Σύνολο	404.60	696.05	375.97
Εξοικονόμηση σε σχέση με το ΑΣΣ	-	291.45 ( + 72 % )	-28.63 ( -7 % )

Η σημαντική μείωση της χρονικής διάρκειας των εργασιών που απαιτούνται για την άντληση, διάστρωση και διαμόρφωση των τελικών επιφανειών όταν χρησιμοποιείται ΑΣΣ, έχουν άμεσο αντίκτυπο στο συνολικό κόστος του έργου. Η εφαρμογή ΑΣΣ επιτρέπει την σημαντική μείωση της απασχόλησης εκτός ωραρίου του προσωπικού, ενώ μειώνει τον απαιτούμενο μηχανικό εξοπλισμό που δεσμεύεται κατά την εκτέλεση του έργου. Η έλλειψη απαίτησης για μηχανική δόνηση που παρέχει η χρήση ΑΣΣ περιορίζει τον θόρυβο που παράγεται στο εργοτάξιο με ευεργετικές συνέπειες στην υγεία των εργαζομένων και των περιοίκων και καθιστά ευχερέστερο τον προγραμματισμό των εργασιών. Αντιθέτως, το κόστος των πρώτων υλών για την παρασκευή μιγμάτων ΑΣΣ είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτό του συμβατικού σκυροδέματος. Σε ευνοϊκές συνθήκες (απουσία ανάγκης για απασχόληση εκτός ωραρίου) η πραγματοποίηση των κατασκευών με συμβατικό σκυρόδεμα οδηγεί σε συνολική μείωση του κόστους κατά 7 % σε σχέση με την εφαρμογή ΑΣΣ. Σε δυσμενέστερες συνθήκες όμως, η εξοικονόμηση χρόνου που επιτρέπει η χρήση ΑΣΣ επέφερε συνολική μείωση κόστους κατά 72 %. Γίνεται σαφές λοιπόν ότι το αυξημένο κόστος παραγωγής ΑΣΣ δεν πρέπει να αποτελεί τροχοπέδη στην αποδοχή και χρησιμοποίησή του σε όλο το φάσμα των κατασκευών καθώς ο προσεκτικός σχεδιασμός των συνθέσεων ΑΣΣ και η ικανότητά του να επιτύχει σημαντική επιτάχυνση εργασιών το καθιστούν ανταγωνιστικό σε σχέση με το συμβατικό

σκυρόδεμα. Στον **Πίνακα 4.5** καταγράφονται οι τιμές προμήθειας υλικών και το κόστος αποζημίωσης εργασιών για κάθε περίπτωση τρόπου κατασκευής.

## 5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρασκευάστηκαν συνθέσεις ΑΣΣ με εναλλακτικά λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά. Υποβλήθηκαν σε δοκιμές με στόχο τον προσδιορισμό των ρεολογικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους, της συμπεριφοράς τους σε θερμική καταπόνηση και της αντίστασής τους στην υδατοπερατότητα. Τα συμπεράσματα της εργασίας περιγράφονται ως εξής:

- Όλες οι συνθέσεις ΑΣΣ, με προσθήκη κατάλληλης ποσότητας υπερρυστοποιητή, παρουσίασαν αποδεκτές ρεολογικές ιδιότητες. Η μεγαλύτερη ποσότητα υπερρυστοποιητή απαιτήθηκε για τη σύνθεση BPD ενώ η μικρότερη για τη σύνθεση που περιείχε σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP). Δεν απαιτήθηκε προσθήκη τροποποιητή ιξώδους (VMA) σε καμία σύνθεση.
- Η διακύμανση της πυκνότητας όλων των συνθέσεων ήταν μικρή, ενώ οι συνθέσεις που εμφάνισαν το υψηλότερο και το χαμηλότερο ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα ήταν αντίστοιχα η CKD και η BPD.
- Όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν υψηλή θλιπτική αντοχή. Η σύνθεση BPD εμφάνισε την υψηλότερη αντοχή σε θλίψη στις 7, 28 και 90 ημέρες, ενώ η σύνθεση αναφοράς παρουσίασε την χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη στις 90 ημέρες, παραπλήσια με τη σύνθεση που περιείχε σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP).
- Όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν υψηλό Μέτρο Ελαστικότητας ανεξαρτήτως του είδους λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού που περιείχαν. Η σύνθεση CKD κατέγραψε τη μεγαλύτερη τιμή Μέρου Ελαστικότητας με τη σύνθεση BPD να εμφανίζει οριακά χαμηλότερη τιμή.
- Στον εφελκυσμό, η σύνθεση BPD παρουσίασε αντίστοιχα τη μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη, ενώ η σύνθεση EP την μικρότερη. Η σύνθεση CKD εμφάνισε την υψηλότερη αντοχή της δοκιμής σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης με τη σύνθεση EP να χαρακτηρίζεται από την μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό.
- Η μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης καταγράφηκε στη σύνθεση αναφοράς, ενώ η μικρότερη εμφανίστηκε στη σύνθεση BPD.
- Κατά τη θερμική καταπόνηση:
  - Η σύνθεση BPD παρουσίασε την μεγαλύτερη αντίσταση σε θερμική καταπόνηση στους 300<sup>0</sup>C και 400<sup>0</sup>C. Αντιθέτως, η σύνθεση EP

παρουσίασε την χαμηλότερη αντοχή σε θερμική καταπόνηση με ένα από τα δύο δοκίμια να υφίσταται εκρηκτική αποφλοίωση στους 300<sup>0</sup>C με την ίδια εξέλιξη να επαναλαμβάνεται κατά τη θέρμανση στους 400<sup>0</sup>C. Οι συνθέσεις αναφοράς και η σύνθεση CKD παρουσίασαν εκρηκτική αποφλοίωση μετά την έκθεση στους 400<sup>0</sup>C.

- Η σύνθεση CKD παρουσίασε την μεγαλύτερη απώλεια μάζας μετά την έκθεσή της σε θερμική καταπόνηση στους 800<sup>0</sup>C, με τη μικρότερη μείωση μάζας να καταγράφεται στη σύνθεση BPD.
  - Η μεγαλύτερη αθροιστική μείωση της ταχύτητας διέλευσης υπερήχων μετά από θερμική καταπόνηση μέχρι τους 800<sup>0</sup>C, καταγράφηκε στη σύνθεση αναφοράς, με τη μικρότερη μείωση να εμφανίζεται στη σύνθεση που περιείχε σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP).
- Η σύνθεση EP παρουσίασε την υψηλότερη αντοχή σε πρότυπη δοκιμή Υδατοπερατότητας, καταγράφοντας το μικρότερο βάθος διείσδυσης της δοκιμής. Αντιθέτως, η σύνθεση αναφοράς εμφάνισε τη μικρότερη αντοχή σε Υδατοπερατότητα και το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης με τη σύνθεση CKD να παρουσιάζει παραπλήσιες τιμές αποτελεσμάτων.

Ως γενικό συμπέρασμα, φαίνεται ότι η χρήση των εξεταζόμενων βιομηχανικών προϊόντων ΑΣΣ είναι εφικτή και χωρίς σημαντικές εκπτώσεις στην ποιότητα του σκυροδέματος. Αντιθέτως, στις περισσότερες περιπτώσεις αντικατάστασης ασβεστολιθικού φίλερ από βιομηχανικά προϊόντα, σημειώνεται βελτίωση των χαρακτηριστικών ποιότητας του ΑΣΣ. Αν μάλιστα συνυπολογιστεί η αναμενόμενη εξοικονόμηση κατασκευαστικού κόστους από τη χρήση του ΑΣΣ και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του ΑΣΣ από την αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, φαίνεται ότι η χρήση τους στο ΑΣΣ είναι τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδοτική.

## Βιβλιογραφία

- [1] Πετράκης Δ. (2021). Ρεολογικές ιδιότητες, μηχανικά χαρακτηριστικά και θερμική αντίσταση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με εναλλακτικά πληρωτικά υλικά, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [2] Ρέτσα Ν. (2021). Συγκριτική αξιολόγηση πληρωτικών υλικών κατά την εφαρμογή τους σε αυτοσυμπυκνούμενα κονιάματα, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ Αθήνα.
- [3] Τεχνική Οδηγία 5 - Αυτοσυμπυκνόμενο σκυρόδεμα (2014)
- [4] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, Σκυρόδεμα μικροδομή, ιδιότητες και υλικά, ISBN 978-960-461-178-2 , εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- [5] M.A. El-Mohsen, A.M. Anwar, I.A. Adam, Mechanical properties of Self-Consolidating Concrete incorporating Cement Kiln Dust, HBRC Journal, Volume 11, Issue 1, 2015, Pages 1-6, ISSN 1687-4048, <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.02.007>.
- [6] K.B. Najim, I. Al-Jumaily, A. M. Atea, Characterization of sustainable high performance/self-compacting concrete produced using CKD as a cement replacement material, Construction and Building Materials, Volume 103, 2016, Pages 123-129, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.037>.

- [7] M. Benaicha, O. Jalbaud, A.H. Alaoui, Y. Burtschell, Porosity effects on rheological and mechanical behavior of self-compacting concrete, *Journal of Building Engineering*, Volume 48, 2022, 103964, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103964>.
- [8] T. R. Surya, M. Prakash, K.S. Satyanarayanan, A. K. Celestine, N. Parthasarathi, Compressive strength of self compacting concrete under elevated temperature, *Materials Today: Proceedings*, Volume 40, Supplement 1, 2021, Pages S83-S87, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.746>.
- [9] V. Jarugumalli, L.N.K.S. Madupu, The flow properties of SCC with marble waste powder as a partial substitute for cement, *Materials Today: Proceedings*, Volume 52, Part 3, 2022, Pages 617-621, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.047>.
- [10] M. Sahraoui, T. Bouziani, Effects of fine aggregates types and contents on rheological and fresh properties of SCC, *Journal of Building Engineering*, Volume 26, 2019, 100890, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100890>.
- [11] S. Alexander, S. Juhi Manohar, S. Shino John, K. Varun Teja, T. Meena, Mechanical and micro-structural properties of perlite powder incorporated SCC, *Materials Today: Proceedings*, Volume 45, Part 2, 2021, Pages 3374-3382, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.776>.
- [12] S. Anandaraj, S. Karthik, K.S. Elango, S. Nishiketan, G. Pandiyarajan, P. Nithis Kumar, R. Palanikumar, M. Harihanandh, An experimental study on Fly Ash (FA) and marble powder in the properties of Self-Compacting Concrete (SCC), *Materials Today: Proceedings*, Volume 52, Part 3, 2022, Pages 1771-1774, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.441>.
- [13] Ch. Kavaya, U. Vamsi Mohan, Properties of SCC with marble powder as a marginal material, *Materials Today: Proceedings*, 2022, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.403>.
- [14] A. Sambangi, Arunakanthi E. Fresh and mechanical properties of SCC with fly ash and copper slag as mineral admixtures, *Materials Today: Proceedings*, Volume 45, Part 7, 2021, Pages 6687-6693, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.144>.
- [15] A. M. Zeyad, A. Almalki, Influence of mixing time and superplasticizer dosage on self-consolidating concrete properties, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 9, Issue 3, 2020, Pages 6101-6115, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.013>.
- [16] Jamila M. Abdalhmied, A.F. Ashour, T. Sheehan, Long-term drying shrinkage of self-compacting concrete: Experimental and analytical investigations, *Construction and Building Materials*, Volume 202, 2019, Pages 825-837, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.152>.
- [17] C. Vaidevi, T. F. Kala, A.R.R. Kalaiyarrasi, Mechanical and durability properties of self-compacting concrete with marble fine aggregate, *Materials Today: Proceedings*, Volume 22, Part 3, 2020, Pages 829-835, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.019>.
- [18] S. Ahmad, A. Umar, A. Masood, An appraisal of the models for the prediction of compressive strength of thermally damaged self-compacting concrete, *Materials Today: Proceedings*, 2022, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.022>.
- [19] A. Pineaud, P. Pimienta, S. Rémond, H. Carré, Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature,

Construction and Building Materials, Volume 112, 2016, Pages 747-755, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.132>.

[20] J.J. Chen, A.K.H. Kwan, Y. Jiang, Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 56, 2014, Pages 87-93, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.066>.

[21] R. Choudhary, R. Gupta, T. Alomayri, A. Jain, R. Nagar, Permeation, corrosion, and drying shrinkage assessment of self-compacting high strength concrete comprising waste marble slurry and fly ash, with silica fume, *Structures*, Volume 33, 2021, Pages 971-985, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.008>.

[22] P. Danish, G.M.G. Peerzada, Study on influence of Metakaolin and waste marble powder on self-compacting concrete – A state of the art review, *Materials Today: Proceedings*, Volume 44, Part 1, 2021, Pages 1428-1436, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.629>.

[23] A.E. Mir, S.G. Nehme, Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete, *Journal of Cleaner Production*, Volume 156, 2017, Pages 507-517, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.103>.

[24] Rich D. & Glass J. & Gibb, AGF & Goodier, Chris & Sander, G.. (2017). Optimising construction with self-compacting concrete. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*. 170.

[25] EFNARC-Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete (2002)

[26] EN 12350-8:2010, "Testing fresh concrete - Part 8: Slump-flow test", 2010 (n.d).

[27] EN 12350-8:2010, "Testing fresh concrete - Part 9: V-Funnel test", 2010 (n.d).

[28] EN 12350-8:2010, "Testing fresh concrete- Part 10: L-box test", 2010 (n.d).

[29] EN 12350-8:2010, "Testing fresh concrete - Part 11: Sieve segregation test", 2010 (n.d).

[30] EN 12350-8:2010, "Testing fresh concrete - Part 12: J-Ring test", 2010 (n.d).

[31] EN 12350-6:2009, "Testing fresh concrete - Part 6: Density", 2009 (n.d).

[32] EN 12350-7:2009, "Testing fresh concrete - Part 7: Air content – Pressure methods", 2009 (n.d).

[33] ASTM C 597-02, "Standard test method for pulse velocity through concrete"

[34] ASTM C823-00, "Standard Practice for examination and Sampling of Hardened Concrete in Constructions "

