



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



**ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ,
ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ
ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ
ΥΛΙΚΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Δημήτρη Πετράκη

Επιβλέπων:

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

ΕΟΣ ΔΕ 2021/03

Πετράκης Δ. (2021).
Ρεολογικές ιδιότητες, μηχανικά χαρακτηριστικά και θερμική αντίσταση
αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με εναλλακτικά πληρωτικά υλικά
Διπλωματική Εργασία ΕΟΣ ΔΕ 2021/03
Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Petrakis D. (2021).
Rheological properties, mechanical characteristics and thermal resistance of self-
compacted concrete, with alternative fillers
Diploma Thesis ΕΟΣ ΔΕ 2021/03
Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα Σχημάτων – Πινάκων – Εικόνων	iii-iv
Περίληψη	v
Abstract	viii
Ευχαριστίες.....	vii
1 Θεωρητικό μέρος.....	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	1
1.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ΑΣΣ	4
1.2 Συστατικά	6
1.2.1 Είδη και επίδραση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών – κατηγοριοποίηση.....	6
1.2.2 Χημικά πρόσμικτα – Πρόσθετα.....	7
1.3 Μελέτη σύνθεσης.....	9
1.4 Ρεολογικές ιδιότητες και μέθοδοι χαρακτηρισμού.....	21
1.5 Δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών	31
1.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στο ΑΣΣ με εναλλακτικά λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά	38
2 Πειραματικό μέρος.....	45
2.1 Υλικά και Συνθέσεις ΑΣΣ.....	45
2.2 Μέθοδοι και διαδικασίες.....	53
2.2.1 Δοκιμές νοπού ΑΣΣ.....	53
2.2.2 Δοκιμές σκληρυμένου ΑΣΣ.....	56
3 Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	60
3.1 Αποτελέσματα των δοκιμών νοπού ΑΣΣ.....	60
3.2 Αποτελέσματα των δοκιμών σκληρυμένου ΑΣΣ.....	61
4 Συμπεράσματα.....	78
Βιβλιογραφία	79
Παράρτημα Α. Διαγράμματα δοκιμής μέτρου ελαστικότητας	83

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1 Τοποθέτηση ΑΣΣ με αντλία, επιδεικνύοντας τη ρευστότητα του υλικού.....	1
Εικόνα 1.2 Πεζογέφυρα στη Λεωφ. Κηφισιάς από ΑΣΣ (Αρχιτεκτονική Μελέτη: Αλ. Σαμαράς κ Συν., Στατική Μελέτη: Φ. Καρυδάκης)	21
Εικόνα 1.3 Κτίριο One World Trade Center, Νέα Υόρκη.....	31
Εικόνα 1.4 Πύργος Millennium Tower, San Fransisco	38
Εικόνα 1.5 Πύργος Burj Khalifa, Dubai.....	3
Εικόνα 1.6 Το κτίριο της Mori στη Shanghai.....	21
Εικόνα 1.7 Ο πύργος Trump Tower, Chicago	31
Εικόνα 1.8 Φυσαλίδες σε επιφάνεια νωπού ΑΣΣ σε επίπεδο στοιχείο και τα αποτυπώματά τους στην ίδια επιφάνεια μετά το πέρας της πήξης (Peterson, 2008).....	38
Εικόνα 1.9 Τσιμέντο, Ιπτάμενη τέφρα, Πυριτική παιπάλη, Σκωρία υψικαμίνου	7
Εικόνα 1.10 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας αδρανειακής στοιβαξης.....	15
Εικόνα 1.11 Παραδείγματα απόδοσης ΟΔΣ σε εξαπλωμένα δείγματα ΑΣΣ.....	23
Εικόνα 1.12 Εξοπλισμός δοκιμής χοάνης V (V-Funnel)	38
Εικόνα 1.13. Χαρακτηριστικά Δοχείου L, με τις απαιτούμενες διαστάσεις σε mm.....	26
Εικόνα 1.14 Χαρακτηριστικά δοχείου U-Box, δοκιμής U.....	21
Εικόνα 1.15 Εξοπλισμός δοκιμής δακτυλίου J (J-Ring).....	28
Εικόνα 1.16 Τυπικός εξοπλισμός δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης	29
Εικόνα 1.17 Διάταξη συσκευής για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε αέρα του ΑΣΣ με τη μέθοδο της εξισορρόπησης πίεσης.....	31
Εικόνα 1.18 Μηχανική διάταξη προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής.....	21
Εικόνα 1.19 Μορφές αστοχίας κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων έναντι θλίψης.....	31
Εικόνα 1.20 Τυπική διάταξη δοκιμής εφελκυσμού μέσω διάρρηξης.....	38
Εικόνα 1.21 Κατάλληλο συμπιεσόμετρο.....	36
Εικόνα 1.22 Τυπική διάταξη φόρτωσης κεντρικού σημείου σε κάμψη (center-point loading).....	37
Εικόνα 2.1 Ενδεικτικές φωτογραφίες από τη διαδικασία σύνθεσης και ανάμιξης των υλικών του ΑΣΣ όπως πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο.....	51
Εικόνα 2.2 Φωτογραφία των χαλύβδινων μητρών που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την παρούσα εργασία.....	52
Εικόνα 2.3 Δοκίμη ανεμπόδιστης εξαπλωσης των διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ.....	53
Εικόνα 2.4 Ενδεικτική φωτογραφία της δοκιμής χοάνης V	54
Εικόνα 2.5 Ενδεικτικές φωτογραφίες της δοκιμής δοχείου L (L-Box).....	54
Εικόνα 2.6 Ενδεικτικές φωτογραφίες της δοκιμής δακτυλίου J (J-Ring).....	55
Εικόνα 2.7 Ενδεικτική φωτογραφία της δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης (sieve segregation resistance ή sieve stability test).....	55
Εικόνα 2.8 Ενδεικτικές φωτογραφίες της δοκιμής θλιπτικής αντοχής.....	56
Εικόνα 2.9 Ενδεικτική φωτογραφία κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στον κλίβανο.....	57
Εικόνα 2.10 Κυβικά δοκίμια των συνθέσεων MP, CKD και BPD έπειτα από έκθεση σε θερμοκρασία 400°C για 2 ώρες.....	57
Εικόνα 2.11 Ενδεικτική φωτογραφία της δοκιμής εφελκυστικής διάρρηξης (αριστερά) και της δοκιμής μέτρου ελαστικότητας (δεξιά).....	58
Εικόνα 2.12 στιγμιότυπα από το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης της δοκιμής του μέτρου ελαστικότητας.....	58
Εικόνα 2.13 Μέτρηση της συστολής ξήρανσης ενός πρισματικού δοκιμίου.....	59
Εικόνα 2.14 Δοκίμη κάμψης πρισματικού δοκιμίου ηλικίας 90 ημερών.....	59
Εικόνα 3.1 Φωτογραφίες των τριών κυλινδρικών δοκιμίων (α, β, γ) μετά τη δοκιμή διάρρηξης για κάθε σύνθεση (MP, CKD, BPD και EP).....	72

Περιεχόμενα σχημάτων

Σχήμα 1.1 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Edamatsa.....	10
Σχήμα 1.2 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος με τη μέθοδο UCL.....	11
Σχήμα 1.3 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Ghazi.....	12
Σχήμα 1.4 Διάγραμμα ροής της μεθόδου σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ που περιέχει GGBS.....	13
Σχήμα 1.5 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Hwang.....	14
Σχήμα 1.6 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Peterson.....	16
Σχήμα 1.7 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Su.....	18
Σχήμα 1.8 Διάγραμμα ροής για τη διαδικασία σχεδιασμού μίγματος χρησιμοποιώντας ρεολογικά μοντέλα.....	20
Σχήμα 1.9 Εξοπλισμός δοκιμής ανεμπόδιστης εξάπλωσης (Slump flow test)	21
Σχήμα 1.10 Επίδραση του ασβεστολιθικού πληρωτικού στη θλιπτική αντοχή δοκιμίων διαφορετικής ηλικίας.....	38
Σχήμα 1.11 Συστολή ξήρανσης και Παραμόρφωση δοκιμίων μιγμάτων ΑΣΣ με διαφορετική περιεκτικότητα σε σκόνη ασβεστολίθου	39
Σχήμα 1.12 Διαγράμματα ποσοστού εξίδρωσης και απορρόφησης νερού ως προς τους διαφορετικούς τύπους λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών με ποσοστό περιεκτικότητας 10%	39
Σχήμα 1.13 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής ΑΣΣ ως προς τους διαφορετικούς τύπους λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών με ποσοστό περιεκτικότητας 10% και για διαφορετικές ηλικίες δοκιμίων.....	31
Σχήμα 1.14 Επίδραση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών στη θλιπτική αντοχή 28 ημερών.....	41
Σχήμα 1.15 Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής σε θλίψη μιγμάτων που περιέχουν συνδυασμό σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων και ιπτάμενης τέφρας, από δοκίμια διαφορετικών ηλικιών	42
Σχήμα 1.16 Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής σε θλίψη και δοκιμής συρρίκνωσης μιγμάτων που περιέχουν σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων, από δοκίμια διαφορετικών ηλικιών	43
Σχήμα 1.17 Διάγραμμα της συρρίκνωσης δοκιμίων διαφορετικής ηλικίας μιγμάτων ΑΣΣ με διαφορετικό ποσοστό σκόνης αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου ως λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό.....	44
Σχήμα 1.18 Αντίδραση αλκαλίου-πυριτίας μιγμάτων ΑΣΣ με διαφορετικό ποσοστό σκόνης αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (BPD) ως λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό.....	44
Σχήμα 2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των λεπτόκοκκων και των χονδρόκοκκων αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν	46
Σχήμα 2.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση του τσιμέντου και των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών... ..	49
Σχήμα 3.1 Θλιπτική αντοχή ανά ηλικία (7, 28 και 90 ημερών) και ανά σύνθεση.....	63
Σχήμα 3.2 Αναλογία θλιπτικής αντοχής 90 – 28 ημερών.....	64
Σχήμα 3.3 Κλάδοι αποφόρτισης διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων κυλινδρικού δοκιμίου της σύνθεσης αναφοράς ΑΣΣ (MP), για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ)	65
Σχήμα 3.4 Κλάδοι αποφόρτισης διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων κυλινδρικού δοκιμίου της σύνθεσης ΑΣΣ που περιέχει CKD, για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ).....	66
Σχήμα 3.5 Κλάδοι αποφόρτισης διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων κυλινδρικού δοκιμίου της σύνθεσης ΑΣΣ που περιέχει BPD, για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ)	66
Σχήμα 3.6 Κλάδοι αποφόρτισης διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων κυλινδρικού δοκιμίου της σύνθεσης ΑΣΣ που περιέχει EP, για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ).....	67
Σχήμα 3.7 Μέσο μέτρο ελαστικότητας για την κάθε σύνθεση ΑΣΣ	67
Σχήμα 3.8 Θλιπτική αντοχή δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών που εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες 300 °C και 400°C, για κάθε σύνθεση ΑΣΣ.....	68

Σχήμα 3.9 Μέσος όρος της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη όπως υπολογίστηκε για κάθε σύνθεση ΑΣΣ.....	71
Σχήμα 3.10 Διάγραμμα της εξέλιξη της ανηγμένης παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης κάθε σύνθεσης ΑΣΣ για ηλικίες 7, 14, 28 και 90 ημέρες.....	74
Σχήμα 3.11 Ποσοστό απώλειας μάζας των πρισματικών δοκιμίων για κάθε σύνθεση ΑΣΣ.....	75
Σχήμα 3.12 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της καμπτικής αντοχής κάθε σύνθεσης ΑΣΣ.....	38
Σχήμα 3.13 Συσχέτιση συστολής ξήρανσης και απώλειας μάζας δοκιμίων ΑΣΣ για ηλικία 90 ημερών.....	38

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1.1 Κατηγορίες εξάπλωσης σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-8:2010.....	22
Πίνακας 1.2 Κατηγορίες ιξώδους – t_{500} σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-8:2010.....	22
Πίνακας 1.3 Οπτικός Δείκτης Σταθερότητας – Ερμηνεία & Κριτήρια Επιλογής.....	231
Πίνακας 1.4 Κατηγορίες ιξώδους – Χοάνη V σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-9:2010.....	25
Πίνακας 1.5 Κατηγορίες διελευσιμότητας – Δοχείου L σύμφωνα με το EN 12350-10:2010.....	26
Πίνακας 1.6 Δακτύλιος J - κατηγορίες διελευσιμότητας – σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-12:2010.....	28
Πίνακας 1.7 Κατηγορίες αντίστασης σε απόμιξη μέσω κοσκίνισης σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-11:2010.....	30
Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά των αδρανών ανά κοκκομετρία.....	46
Πίνακας 2.2 Χημική ανάλυση (κ.β., %) του τσιμέντου και των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών.....	48
Πίνακας 2.3 Αναλογίες των συστατικών που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε σύνθεση ΑΣΣ.....	21
Πίνακας 3.1 Δοσολογία χημικών πρόσμικτων και αποτελέσματα δοκιμών νοπού ΑΣΣ.....	60
Πίνακας 3.2 Βάρος, θλιπτική αντοχή, μέση θλιπτική αντοχή και τυπική απόκλιση (τ.α.) δοκιμίων ηλικίας 7 ημερών.....	62
Πίνακας 3.3 Βάρος, θλιπτική αντοχή, μέση θλιπτική αντοχή και τυπική απόκλιση (τ.α.) δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών.....	62
Πίνακας 3.4 Βάρος, θλιπτική αντοχή, μέση θλιπτική αντοχή και τυπική απόκλιση (τ.α.) δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών.....	63
Πίνακας 3.5 Αποτελέσματα δοκιμής θλιπτικής αντοχής δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών που εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες 300°C και 400°C, για κάθε σύνθεση ΑΣΣ.....	69
Πίνακας 3.6 Αποτελέσματα μετρήσεων εφελκυσμού διάρρηξης για τρία δοκίμια ηλικίας 90 ημερών για κάθε σύνθεση ΑΣΣ.....	21
Πίνακας 3.7 Τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης των δοκιμίων κάθε σύνθεσης, σε ηλικίες 1, 7, 14, 28 και 90 ημερών.....	74
Πίνακας 3.8 Μετρήσεις απώλειας μάζας για κάθε σύνθεση ΑΣΣ.....	75
Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης δύο πρισματικών δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών για την κάθε σύνθεση ΑΣΣ.....	76

Ρεολογικές ιδιότητες, μηχανικά χαρακτηριστικά και θερμική αντίσταση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με εναλλακτικά πληρωτικά υλικά

Πετράκης Δ. (Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Ε.)

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρασκευή μιγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) με χρήση εναλλακτικών λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών και η μελέτη τους όσον αφορά στη ρεολογία τους, τη μηχανική τους συμπεριφορά και την αντίστασή τους στη θερμική καταπόνηση. Το ΑΣΣ αποτελεί έναν ειδικό τύπο σκυροδέματος με βασικά χαρακτηριστικά την ικανότητα συμπίκνωσης, πλήρωσης και διέλευσης χωρίς τη χρήση μηχανικών μέσων (δόνηση) υπό την επίδραση του ιδίου βάρους του, διαθέτοντας παράλληλα αντίσταση έναντι απόμιξης. Στην εργασία, μετά την παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου ως προς τη μελέτη σύνθεσης του ΑΣΣ, τη χρήση και ενσωμάτωση εναλλακτικών λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών καθώς και τις ειδικές δοκιμές που πραγματοποιούνται στη νωπή του φάση, περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας. Παρασκευάστηκαν τέσσερα μίγματα ΑΣΣ, το ένα εκ των οποίων αποτέλεσε το μίγμα αναφοράς και περιείχε μόνο μαρμαρόσκονη (MP) ενώ στα υπόλοιπα τρία μίγματα αντικαταστάθηκε 50% κ.ο. της περιεχόμενης μαρμαρόσκονης, από σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων (CKD), σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (BPD) και από σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP). Μελετήθηκε η επίδραση του κάθε λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες του ΑΣΣ αλλά και στη θερμική τους απόκριση. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε ότι τα μίγματα που περιείχαν MP και EP παρουσίασαν βελτιωμένη ρεολογική συμπεριφορά σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μίγματα τα οποία περιείχαν CKD και BPD. Όλα τα μίγματα παρουσίασαν αποδεκτές και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε κάθε ηλικία για τις συνθέσεις που περιείχαν BPD και EP, ενώ στις ίδιες συνθέσεις μετρήθηκε η μικρότερη συστολή ξήρανσης και παρατηρήθηκε η βέλτιστη ανταπόκριση έναντι υψηλών θερμοκρασιών. Όλες οι συνθέσεις που περιείχαν λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά BPD, CKD και EP εμφάνισαν υψηλότερη καμπτική αντοχή από τη σύνθεση αναφοράς. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως η σύνθεση με EP είχε την καλύτερη απόδοση κατά την θερμική καταπόνηση.

Λέξεις κλειδιά: αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, πληρωτικά υλικά, μαρμαρόσκονη, CKD, BPD, σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη, ρεολογία, μηχανική συμπεριφορά, θερμική καταπόνηση.

Rheological properties, mechanical characteristics and thermal resistance of self-compacted concrete, with alternative fillers

Petrakis D. (supervised by Badogiannis E.)

Abstract

The subject of this dissertation is the preparation of self-compacting concrete (SCC) using alternative fine-grained fillers and the study in terms of its rheological properties, its mechanical behavior and its resistance to thermal stress. SCC is a special type of concrete with some basic characteristics that make it different from conventional concrete, such as its ability to compact and form under the influence of its own weight, without using mechanical means (vibration) and also its ability to resist to segregation. After the presentation of the theoretical background regarding the study of the composition of SCC, the use and incorporation of alternative fine-grained fillers, as well as the special test carried out in the fresh phase of the concrete, the experimental procedures of this dissertation were followed as described. Four SCC mixtures were composed, one of which was the control mixture that contained only marble powder (MP) while in the remaining three mixtures 50% v/v of MP was replaced with cement kiln dust (CKD), by-pass dust (BPD) and expanded perlite (EP), accordingly. The effect of each fine-grained filler was examined regarding the rheological properties, the mechanical characteristics and the thermal resistance of the SCC. The tests results showed that the mixtures containing MP and EP exhibited improved rheological behavior compared to the corresponding mixtures containing CKD and BPD. All mixtures showed acceptable and satisfactory mechanical properties. In particular, an increase in compressive strength was observed at each age for the compositions containing BPD and EP, while in the same compositions the lowest drying shrinkage was measured and the optimal resistance on high temperatures was observed. All the mixtures containing CKD, BPD and EP exhibited higher flexural strength in comparison with the control mixture. Finally, it should be mentioned that the composition containing EP had the best performance during the thermal resistance tests.

Keywords: Self-compacting concrete, fillers, marble powder, CKD, BPD, EP, rheology, mechanical behavior, thermal resistance.

Ευχαριστίες

Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω εκ βαθέων όλους όσους με βοήθησαν στο συγκεκριμένο έργο. Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Μπαδογιάννη Ε. , Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, που με τις γνώσεις, την καθοδήγηση και το ενδιαφέρον του με βοήθησε σε όλα τα στάδια της εργασίας. Στη συνέχεια, ευχαριστώ θερμά τον κύριο Βουγιούκα Ε. , Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ και τον κύριο Τριανταφύλλου Σ. , Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ για τη συμμετοχή τους στην επιτροπή εξέτασης της παρούσας διπλωματικής. Ακόμα, ευχαριστώ θερμά τον Κουνάδη Α. , Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ και τον Τσιβόλα Κ. , Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ για την βοήθεια τους στην ολοκλήρωση του πειραματικού μέρους της εργασίας καθώς και τον Χατζηρούμπη Δ. που αποτελεί μέλος του προσωπικού του εργαστηρίου. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τις εταιρίες DOMYLCO Construction Chemicals, DIONYSSOMARBLE Group και TITAN ΑΕ για την παροχή υλικών καθώς και την πρόσβαση στον απαραίτητο εξοπλισμό για την εκτέλεση των πειραματικών διαδικασιών. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

1 Θεωρητικό μέρος

1.1 Εισαγωγή

1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Το 1983 στην Ιαπωνία εμφανίστηκε έντονα το πρόβλημα της ανθεκτικότητας των κατασκευών και η αιτία του προβλήματος συνδέθηκε με την ατελή ή η υπερβολική συμπύκνωση του σκυροδέματος λόγω της έλλειψης εξειδικευμένου προσωπικού. Αυτή η σταδιακή μείωση του αριθμού των εξειδικευμένων εργαζομένων στον κατασκευαστικό κλάδο της Ιαπωνίας οδήγησε σε παρόμοια μείωση της ποιότητας των κατασκευαστικών έργων.

Η εταιρία Okamura το 1986 παρουσίασε ως λύση για το προαναφερθέν πρόβλημα το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ) και η πρώτη σύνθεση ολοκληρώθηκε το 1988 χρησιμοποιώντας υλικά που υπήρχαν ήδη στην αγορά. Οι μελέτες για την ανάπτυξη ΑΣΣ συνεχίστηκαν στην Ιαπωνία, συμπεριλαμβανομένης της θεμελιώδους μελέτης πάνω στην εργασιμότητα του σκυροδέματος που διεξήχθη από τους Ozawa και Maekawa στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο (Ozawa 1989, Okamura 1993 & Maekawa 1999) [1].

Στην Ευρώπη το ΑΣΣ πιθανότατα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε δημόσια έργα του δικτύου μεταφοράς της Σουηδίας στα μέσα της δεκαετίας του 1990. Εν συνεχεία, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή χρηματοδότησε ένα πολυεθνικό ερευνητικό έργο πάνω στο ΑΣΣ το οποίο ξεκίνησε το 1997 και ολοκληρώθηκε το 2000 και έκτοτε το ΑΣΣ βρήκε αυξανόμενη χρήση σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες. [2] Μία ενδεικτική τοποθέτηση ΑΣΣ παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.1**.



Εικόνα 1.1 Τοποθέτηση ΑΣΣ με αντλία, επιδεικνύοντας τη ρευστότητα του υλικού

Στην Ελλάδα, η εφαρμογή ΑΣΣ για δομική χρήση άρχισε σταδιακά από το 2008 στην κατασκευή μικρών κτιριακών έργων, ενώ, έκτοτε, έχει εφαρμοσθεί σε μία πεζογέφυρα από εμφανές σκυρόδεμα που βρίσκεται στη Λεωφόρο Κηφισίας στην Αθήνα (**Εικόνα 1.2**), όπου λόγω της μεγάλης πύκνωσης των οπλισμών η συμβατική σκυροδέτηση δεν θα είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα [3].



Εικόνα 1.2 Πεζογέφυρα στη Λεωφ. Κηφισίας από ΑΣΣ (Αρχιτεκτονική Μελέτη: Αλ. Σαμαράς κ Συν., Στατική Μελέτη: Φ. Καρυδάκης).

1.1.2 Πρόσφατες κτιριακές κατασκευές ανα τον κόσμο όπου έγινε χρήση ΑΣΣ:

- Το Κτίριο One World Trade Center στη Νέα Υόρκη, 104 όροφοι, ύψος 89 m, με τοιχία από ΑΣΣ αντοχής 14000 psi (97 MPa) στις 56 ημέρες (**Εικόνα 1.3**).

- Ο πύργος Millennium Tower, το υψηλότερο κτίριο από σκυρόδεμα στο San Francisco (301 Market Str). Ύψος 197 m (58 όροφοι), από ΑΣΣ αντοχής 10000 psi (69 MPa) στους πρώτους 20 ορόφους (**Εικόνα 1.4**).

- Ο πύργος Burj Khalifa (Burj Dubai), στο Dubai, κατασκευάστηκε εξολοκλήρου με ΑΣΣ το 2010 (350.000 m³ από σκυρόδεμα σκυροδετημένο σε νυκτερινές σκυροδετήσεις με χρήση πάγου - βλ. και Τ.Ο. 2, Σκυροδέτηση με υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος) (**Εικόνα 1.5**).

- Το κτίριο της Mori στη Shanghai, Κίνα. Ύψος 492 m. Βραβείο Best Tall Building in the World 2008 του Council on Tall Buildings and Urban Habitat για το έτος 2008 (**Εικόνα 1.6**).

- Ο πύργος Trump Tower Chicago (2009). Ύψος 423 m (98 όροφοι). Η γενική κοιτόστρωση (3500 m³) έγινε σε μία συνεχόμενη σκυροδέτηση με ΑΣΣ, διάρκειας 22 ωρών. Το ΑΣΣ είχε αντοχή 83 MPa στις 56 ημέρες (**Εικόνα 1.7**) [3].



Εικόνα 1.3 Κτίριο One World Trade Center,
Νέα Υόρκη



Εικόνα 1.4 Πύργος Millennium Tower,
San Francisco



Εικόνα 1.5 Πύργος Burj Khalifa, Dubai.



Εικόνα 1.6 Το κτίριο της Mori στη Shanghai.



Εικόνα 1.7 Ο πύργος Trump Tower Chicago

1.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ΑΣΣ

Η υψηλή ρευστότητα του σε συνδυασμό με το σχετικά υψηλό ιξώδες του προσφέρουν στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα τρεις βασικές ιδιότητες που το κάνουν να ξεχωρίζει από το συμβατικό σκυρόδεμα: [2]

1. *Ικανότητα πλήρωσης*: Η ικανότητα του να ρέει στον ξυλότυπο και να συμπυκνώνεται κάτω από το βάρος του, χωρίς να χρειάζεται μηχανικά μέσα (δόνηση).
2. *Ικανότητα διέλευσης*: Η ικανότητα του να ρέει μέσα και γύρω από περιορισμένους χώρους μεταξύ χαλύβδινων ράβδων οπλισμού χωρίς να απομεινύεται ή να παρατηρούνται φαινόμενα συσσώρευσης και μπλοκαρίσματος χοντρών αδρανών (blocking).
3. *Αντίσταση έναντι απόμιξης*: Η ικανότητα του να παραμένει ομοιογενές κατά την μεταφορά, τοποθέτηση και μετά το τέλος της τοποθέτησης [5].

Επιπλέον, το ΑΣΣ προσφέρει βελτιωμένη διεπιφάνεια μεταξύ πάστας τσιμέντου και αδρανών και διευκολύνει την εφαρμογή, εξασφαλίζοντας καλύτερη δομή και αντοχή σκυροδέματος [2-5].

Η εξάλειψη δε του δονητικού εξοπλισμού έχει ως πρωτεύων αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου κατασκευής και του κόστους εργασίας του έργου και ως εκ τούτου την υψηλότερη παραγωγικότητα των εργαζομένων και ως δευτερεύων αποτέλεσμα τη μείωση της ηχορρύπανσης και της έκθεσης των εργαζομένων σε θορύβους και κραδασμούς, βελτιώνοντας έτσι τον περιβάλλοντα χώρο του έργου.

Η βελτιωμένη κατασκευαστική πρακτική και η απόδοση των κατασκευών, σε συνδυασμό με τα οφέλη για την υγεία και την ασφάλεια, καθιστούν το ΑΣΣ μια πολύ ελκυστική λύση για κατασκευές από σκυρόδεμα συνεισφέροντας παράλληλα στη βιώσιμη και στην «πράσινη» ανάπτυξη. [2]

Παρ' όλ' αυτά, το ΑΣΣ δεν έχει μόνο πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Για παράδειγμα, η αυξημένη ρευστότητα του ΑΣΣ δύναται να προκαλέσει δυσμενή αποτελέσματα όταν οι χρησιμοποιούμενοι τύποι παρουσιάζουν κακοτεχνίες (π.χ. διαρροές στη συναρμογή των ξυλοτύπων) ή όταν δεν έχουν διαστασιολογηθεί κατάλληλα ώστε να δύνανται να φέρουν με ασφάλεια τις εσωτερικές πλευρικές πιέσεις λόγω υψηλού ρυθμού σκυροδέτησης (σε κατακόρυφα στοιχεία). Κάτι τέτοιο δε συνεπάγεται ότι το ΑΣΣ μειονεκτεί ως προς την ευχέρεια σκυροδέτησης αλλά ότι οι συναφείς με τη σκυροδέτηση εργασίες πρέπει να πληρούν υψηλά κριτήρια ποιότητας. Επίσης, το ΑΣΣ αποκτά σε κάποιο βαθμό, τις γνωστές από το συμβατικό σκυρόδεμα ευαισθησίες όσον αφορά στην εξάρτηση της ποιότητας των επιφανειών από πλείστους παράγοντες, όπως το υλικό των ξυλοτύπων (π.χ. μερικώς, ή καθόλου απορροφητικοί), τα λιπαντικά προϊόντα του ξυλοτύπου ή τον ρυθμό σκυροδέτησης. Η εμπειρία έχει δείξει ότι η επιλογή των καταλληλότερων εργαλείων και μεθόδων για μία συγκεκριμένη σύνθεση ΑΣΣ είναι δυνατή μόνο έπειτα από δοκιμές πεδίου. Τέλος, ορισμένα από τα χρησιμοποιούμενα λιπαντικά των τύπων έχουν επιβραδυντική δράση για την ενυδάτωση του τσιμέντου πλησίον του τύπου και, επομένως, περισσότερο νερό εξίδρωσης δύναται να κινηθεί καθ' ύψος του καλουπιού (από τον πυθμένα του στοιχείου προς τα επάνω) και να προκαλέσει αποχρωματισμούς αλλά και μειωμένη ανθεκτικότητα (**Εικόνα 1.8**) [3].



Εικόνα 1.8 Φυσαλίδες σε επιφάνεια νοπού ΑΣΣ σε επίπεδο στοιχείο και τα αποτυπώματά τους στην ίδια επιφάνεια μετά το πέρας της πήξης (Peterson, 2008).

1.2 Συστατικά

1.2.1 Είδη και επίδραση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών – κατηγοριοποίηση

Σημαντικό αντικείμενο επιστημονικής έρευνας είναι η επιλογή του τύπου του λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί στη σύνθεση του ΑΣΣ, με κρίσιμες παραμέτρους το μέγεθος, το σχήμα και τη χημική σύνθεση. Όλο και περισσότερες ερευνητικές ομάδες προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν βιομηχανικά παραπροϊόντα ως λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά όπως υλικά που θα μπορούσαν να είναι δυνητικοί ρύποι του αέρα ή του εδάφους προκειμένου να συμβάλουν στη βιωσιμότητα του πλανήτη και στις «πράσινες» κατασκευές [9,10].

Λόγω των ειδικών ρεολογικών απαιτήσεων του ΑΣΣ, χρησιμοποιούνται συνήθως αδρανή και χρωστικά πρόσθετα για τη βελτίωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος, καθώς και για τη ρύθμιση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και τη μείωση της εκλυόμενης θερμότητας κατά την ενυδάτωση [6].

Σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC, τα λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά ταξινομούνται σε 2 τύπους:

Τύπος I (ημί-αδρανή/semi-inert)

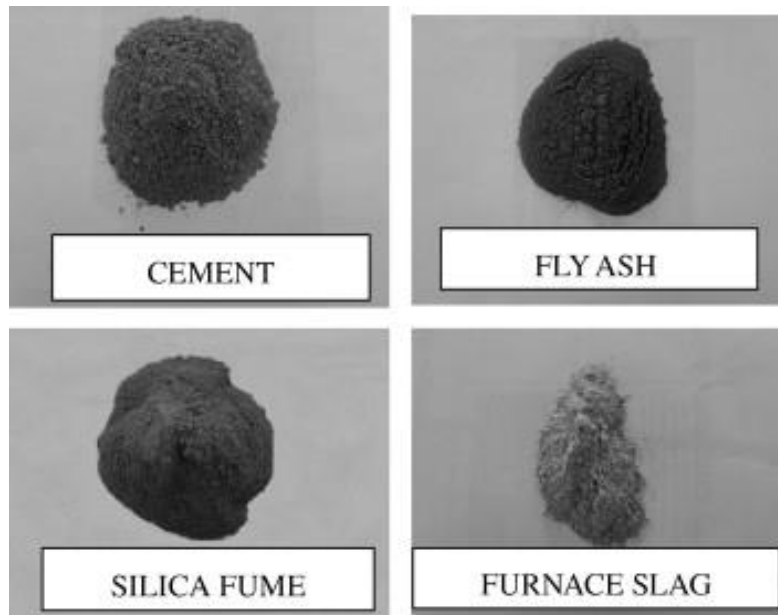
Στον οποίο συμπεριλαμβάνονται αδρανή πληρωτικά υλικά όπως για παράδειγμα σκόνη ασβεστόλιθου, δολομίτη ή γρανίτη σύμφωνα με το πρότυπο EN 12620 ή χρωστικές ουσίες σύμφωνα με το πρότυπο EN 12878.

Τύπος II (ποζολανικά ή δευτερεύοντα υδραυλικά)

Στον οποίο συμπεριλαμβάνονται:

- *Ιπτάμενη τέφρα* σύμφωνα με το πρότυπο EN 450. Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα λεπτόκοκκο ανόργανο υλικό με ποζολανικές ιδιότητες, το οποίο μπορεί να προστεθεί στο ΑΣΣ βελτιώνοντας τις ιδιότητες του. Παρ' όλ' αυτά η σταθερότητα του ΑΣΣ μπορεί να επηρεαστεί και απαιτείται να γίνουν συγκεκριμένες δοκιμές.
- *Πυριτική παιπάλη* σύμφωνα με το πρότυπο prEN 13263, ο οποίος βελτιώνει κατά πολύ τις ρεολογικές και τις μηχανικές ιδιότητες καθώς και την ανθεκτικότητα του.
- *Σκωρία υψικαμίνου* σύμφωνα με το πρότυπο BS 6699 [13-17], η οποία είναι μια λεπτόκοκκη κοκκώδης με υδραυλική δράση κονία που προστιθέμενη στο ΑΣΣ βελτιώνει τις ρεολογικές ιδιότητες.

Τα παραπάνω λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά παρουσιάζονται συγκριτικά με το τσιμέντο στην **Εικόνα 1.9**.



Εικόνα 1.9 Τσιμέντο, Ιπτάμενη τέφρα, Πυρρική παιπάλη, Σκωρία υψικαμίνου

Τα λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά τύπου II είναι ικανά – εκτός από το να αναβαθμίσουν τις ρεολογικές ιδιότητες του ΑΣΣ – να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες, την ανθεκτικότητα και τη μακροπρόθεσμη απόδοση του σκυροδέματος, όχι μόνο λόγω της πυκνότερης δομής της πάστας αλλά και λόγω της υδραυλικής ή ποζολανικής δραστηριότητας και συμμετοχής τους στις αντιδράσεις ενυδάτωσης [2]. Τέλος, τα λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά τύπου I και τύπου II προστίθενται στη σύνθεση προκειμένου να μειωθεί το φαινόμενο της απόμιξης καθώς και για να βελτιωθεί η μικροδομή του σκυροδέματος, βελτιστοποιώντας τη στοίβαξη του σκελετού των ξηρών συστατικών [7-9].

1.2.2 Χημικά πρόσμικτα

Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω βελτιωμένες ρεολογικές ιδιότητες χωρίς την εμφάνιση του φαινομένου απόμιξης του σκυροδέματος, απαιτούνται συγκεκριμένες τροποποιήσεις στη διαδικασία σχεδιασμού μίγματος της σύνθεσης του ΑΣΣ σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα [5,11]. Οι κύριες αλλαγές που έγιναν ευρέως αποδεκτές από την ερευνητική κοινότητα αφορούν το σχεδιασμό μίγματος του ΑΣΣ και σχετίζονται με την προσθήκη λεπτόκοκκων υλικών πλήρωσης, όπως αναφέραμε παραπάνω, και σύγχρονων ενεργών χημικών πρόσμικτων σε κατάλληλες αναλογίες.

Τα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον είναι οι υπερρρευστοποιητές και τα χημικά πρόσθετα τροποποίησης του ιξώδους (ρυθμιστές ιξώδους, VMA)

Υπερρρευστοποιητές

Οι υπερρρευστοποιητές είναι πολυμερή που προστίθενται στο σκυρόδεμα, αυξάνουν τη ρευστότητα στη νωπή φάση του χωρίς να επηρεάζεται η συμπεριφορά πήξης και σκλήρυνσης του σκυροδέματος. Ο υπερρρευστοποιητής που θα επιλεγεί για τη μίξη θα πρέπει να είναι συμβατός με το τσιμέντο, χωρίς να αυξάνει την περιεκτικότητα σε αέρα του ΑΣΣ. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των υπερρρευστοποιητών είναι ότι προκαλούν μείωση των συνολικών επιφανειών κενού αέρα και προσδίδουν στο μίγμα υψηλή ρευστότητα και μειωμένη τάση διαρροής.

Δοκιμές που έγιναν με υπερρρευστοποιητές νέας γενιάς έδειξαν πως παγιδεύουν μεγάλο ποσοστό περιεχόμενου αέρα που παραμένει στον όγκο του νωπού μίγματος, αλλά δεν επηρέασε δραστικά τα αποδεκτά τεχνικά κριτήρια του ΑΣΣ. Οι υπερρρευστοποιητές πολυκαρβοξυλικής βάσης ευθύνονται συνήθως για το φαινόμενο εγκλωβισμού αέρα στο μίγμα, καθώς παρατηρείται ότι οι πόροι του αέρα έχουν μικρότερο διάμετρο σε σύγκριση με τους πόρους αέρα από δοκιμές με υπερρρευστοποιητές λιγосуλφονικής βάσης ή ναφθελινικής βάσης. Στο σκληρωμένο σκυρόδεμα έχει καταγραφεί ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα, έως και 8%, ως παρενέργεια της χρήσης υπερρρευστοποιητών [12].

Ρυθμιστές ιξώδους

Οι ρυθμιστές ιξώδους είναι υδατοδιαλυτά πολυμερή που αυξάνουν το ιξώδες του μίγματος και ενισχύουν την ικανότητα της τσιμεντόπαστας να διατηρεί τα συστατικά της σε μορφή αιωρήματος. Επιπλέον, οι ρυθμιστές ιξώδους χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της στιβαρότητας του ΑΣΣ.

Οι κοινώς χρησιμοποιούμενοι ρυθμιστές ιξώδους περιλαμβάνουν πολυσακχαρίτες μικροβιακών ή αμυλούχων πηγών, παράγωγα κυτταρίνης και πολυμερή ακρυλικής βάσης [13].

Η χρήση ενός ρυθμιστή ιξώδους σε συνδυασμό με έναν υπερρρευστοποιητή μπορεί να εξασφαλίσει υψηλή παραμορφωσιμότητα και επαρκή εργασιμότητα του μίγματος οδηγώντας σε καλύτερη αντίσταση στην απόμιξη του σκυροδέματος [12].

Επίσης, υπάρχει και μία τρίτη κατηγορία χημικών πρόσμικτων τα οποία ονομάζονται αερακτικά πρόσμικτα και χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή αέρα στο σκυρόδεμα προσδίδοντας του αυξημένη αντίσταση σε κύκλους ψύξης και απόψυξης. Εκτός αυτού, τα αερακτικά πρόσμικτα προσδίδουν αυξημένη ρευστότητα στο μίγμα, υψηλότερη πλαστικότητα καθώς και μεγαλύτερη αντοχή στην εξίδρωση. Τα παραπάνω αερακτικά πρόσμικτα βρίσκουν χρησιμότητα σε συνθέσεις ΑΣΣ κυρίως σε έργα χωρών που επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες και ακραίες καιρικές συνθήκες [7].

1.3 Μελέτη σύνθεσης

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ οι οποίες με βάση τις αρχές σχεδιασμού μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε κατηγορίες:

- i. *Εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού*
- ii. *Μέθοδοι βασισμένες στη θλιπτική αντοχή*
- iii. *Μέθοδοι βασισμένες στη βέλτιστη πυκνότητα στοίβαξης*
- iv. *Μέθοδοι βασισμένες σε στατιστικό παραγοντικό μοντέλο*
- v. *Μέθοδοι βασισμένες σε μοντέλο της ρεολογίας της πάστας*

- i. *Εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού*

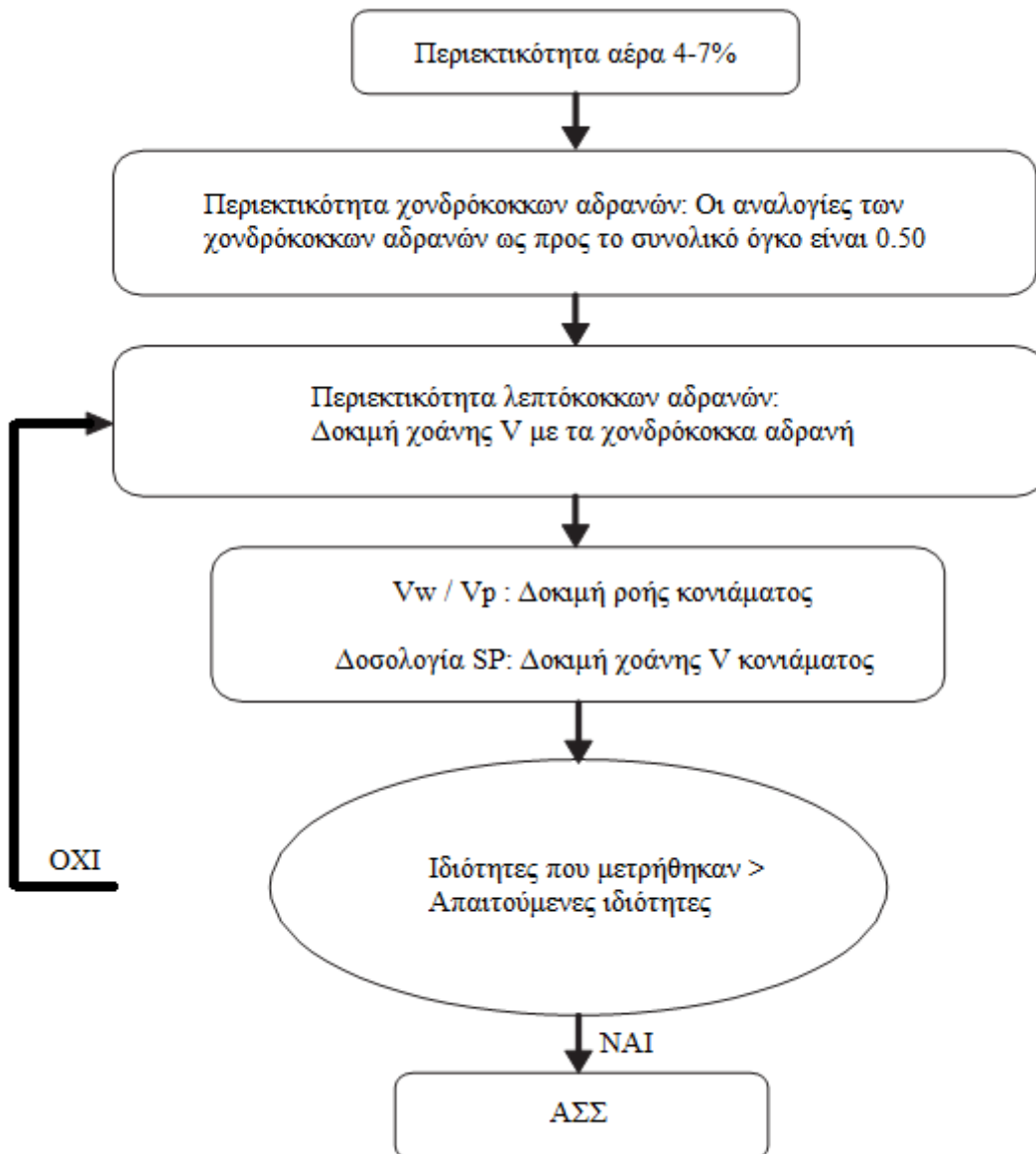
Η μέθοδος του εμπειρικού σχεδιασμού βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα που περιλαμβάνουν την περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή, νερό, τσιμέντο και τη δοσολογία του υπερρευστοποιητή για τον προσδιορισμό της αρχικής αναλογίας του μίγματος. Όπως υποδηλώνει και το όνομα της μεθόδου, πραγματοποιούνται αρκετές δοκιμές μιγμάτων και προσαρμόζονται κατάλληλα σε κάθε διαδοχική δοκιμή οι αναλογίες των υλικών ώστε να βρεθεί το βέλτιστο μίγμα ΑΣΣ.

Οι Okamura et al. βασισμένοι σε εμπειρικές δοκιμές πρότειναν τη μέθοδο με τα εξής χαρακτηριστικά:

- 50% χονδρόκοκκα αδρανή
- 40% λεπτόκοκκα αδρανή
- Αναλογία νερού/λεπτά 0.9 με 1.0, κατ' όγκο
- Κατάλληλη δοσολογία του υπερρευστοποιητή, που εξασφαλίζει την αυτοσυμπύκνωση

Η παραπάνω προσέγγιση είναι πολύ εύκολο να ακολουθηθεί αλλά δεν περιλαμβάνει παραμέτρους σχετικά με τις ιδιότητες των αδρανών και προκειμένου το ΑΣΣ να αποκτήσει υψηλότερη εργασιμότητα και ιξώδες απαιτείται υψηλότερη δοσολογία υπερρευστοποιητή η οποία μπορεί να οδηγήσει σε επιβράδυνση του ρυθμού πήξης του σκυροδέματος και σε ταυτόχρονη αύξηση του κόστους.

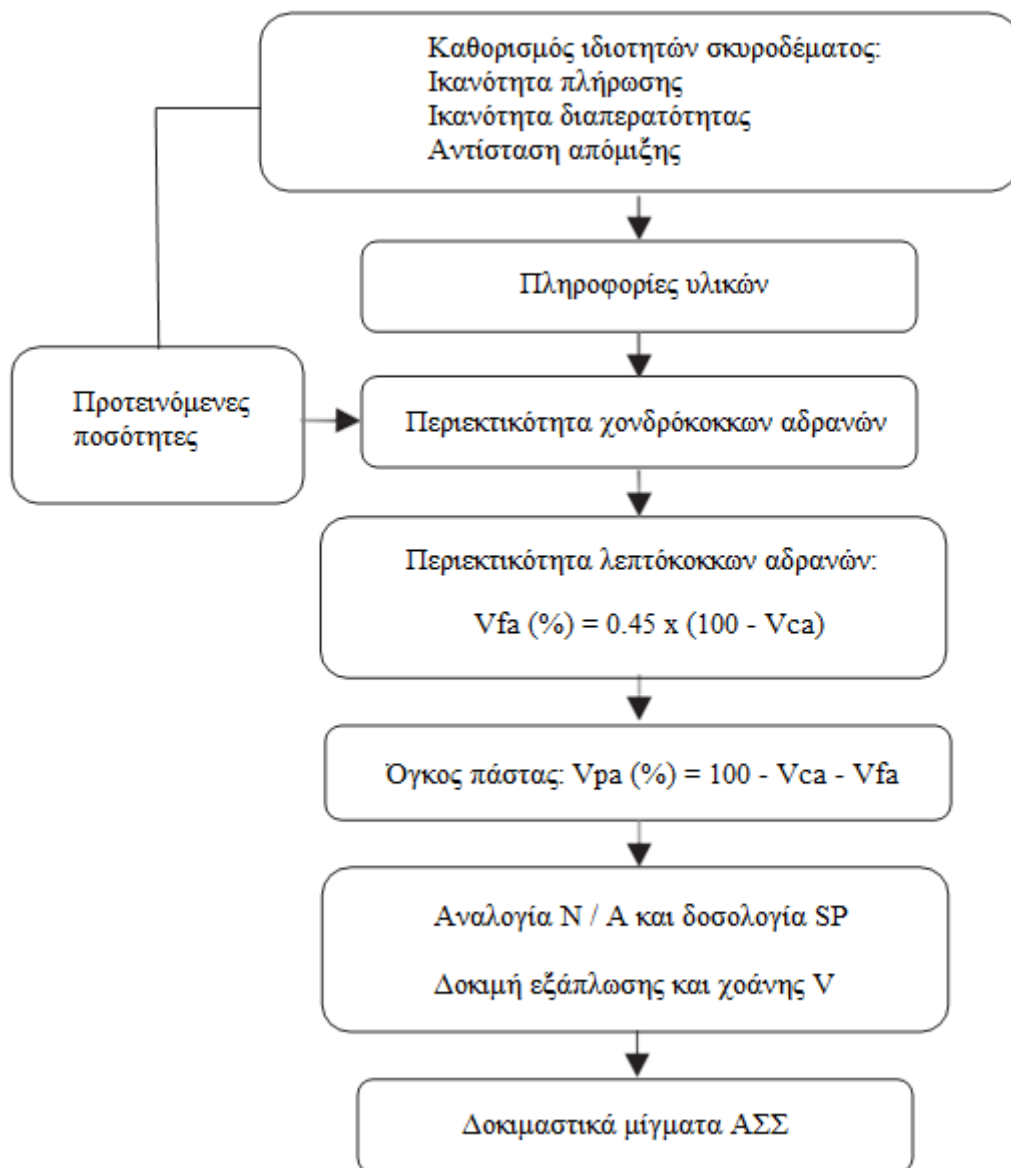
Ο Edamatsa βελτίωσε τη μέθοδο του Okamura διορθώνοντας τις αναλογίες των λεπτόκοκκων αδρανών, την αναλογία νερού/λεπτά και τη δοσολογία του υπερρευστοποιητή. Σε σύγκριση με την προσέγγιση του Okamura αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με υλικά και αδρανή ποικίλης ποιότητας. Ένα διάγραμμα ροής της διαδικασίας σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Edamatsa παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.1** [5].



Σχήμα 1.1 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Edamatsa

Οι Khaleel et al. πρότειναν μια μέθοδο σχεδιασμού που ήταν παρόμοια με αυτή του Edamatsa και αφορούσε ΑΣΣ που περιέχει μετακαολίνη ως λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό. Από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε πως αυτή η μέθοδος ήταν καλή στην παραγωγή ΑΣΣ όταν το μίγμα περιέχει χονδρόκοκκα αδρανή διαφορετικών ιδιοτήτων. Επίσης, η χρήση μετακαολίνη στη μέθοδο σύνθεσης είναι μία πολύ καλή επιλογή καθώς και ενισχύει τις ιδιότητες του ΑΣΣ.

Οι Domone et al. πρότειναν επίσης μία μέθοδο βασισμένη στην εμπειρία και κατανόηση της συμπεριφοράς του ΑΣΣ που ονομάζεται μέθοδος UCL (Σχήμα 1.2). Η μέθοδος εκτιμά τις αναλογίες για ένα σύνολο απαιτούμενων ιδιοτήτων και στη συνέχεια προσαρμόζεται με δοκιμαστικά μίγματα. Προσδιορίζεται η αναλογία νερού/αδρανών και η δοσολογία του υπερρευστοποιητή χρησιμοποιώντας τη δοκιμή χοάνης V για το κλάσμα του σκυροδέματος που αντιστοιχεί στο κονίαμα (<4 mm). Σε αυτή τη μέθοδο χρειάζονται μόνο τυπικές δοκιμές για το νωπό σκυρόδεμα και αποφεύγονται περίπλοκες δοκιμές όπως η ρεολογική συμπεριφορά κονιάματος ή σκυροδέματος [5].



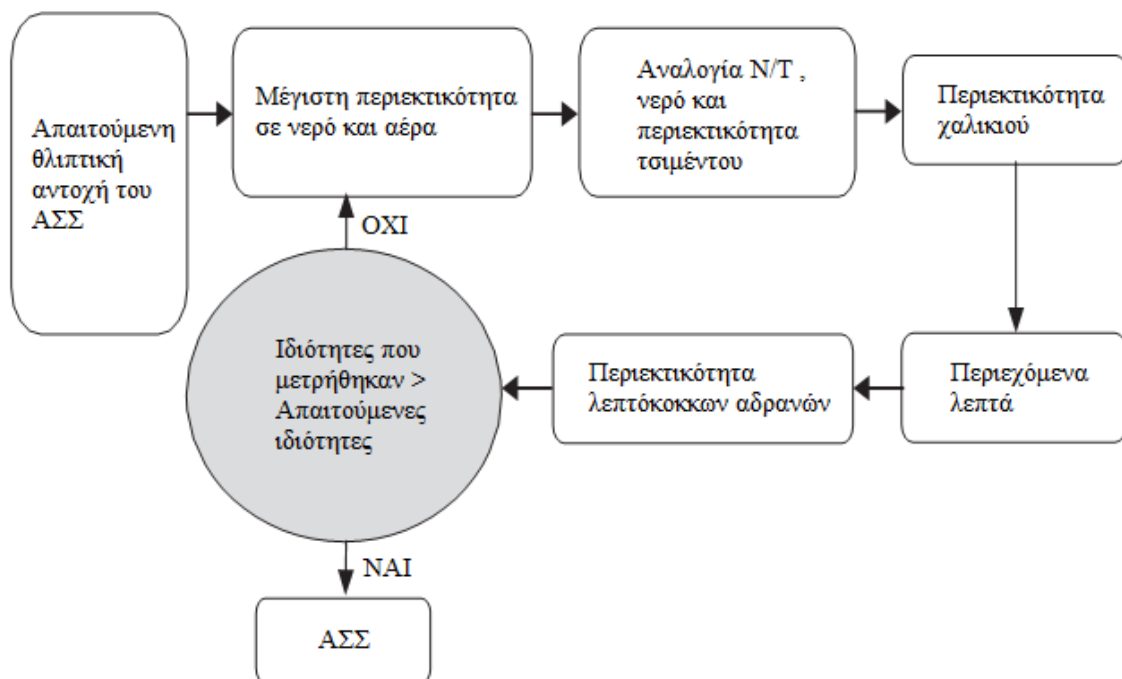
Σχήμα 1.2 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος με τη μέθοδο UCL

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της εμπειρικής μεθόδου σχεδιασμού είναι η απλότητά της. Ωστόσο, απαιτούνται εντατικές εργαστηριακές δοκιμές με επαναλαμβανόμενες προσαρμογές των αναλογιών των υλικών ώστε να επιτευχθεί ένα μίγμα ΑΣΣ με τις απαιτούμενες ιδιότητες [5].

ii. Μέθοδοι αντοχής σε θλίψη

Αυτή η μέθοδος καθορίζει τις περιεκτικότητες του ΑΣΣ σε τσιμέντο, πρόσθετα και αδρανή με βάση την απαιτούμενη θλιπτική αντοχή.

Οι Ghazi et al. πρότειναν μία σχετικά απλή μέθοδο όπου η περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα αδρανή εξαρτάται από το μέγιστο μέγεθος αδρανών και η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αδρανή εξαρτάται από το μέτρο λεπτότητας. Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε νερό καθώς και οι αναλογίες Νερό/Τσιμέντο και Νερό/Αδρανή προσδιορίστηκαν βάσει του μέγιστου μεγέθους αδρανών και της απαιτούμενης θλιπτικής αντοχής του ΑΣΣ. Ένα διάγραμμα ροής της διαδικασίας σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Ghazi παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.3** [5].



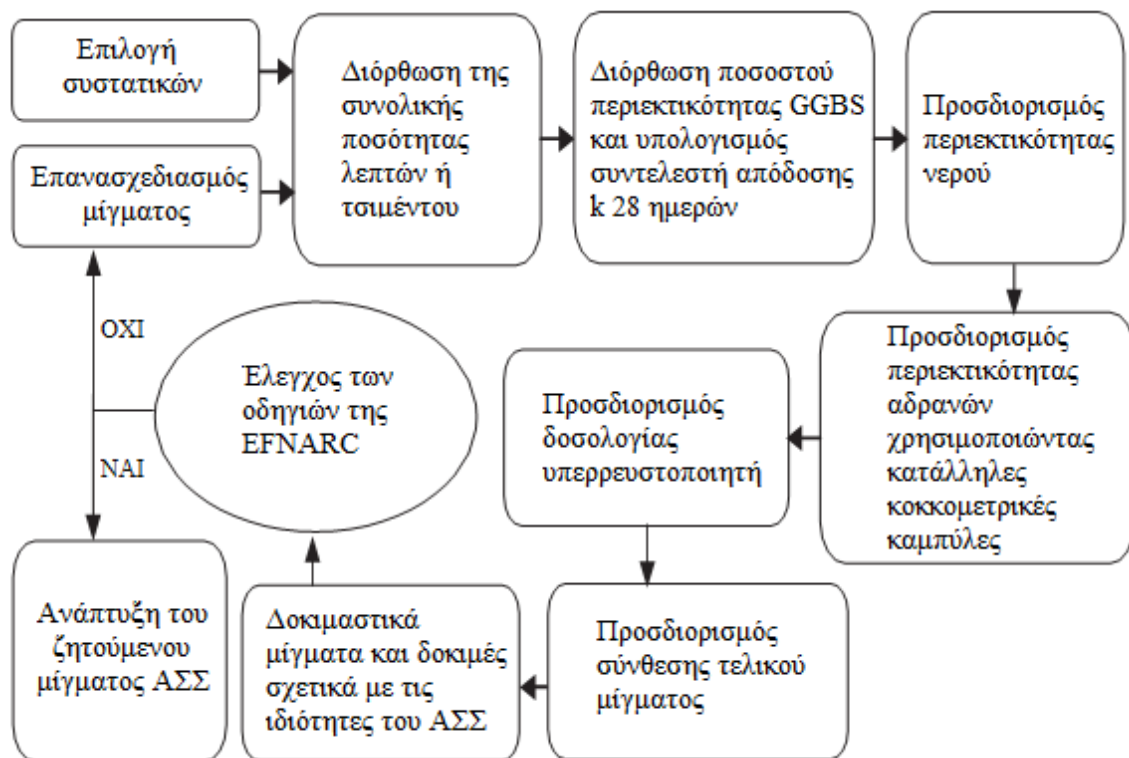
Σχήμα 1.3 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Ghazi

Οι Dinakar et al. πρότειναν μία μέθοδο σχεδιασμού ΑΣΣ η οποία περιέχει σκωρία υψικαμίνου (GGBS) και χρησιμοποιεί ένα συντελεστή απόδοσης k . Η μέθοδος αποτελείται από πέντε βήματα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.4**. Στο πρώτο βήμα υπολογίζεται η συνολική ποσότητα σε λεπτά και το ποσοστό της σκωρίας βάσει της απαιτούμενης θλιπτικής αντοχής. Στο δεύτερο βήμα υπολογίζεται ο συντελεστής απόδοσης k βάσει της εξίσωσης (1.1) :

$$k = 0.000009468p^2 - 0.0168p + 1.44 \quad (1.1)$$

όπου p: το ποσοστό περιεκτικότητας σκωρίας υψικαμίνου (GGBS).

Στο τρίτο βήμα καθορίζεται η περιεκτικότητα σε νερό και προσδιορίζεται η περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή βάσει κατάλληλων κοκκομετρικών καμπυλών του προτύπου DIN. Στο τελευταίο βήμα μετρίεται η ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης του μίγματος με τη δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης και τη δοκιμή χοάνης V και η ικανότητα διαπερατότητα του μίγματος με τη δοκιμή δοχείου L [5].



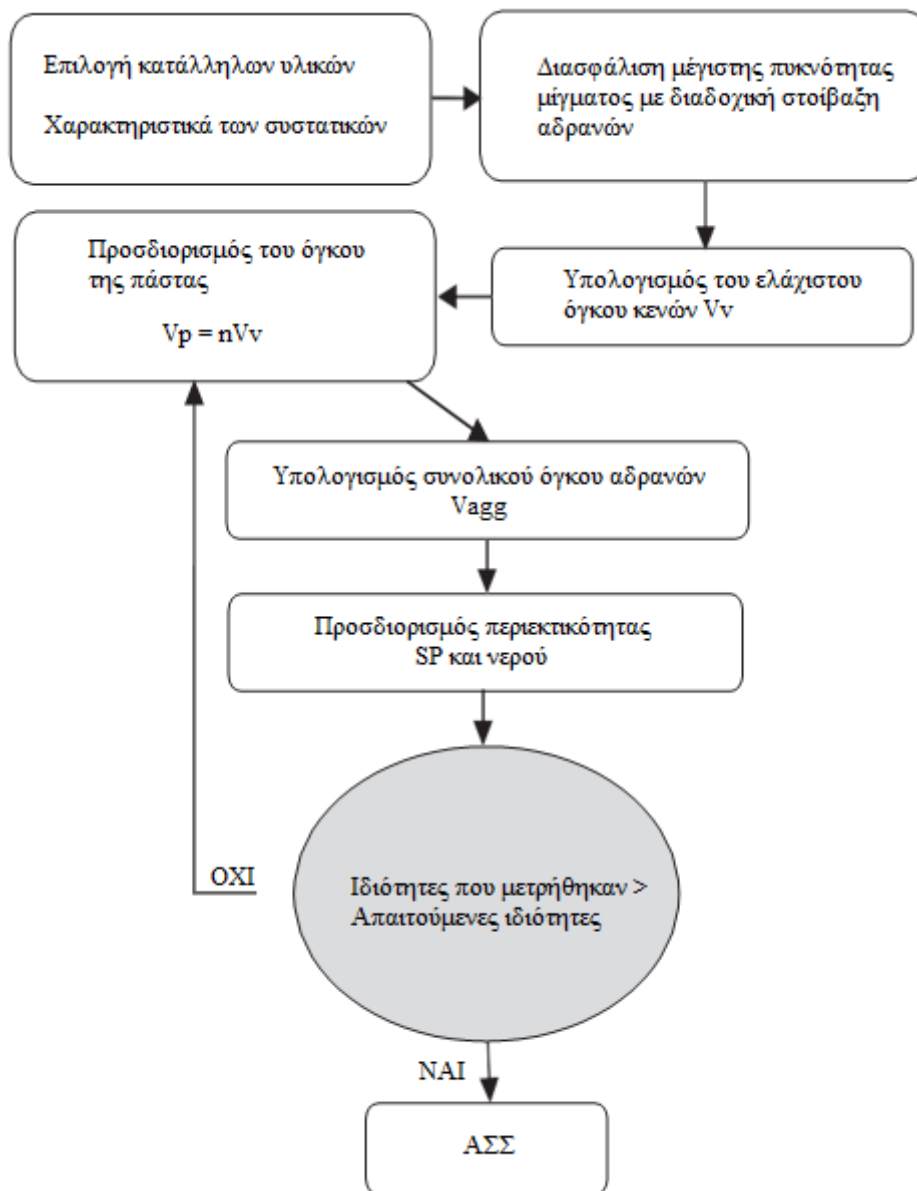
Σχήμα 1.4 Διάγραμμα ροής της μεθόδου σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ που περιέχει GGBS

Η μέθοδος σχεδιασμού με βάση τη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ παρουσιάζει μία σαφή και ακριβή διαδικασία για την επιλογή συγκεκριμένων ποσοτήτων συστατικών και ελαχιστοποιεί την ανάγκη για δοκιμαστικά μίγματα. Ωστόσο, το μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως απαιτεί προσαρμογές σε όλα τις τα συστατικά (λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή, νερό, υπερρρευστοποιητές) για να επιτευχθεί μια βέλτιστη αναλογία μίγματος [5].

iii. Μέθοδοι βασισμένες στη βέλτιστη πυκνότητα στοιβαξης

Αυτή η κατηγορία μεθόδου σχεδιασμού καθορίζει τις αναλογίες των συστατικών του μίγματος υπολογίζοντας το ελάχιστο κενό μεταξύ των αδρανών βασιζόμενο σε μοντέλα στοιβαξης και στη συνέχεια γεμίζει τα κενά με την ενσωμάτωση της τσιμεντόπαστας.

Οι Hwang et al. πρότειναν μία μέθοδο βασισμένη στον αλγόριθμο Densified Mixture Design Algorithm (DMDA) ο οποίος προήλθε από τη θεωρία μέγιστης πυκνότητας και τη θεωρία περί υπερβολικής πάστας και ήταν η έννοια σχεδιασμού που βοήθησε στο να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση της περιεκτικότητας σε νερό και τσιμέντο με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας για την πλήρωση των κενών (Σχήμα 1.5) [5].



Σχήμα 1.5 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Hwang

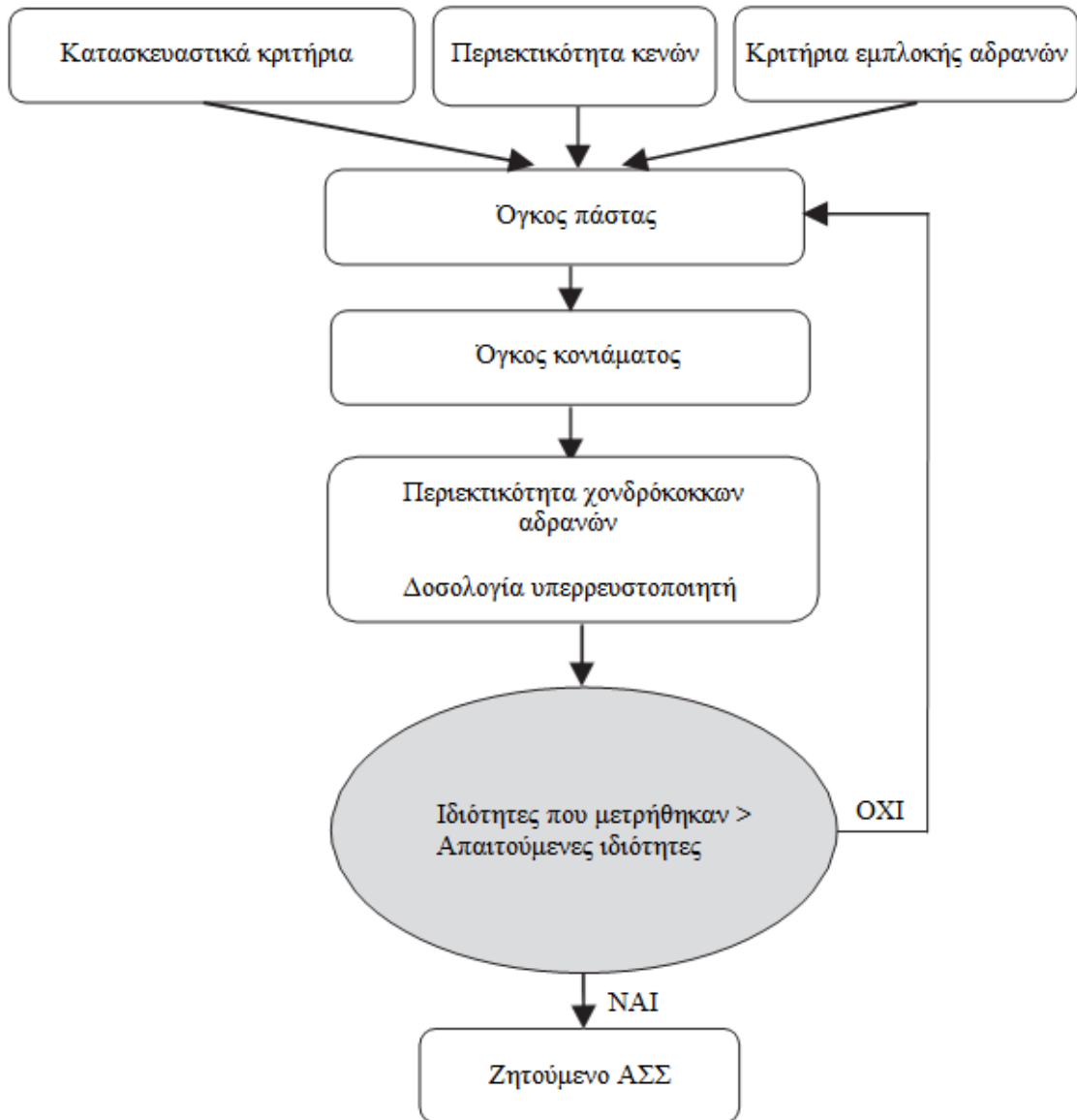
Στη μελέτη του Hwang διερευνήθηκαν οι επιδράσεις τριών μοντέλων στοίβαξης (primitive, dense, gap gradation) μεταξύ των αδρανών και του τσιμέντου. Στον αρχικό τύπο στοίβαξης χρησιμοποιήθηκε άμμος για να καλυφθεί το κενό μεταξύ των χονδρόκοκων αδρανών και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα για να καλυφθούν τα υπολειπόμενα κενά μεταξύ των αδρανών όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.10**. Στον τύπο πυκνής στοίβαξης χρησιμοποιήθηκαν τα τυπικά κόσκινα των 3/8 με αριθμούς 4, 8, 16, 30 και 50 για να χωριστούν τα αδρανή σε διαφορετικά μεγέθη κόκκων και στη συνέχεια ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με αυτή του πρώτου τύπου στοίβαξης με διαδοχική πλήρωση των αδρανών από το κόσκινο 3/8 έως το 50 και τέλος πλήρωση των υπολειπόμενων κενών με ιπτάμενη τέφρα [5].



Εικόνα 1.10 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας αδρανειακής στοίβαξης

Το ΑΣΣ που σχεδιάστηκε με τη μέθοδο που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο DMDA έχει υψηλή ρευστότητα και απόδοση, είναι οικονομικό και ανθεκτικό. Προσφέρει λύση σε προβλήματα όπως το μέγεθος των κόκκων των αδρανών, η κατανομή των σωματιδίων, η διαβάθμιση των αδρανών και η μεγάλη ποσότητα τσιμέντου που προκύπτουν από τη χρήση άλλων μεθόδων. Ωστόσο, υπάρχουν πολύ λίγες πληροφορίες όσον αφορά στην ικανότητα διέλευσης του ΑΣΣ μεταξύ των οπλισμών ενίσχυσης καθώς και για την αντίσταση απόμειξης του ΑΣΣ.

Οι Petersson et al. πρότειναν μία μέθοδο σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ που λαμβάνει υπόψη έναν δείκτη εμπλοκής αδρανών και τη σχέση μεταξύ της απόστασης των ράβδων οπλισμού με το μέγεθος των αδρανών. Αυτή η μέθοδος (**Σχήμα 1.6**) θεωρεί το σκυρόδεμα ως μία στερεή μάζα αδρανών που βρίσκεται μέσα σε μία υγρή πάστα που σχηματίζεται από λεπτά (τσιμέντο και λοιπά υλικά διαμέτρου κόκκου < 125 μm), νερό και χημικά πρόσμικτα. Η πάστα γεμίζει τα κενά που βρίσκονται στο σκελετό των αδρανών και προσφέρει λίπανση γύρω από κάθε σωματίδιο [5].



Σχήμα 1.6 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τον Peterson

Πρόκειται για μια αξιοσημείωτη μέθοδο, που όμως δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη στην πράξη. Επιτρέπει το σχεδιασμό μιγμάτων για μια συγκεκριμένη απόσταση οπλισμών/ράβδων ενίσχυσης προσφέροντας επαρκή λίπανση μεταξύ των αδρανών. Ωστόσο, δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία που να εξετάζουν την ομοιομορφία του μίγματος.

Οι Su et al. πρότειναν μία μέθοδο σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ της οποίας η κύρια θεώρηση είναι η πλήρωση των κενών μεταξύ των διαφορετικών κλασμάτων αδρανών με τσιμεντόπαστα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί έναν συντελεστή στοιβαξης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος μάζας των αδρανών που έχουν συμπυκνωθεί σε έναν όγκο προς τη μάζα των αδρανών που έχουν τοποθετηθεί στον ίδιο όγκο χωρίς συμπύκνωση. Έτσι η περιεκτικότητα του ΑΣΣ σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή υπολογίζεται με τους παρακάτω τύπους (1.2 και 1.3) :

$$W_{\sigma} = PF \times W_{\sigma L} \times (1 - S/a) \quad (1.2)$$

$$W_s = PF \times W_{sL} \times S/a \quad (1.3)$$

W_{σ} : η περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα αδρανή του ΑΣΣ

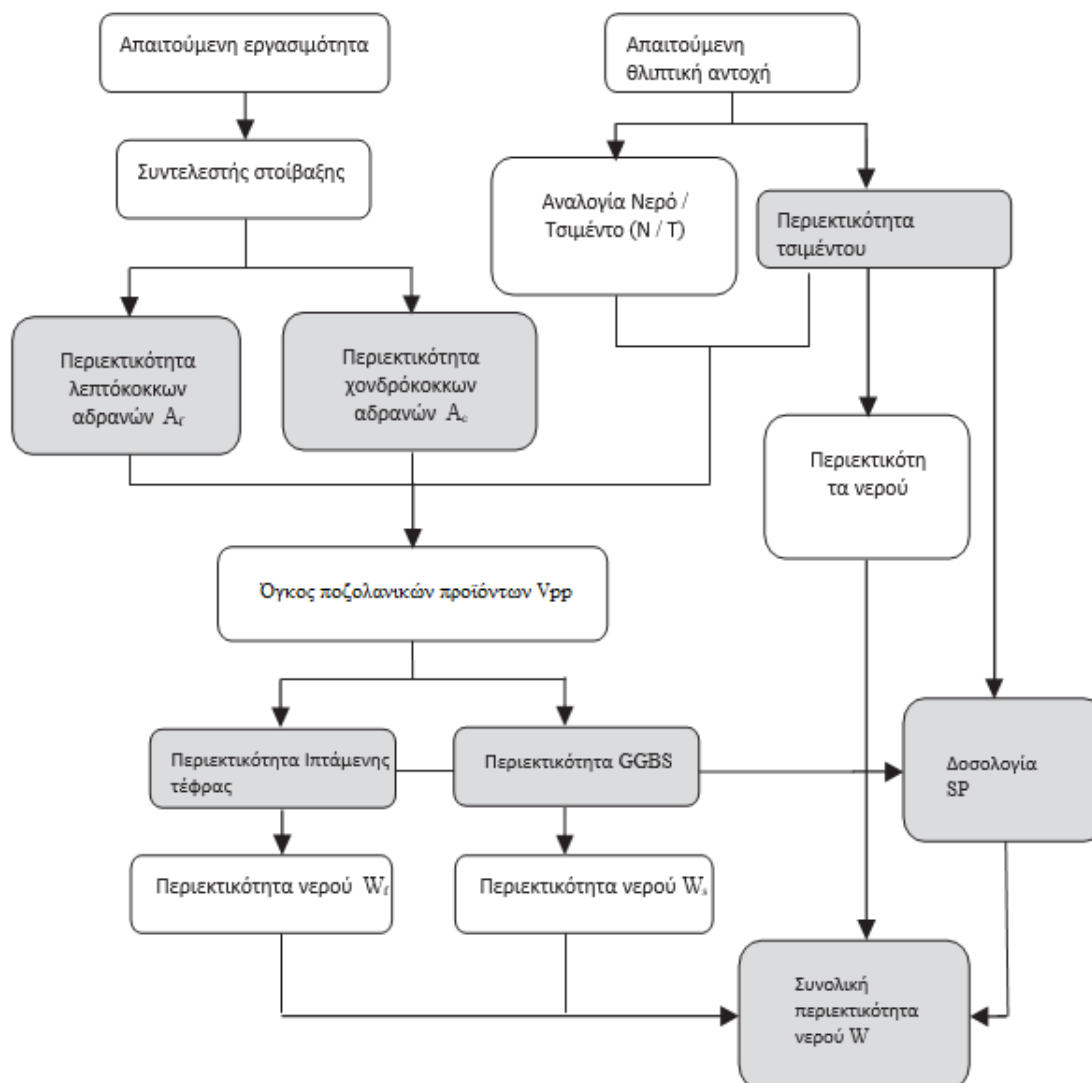
W_s : η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αδρανή του ΑΣΣ

$W_{\sigma L}$: μονάδα μάζας όγκου κορεσμένων χαλαρά στοιβαγμένων επιφανειακά ξηρών χονδρόκοκκων αδρανών (στον αέρα)

W_{sL} : μονάδα μάζας όγκου κορεσμένων χαλαρά στοιβαγμένων επιφανειακά κορεσμένων λεπτόκοκκων αδρανών (στον αέρα)

S/a : αναλογία λεπτόκοκκων αδρανών προς τα συνολικά αδρανή (κυμαίνεται μεταξύ 50% - 57%)

Η διαδικασία αυτής της μεθόδου φαίνεται στο **Σχήμα 1.7** [5].



Σχήμα 1.7 Διαδικασία σχεδιασμού μίγματος που προτάθηκε από τους Su et al. [5]

Αυτή η μέθοδος είναι απλή και καταναλώνει μικρότερη ποσότητα κονιών, ο συντελεστής στοίβαξης καθορίζει τη συνολική περιεκτικότητα των αδρανών, τη θλιπτική αντοχή και την ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης. Ωστόσο, από τη συγκεκριμένη μέθοδο δεν προκύπτει ούτε η αναλογία άμμου/αδρανών ούτε ο συντελεστής στοίβαξης και οι τιμές τους πρέπει να προσδιοριστούν εμπειρικά για να εκτελεστεί ο σχεδιασμός του μίγματος [5].

iv. Μέθοδοι βασισμένες σε στατιστικό παραγοντικό μοντέλο

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στις επιδράσεις διαφορετικών βασικών παραμέτρων όπως η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, χημικά πρόσμικτα, αναλογίας νερού-λεπτών, όγκος χονδρόκοκκων αδρανών, δοσολογία υπερρευστοποιητή κλπ πάνω στην εργασιμότητα και τη θλιπτική αντοχή του νωπού και σκληρυμένου ΑΣΣ. Καθορίζονται συγκεκριμένα εύρη για τις τιμές των παραμέτρων και οι αναλογίες του μίγματος υπολογίζονται ακολουθώντας το σχεδιασμό για μίγμα συμβατικού σκυροδέματος.

Οι Khayat et al. πρότειναν ένα στατιστικό παραγοντικό μοντέλο επιλέγοντας πέντε βασικές παραμέτρους μίγματος για το ΑΣΣ. Οι πέντε βασικές παράμετροι είναι: η περιεκτικότητα σε τσιμέντο του μίγματος, η αναλογία νερού / τσιμέντου, οι δοσολογίες υπερρυστοποιητών και ρυθμιστών ιξώδους και ο όγκος των χονδρόκοκκων αδρανών. Το στατιστικό παραγοντικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή διαγραμμάτων που συσχετίζουν τις μεταβλητές του σχεδιασμού με τις ιδιότητες των υλικών, και κυρίως με τις ιδιότητες του σκυροδέματος στη νωπή του φάση αλλά και με τη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ. Τα αποτελέσματα της μεθόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη βελτιστοποίηση αλλά και για τον ποιοτικό έλεγχο του μίγματος ΑΣΣ.

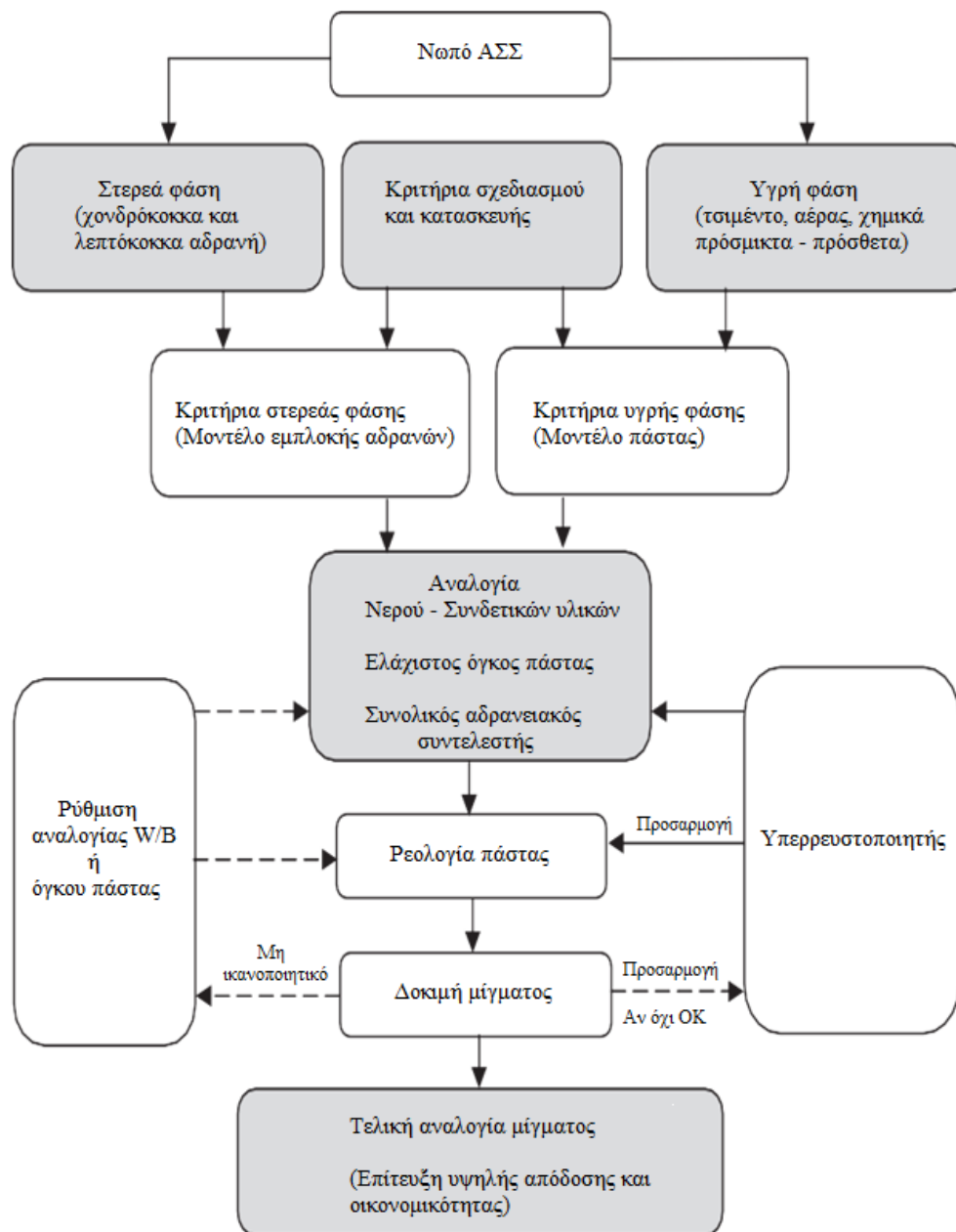
Ο Sonebi πρότεινε ένα στατιστικό παραγοντικό μοντέλο για το σχεδιασμό ΑΣΣ που περιέχει ιπτάμενη τέφρα ως λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό συγκεκριμένης μέσης θλιπτικής αντοχής. Στις δοκιμές του χρησιμοποίησε έναν κλασματικό σχεδιασμό ώστε να αντικατοπτρίζεται και μαθηματικά η επιρροή των βασικών παραμέτρων στην ικανότητα πλήρωσης και διαπερατότητας, στην αντίσταση απόμιξης καθώς και στην αντοχή του ΑΣΣ. Οι βασικοί παράμετροι είναι η περιεκτικότητα του μίγματος σε τσιμέντο και ιπτάμενη τέφρα, η αναλογία νερού / λεπτά και η δοσολογία του υπερρυστοποιητή. Τα αποτελέσματα του έδειξαν πως ΑΣΣ μέσης θλιπτικής αντοχής, σε δοκίμια των 28 ημερών μεταξύ 30 και 35 MPa μπορεί να επιτευχθεί με χρήση έως 210 kg/m³ ιπτάμενης τέφρας ως λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό.

Οι Ozbay et al. ανέλυσαν τις αναλογίες παραμέτρων μίγματος για ΑΣΣ υψηλής αντοχής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σχεδιασμού Taguchi. Οι δοκιμές τους έγιναν σε μίγματα με έξι βασικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων την αναλογία νερού / τσιμέντου, την περιεκτικότητα σε νερό, την αναλογία της περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκο αδρανές ως προς τη συνολική ποσότητα των αδρανών, την περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα, τη δοσολογία των αερακτικών πρόσμικτων και τη δοσολογία των υπερρυστοποιητών. Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Taguchi είναι ότι ελαχιστοποιεί τη μεταβλητότητα των παραμέτρων όσο πλησιάζουμε στην επιθυμητή απόδοση του μίγματος. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι οι βέλτιστες συνθήκες οι οποίες καθορίζονται στο εργαστήριο, μπορούν επίσης να αναπαραχθούν στο εργοτάξιο χωρίς να χρειάζονται αλλαγές [5].

ν. Μέθοδοι βασισμένες σε μοντέλο της ρεολογίας της πάστας

Οι Saak et al. ανέπτυξαν μια μέθοδο σχεδιασμού ΑΣΣ βασισμένη σε ένα μοντέλο της ρεολογίας της πάστας του σκυροδέματος. Η μέθοδος προτείνει ότι η ρεολογία της τσιμεντόπαστας υπαγορεύει σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση σε απόμιξη καθώς και την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος, για δεδομένο μέγεθος κόκκων και όγκο αδρανών. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται μετρώντας τις ρεολογικές ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, ενώ προτείνεται το μίγμα να έχει μια ελάχιστη τάση διαρροής και ένα ελάχιστο ιξώδες ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της απόμιξης.

Οι Bui et al. επέκτειναν τις θεωρητικές ιδέες του Saak ώστε να συμπεριλάβουν την επιρροή του όγκου των αδρανών, της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων των αδρανών καθώς και του λόγου των λεπτόκοκκων αδρανών προς τα χονδρόκοκκα αδρανή. Αυτοί οι παράγοντες, μαζί με το σχήμα των αδρανών επηρεάζουν το ποσοστό κενών και τη μέση διάμετρο του σκελετού αδρανών. Η μέθοδος απαιτεί ελάχιστο όγκο τσιμεντόπαστας για να γεμίσει τα κενά μεταξύ των αδρανών και να δημιουργήσει ένα στρώμα που περιβάλλει τα αδρανή ώστε να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη παραμορφωσιμότητα και αντίσταση απόμειξης του ΑΣΣ. Οι ρεολογικές ιδιότητες της πάστας (τάση διαρροής και ιξώδες) πρέπει να βελτιστοποιηθούν όσον αφορά στη μέση διάμετρο των αδρανών καθώς και των κενών μεταξύ των αδρανών. Η διαδικασία αυτής της μεθόδου φαίνεται στο **Σχήμα 1.8** [5].



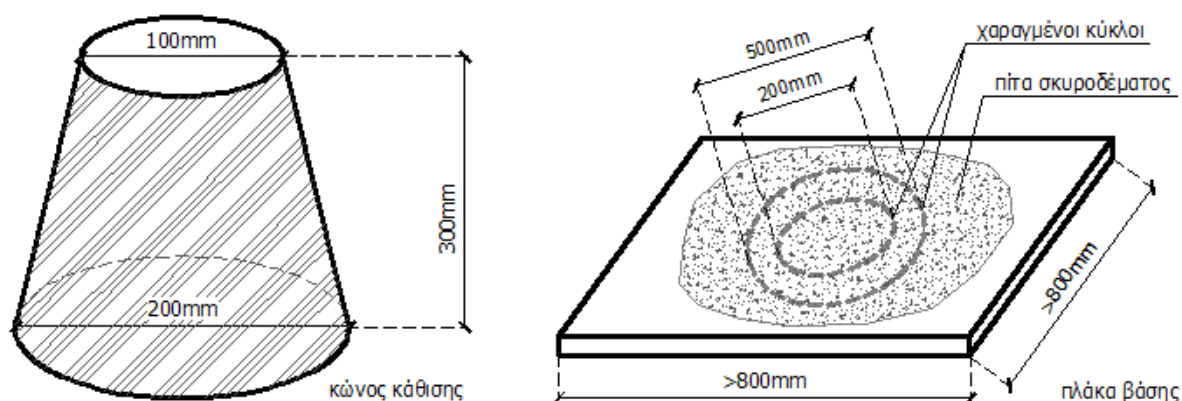
Σχήμα 1.8 Διάγραμμα ροής για τη διαδικασία σχεδιασμού μίγματος χρησιμοποιώντας ρεολογικά μοντέλα [5]

Οι μέθοδοι σχεδιασμού που είναι βασισμένες σε μοντέλα ρεολογίας πάστας μπορεί να μειώσουν ή και να εκμηδενίσουν τον απαιτούμενο χρόνο και κόπο εντός εργαστηρίου και την ποσότητα των υλικών που απαιτούνται και παρέχουν τη βάση για τον ποιοτικό έλεγχο και περαιτέρω ανάπτυξη νέων ορυκτών και χημικών προσθέτων [5].

1.4 Ρεολογικές ιδιότητες και μέθοδοι χαρακτηρισμού

1. Δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης (Slump flow test)

Πρότυπος κώνος κάθισης του Abrams (Σχήμα 1.9) πληρώνεται με σκυρόδεμα χωρίς να συμπυκνωθεί. Ο κώνος ανασηκώνεται κατακόρυφα για 3 δευτερόλεπτα χωρίς πλευρική ή στρεπτική κίνηση και το σκυρόδεμα αφήνεται να ρεύσει ανεμπόδιστα. Αφού σταθεροποιηθεί η ροή του σκυροδέματος χωρίς να διαταραχθεί η πλάκα βάσης ή το σκυρόδεμα, μετρούνται δύο διάμετροι της τελικώς εξάπλωμης επιφάνειας σκυροδέματος που έχουν κάθετες διευθύνσεις μεταξύ τους και υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Έπειτα, η μέση τιμή τους συγκρίνεται με τις τιμές του Πίνακα 1.1 και το ΑΣΣ κατηγοριοποιείται κατάλληλα [3,19].



Σχήμα 1.9 Εξοπλισμός δοκιμής ανεμπόδιστης εξάπλωσης (Slump flow test) [3]

Πίνακας 1.1 Κατηγορίες εξάπλωσης σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-8:2010 [19]

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

Όσο υψηλότερες οι τιμές της ανεμπόδιστης εξάπλωσης, τόσο αυξημένη η δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων από το σημείο έγχυσης. Από την οπτική παρατήρηση της εξαπλωμένης επιφάνειας σκυροδέματος μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη σταθερότητα του μίγματος, ενώ η διαφορά των τιμών ανεμπόδιστης εξάπλωσης από διαδοχικές δοκιμές δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 50 mm [3].

2. Χρόνος εξάπλωσης t_{500}

Με χρήση χρονόμετρου, μετράται ο χρόνος (με ακρίβεια ενός δεκάτου του δευτερολέπτου) από τη χρονική στιγμή έναρξης της ανύψωσης του κώνου κατά τη δοκιμή εξάπλωσης, μέχρι οποιοδήποτε άκρο της εξαπλωνόμενης «πίτας» σκυροδέματος να φτάσει τη διάμετρο των 500 mm.

Ο χρόνος εξάπλωσης t_{500} αποτελεί μία ένδειξη της ταχύτητας ροής και, ως εκ τούτου, συνδέεται με το ιξώδες του μίγματος. Μεγαλύτεροι χρόνοι t_{500} αποτελούν ένδειξη μιγμάτων με υψηλότερο ιξώδες και αντιστρόφως. Χρόνοι μικρότεροι των 2 δευτερολέπτων χαρακτηρίζουν μίγματα με χαμηλό ιξώδες, ενώ χρόνοι μεγαλύτεροι των 5 δευτερολέπτων γενικώς υποδεικνύουν μίγματα ΑΣΣ υψηλού ιξώδους (**Πίνακας 1.2**) [3].

Πίνακας 1.2 Κατηγορίες ιξώδους – t_{500} σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-8:2010 [19]

Κατηγορία	Χρόνος εξάπλωσης t_{500} (s)
VS1	< 2,0
VS2	≥ 2,0

3. Οπτικός δείκτης σταθερότητας (*Visual stability index*)

Η εξαπλωμένη επιφάνεια, όπως προκύπτει από τη δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης, αξιολογείται οπτικά από έμπειρο παρατηρητή και αποδίδεται δείκτης 0, 1, 2 ή 3, ο οποίος χαρακτηρίζει τη σταθερότητα του μίγματος, σύμφωνα με τον **Πίνακα 1.3**. Στην **Εικόνα 1.11** παρουσιάζονται παραδείγματα της δοκιμής ανεμπόδιστης εξάπλωσης για κάθε τιμή του οπτικού δείκτη σταθερότητας.

Πίνακας 1.3 Οπτικός Δείκτης Σταθερότητας – Ερμηνεία & 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 με παρουσία μεγάλης στεφάνης κονιάματος (> 10 mm) ή μεγάλης σωρού αδρανών στο κέντρο της εξαπλωμένης πίτας ή συνδυασμός τους



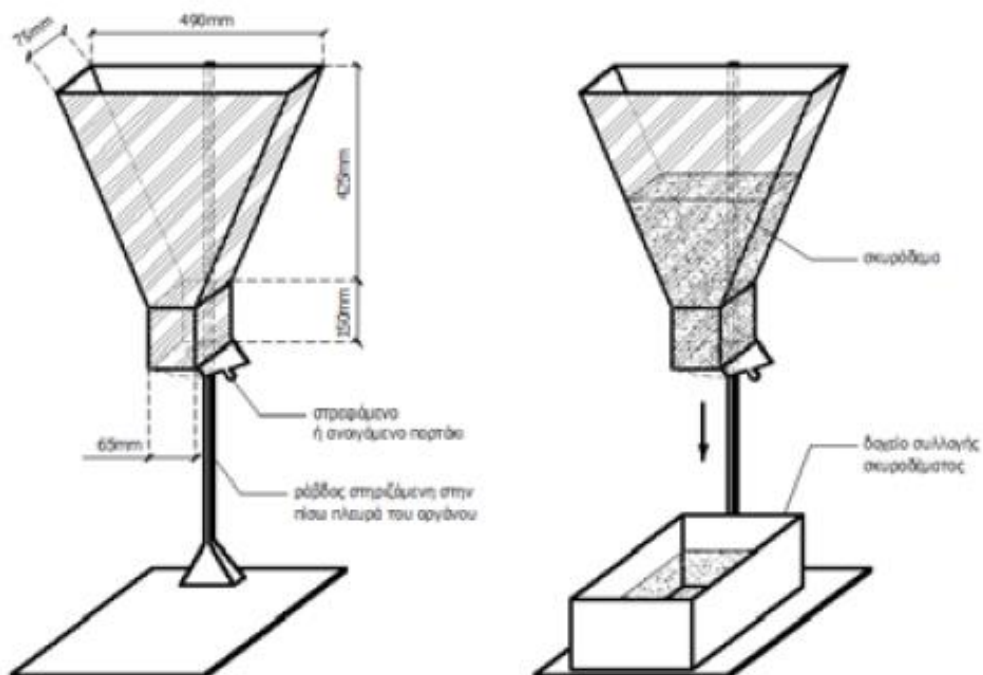
Εικόνα 1.11 Παραδείγματα απόδοσης ΟΔΣ σε εξαπλωμένα δείγματα ΑΣΣ [3]

Τιμή του ΟΔΣ ίση με 0 ή 1 αποτελεί ένδειξη ότι το μίγμα ΑΣΣ είναι σταθερό και κατάλληλο για την στοχευόμενη χρήση. Τιμή του ΟΔΣ ίση με 2 ή 3 αποτελεί ένδειξη δυνητικής απόμιξης και απαιτεί μεταβολή ή προσαρμογή του μίγματος από τον παραγωγό

για τη διασφάλιση της σταθερότητας. Δεδομένου ότι ο ΟΔΣ προσδιορίζεται οπτικά, ενέχει το στοιχείο της υποκειμενικότητας και ως εκ τούτου, η αποτίμηση ενός μίγματος μέσω του ΟΔΣ μπορεί να αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για την παραγωγή ΑΣΣ, αλλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί για την αποδοχή ή την απόρριψη ενός δεδομένου μίγματος. Η δοκιμή του ΟΔΣ αφορά κυρίως μίγματα ΑΣΣ που τείνουν να παρουσιάσουν φαινόμενα εξίδρωσης, διαφορετικά δεν βοηθά στην αναγνώριση της τάσης απόμιξης του μίγματος. Συνοψίζοντας, ακόμα κι αν δεν παρατηρηθούν φαινόμενα απόμιξης δε διασφαλίζεται ότι αυτή δε θα συμβεί σε άλλη χρονική στιγμή ή υπό άλλες συνθήκες [3].

4. Δοκιμή χοάνης V (V-funnel)

Η δοκιμή πραγματοποιείται με συσκευή τύπου χοάνης, ορθογωνικής διατομής (**Εικόνα 1.12**). Το κάτω άκρο της χοάνης καταλήγει σε θύρα εκροής. Η χοάνη πληρώνεται με νωπό σκυρόδεμα χωρίς οποιαδήποτε ανάδευση ή μηχανική συμπύκνωση 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 άνωθεν της χοάνης δει φως στη θέση της θύρας εκροής. Στη συνέχεια, το δοχείο επαναπληρώνεται με το ίδιο υλικό και παραμένει σε ηρεμία για 5 λεπτά. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται και μετράται ο νέος χρόνος εκροής t_v 5 min. Η δεύτερη φάση της δοκιμής (t_v 5 min) δίνει μία εκτίμηση για την τάση απόμιξης του μίγματος. Συγκεκριμένα, μεγαλύτεροι χρόνοι εκροής t_v 5 min συνεπάγονται φαινόμενα απόμιξης. Το ΑΣΣ κατηγοριοποιείται ανάλογα, σύμφωνα με τον **Πίνακα 1.4** [3,20].



Εικόνα 1.12 Εξοπλισμός δοκιμής χοάνης V (V-Funnel) [3]

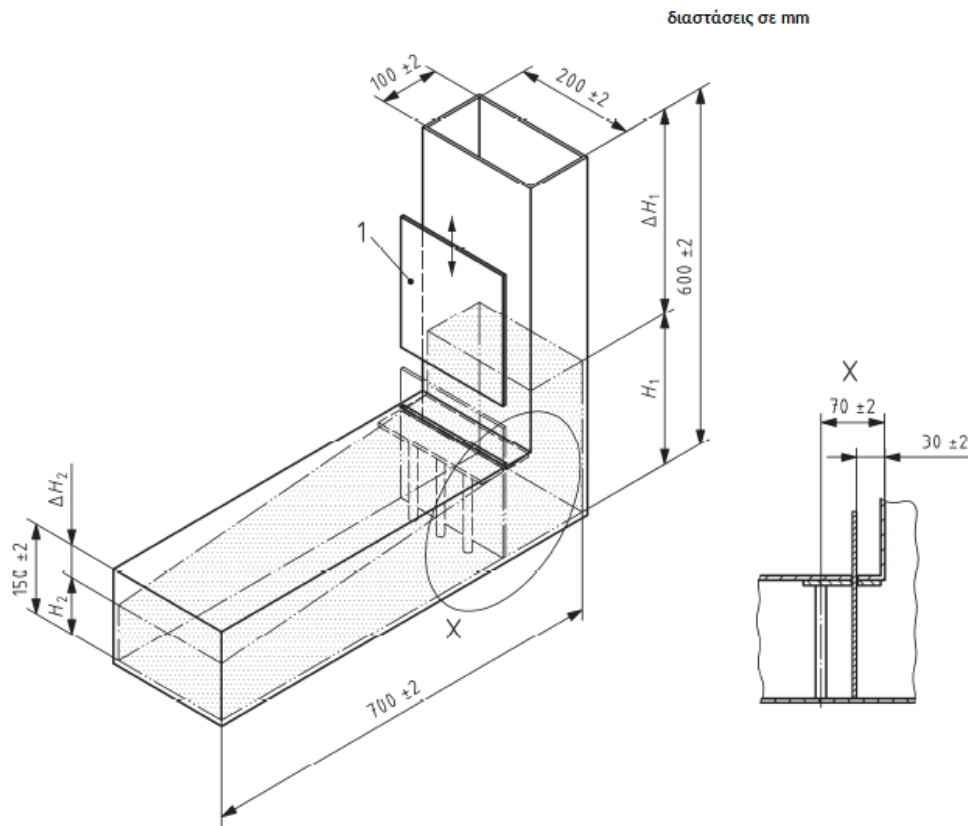
Πίνακας 1.4 Κατηγορίες ιξώδους – Χοάνη V σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-9:2010 [20]

Κατηγορία	Χρόνος εκροής t_v (s)
VF1	< 9,0
VF2	9,0 έως 25,0

5. Δοκιμή δοχείου L (L-box)

Η δοκιμή δοχείου L πραγματοποιείται με συσκευή που αποτελείται από δοχείο ορθογωνικής διατομής σχήματος L (**Εικόνα 1.13**), με ένα κατακόρυφο και ένα οριζόντιο τμήμα. Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ικανότητας διέλευσης του ΑΣΣ ανάμεσα από μικρά ανοίγματα μεταξύ ενισχυτικών ράβδων χωρίς να εμφανιστεί το φαινόμενο της απόμειξης ή έμφραξης. Υπάρχουν δύο παραλλαγές της δοκιμής δοχείου L, η δοκιμή δύο ράβδων και η δοκιμή τριών ράβδων. Η τελευταία προσομοιώνει καλύτερα κατασκευές με πυκνότερους οπλισμούς ενίσχυσης.

Κατά τη δοκιμή το κατακόρυφο τμήμα του δοχείου πληρώνεται με ΑΣΣ και, αμέσως μετά, η θύρα ανασηκώνεται, αφήνοντας το μίγμα να εκρεύσει στο οριζόντιο τμήμα του δοχείου. Μετά τη λήξη της εκροής, το ύψος του σκυροδέματος στο άκρο του οριζόντιου τμήματος εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) του εναπομείναντος ύψους του σκυροδέματος στο κατακόρυφο τμήμα του δοχείου [3,21]



1. συρόμενη θύρα

Εικόνα 1.13. Χαρακτηριστικά Δοχείου L, με τις απαιτούμενες διαστάσεις σε mm [21]

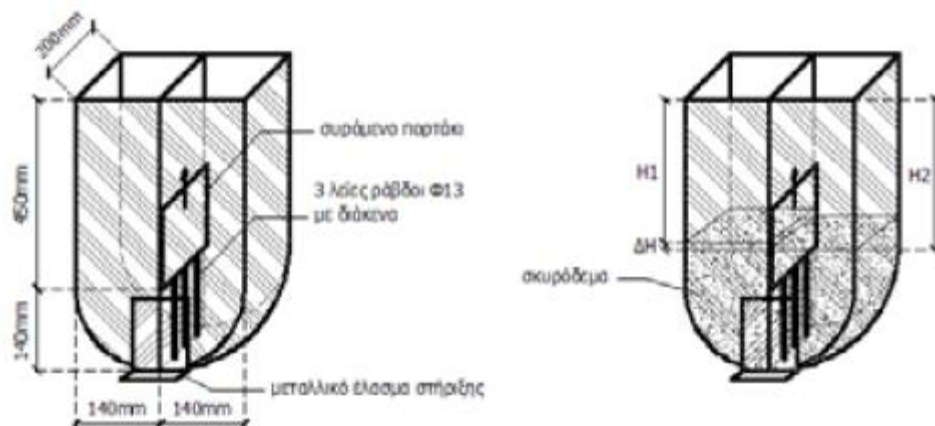
Ο λόγος υψών του σκυροδέματος αποτελεί ένδειξη της ικανότητας διέλευσης ή του βαθμού στον οποίο εμποδίζεται η διέλευση του ΑΣΣ διαμέσου των οπλισμών και ανάλογο για με την τιμή του το ΑΣΣ κατηγοριοποιείται σύμφωνα με τον **Πίνακα 1.5**. Χονδρόκοκκα αδρανή πίσω από τις ράβδους οπλισμού (έμφραξη) και πιθανή απόμιξη στο άκρο του οριζόντιου τμήματος μπορούν να εντοπιστούν οπτικά. Τέτοια φαινόμενα πρέπει να αντιμετωπίζονται μέσω της μεταβολής των αναλογιών των συστατικών του μίγματος, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητά του [3].

Πίνακας 1.5 Κατηγορίες διελυσιμότητας – Δοχείου L σύμφωνα με το EN 12350-10:2010 [21]

Κατηγορία	Λόγος υψών (-)
PL1	≥ 0,80 με 2 ράβδους
PL2	≥ 0,80 με 3 ράβδους

6. Δοκιμή δοχείου U (U-box)

Η δοκιμή πραγματοποιείται με συσκευή που αποτελείται από δοχείο ορθογωνικής-κυκλικής διατομής σχήματος U, με δύο κατακόρυφα διαμερίσματα (Εικόνα 1.14). Τα δύο διαμερίσματα χωρίζονται από συρόμενη θύρα, μπροστά από την οποία είναι τοποθετημένες τρεις κατακόρυφες λείες ράβδοι χάλυβα. Το ένα διαμέρισμα του δοχείου (από την αντίθετη πλευρά των ράβδων) πληρώνεται με ΑΣΣ και, αμέσως μετά, η θύρα ανασκάνεται, αφήνοντας το μίγμα να ρεύσει στο άλλο διαμέρισμα του δοχείου, έως το μίγμα να ισορροπήσει στα δύο διαμερίσματα βάσει της αρχής των συγκοινωνούντων δοχείων. Μετά τη λήξη της ροής, μετράται η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο διαμερισμάτων.

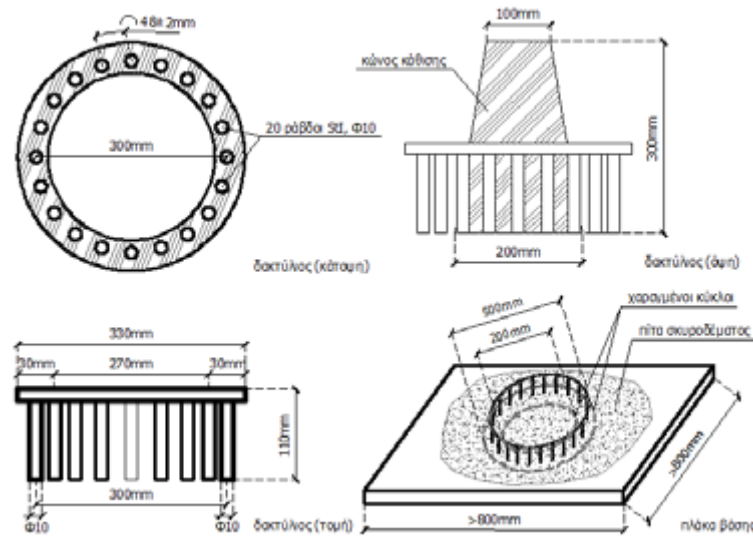


Εικόνα 1.14 Χαρακτηριστικά δοχείου U-Box, δοκιμής U [3]

Η μέγιστη επιτρεπόμενη υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο διαμερισμάτων είναι ίση με 30 mm. Αν το ΑΣΣ ρέει ελεύθερα (π.χ. όπως το νερό), τότε η στάθμη στα δύο διαμερίσματα θα βρίσκεται στο ίδιο ύψος. Μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές αποτελούν ένδειξη της ικανότητας διέλευσης ή του βαθμού στον οποίο εμποδίζεται η διέλευση του ΑΣΣ διαμέσου των οπλισμών. Χονδρόκοκκα αδρανή πίσω από τις ράβδους οπλισμού (έμφραξη) και πιθανή απόμειξη στο άκρο του οριζόντιου τμήματος δεν μπορούν συνήθως να εντοπιστούν οπτικά, εκτός εάν η πλευρά της συσκευής είναι διαφανής. Τέτοια φαινόμενα πρέπει να αντιμετωπίζονται μέσω της μεταβολής των αναλογιών των συστατικών του μίγματος, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητά του [3].

7. Δοκιμή δακτυλίου J (J-ring)

Πρότυπος κώνος του Abrams, που περιβάλλεται από δακτύλιο με κάθετες λείες ράβδους χάλυβα, πληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία φάση, χωρίς οποιαδήποτε ανάδευση ή μηχανική συμπύκνωση (Εικόνα 1.15). Ο κώνος ανασηκώνεται και το σκυρόδεμα αφήνεται να ρεύσει διαμέσου των ράβδων. Η μέση τιμή δύο διαμέτρων της τελικώς εξαπλωμένης επιφάνειας σκυροδέματος, μετρούμενων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, αναφέρεται ως ροή διαμέσου του δακτυλίου J. Η δοκιμή πραγματοποιείται αρχικώς με δεκαέξι κατακόρυφες ράβδους και, εφόσον η δοκιμή δεν είναι επιτυχής (υπομετρική διαφορά > 10mm, η δοκιμή επαναλαμβάνεται με δώδεκα κατακόρυφες ράβδους. Έπειτα, το ΑΣΣ κατηγοριοποιείται σύμφωνα με τον Πίνακα 1.6 [3,23].



Εικόνα 1.15 Εξοπλισμός δοκιμής δακτυλίου J (J-Ring) [3]

Πίνακας 1.6 Δακτύλιος J - κατηγορίες διεισσιμότητας – σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-12:2010 [23]

Κατηγορία	Λόγος υψών (-)
PJ1	≤ 10 με 12 ράβδους
PJ2	≤ 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 εμποδίζεται η διέλευση διαμέσου ράβδων οπλισμού. Η ίδια δοκιμή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της πιθανότητας έμφραξης μίγματος ΑΣΣ για δεδομένη εφαρμογή. Εφόσον οι ράβδοι εγκλωβίσουν τα χονδρόκοκκα αδρανή εντός του δακτυλίου, τότε το μίγμα έχει υψηλή πιθανότητα έμφραξης και οι αναλογίες των συστατικών του θα πρέπει να αναπροσαρμοστούν, ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα του μίγματος [3].

8. Δοκιμή σταθερότητας μέσω κοσκίνισης (sieve segregation resistance ή sieve stability test)

Δείγμα νωπού σκυροδέματος παραμένει σε ηρεμία για 15 λεπτά και καταγράφονται 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 2 λεπτά (**Εικόνα 1.16**). Στη συνέχεια, το υλικό που διαπέρασε το κόσκινο ζυγίζεται και υπολογίζεται η ποσοστιαία απόμιξη.

Η ποσοστιαία απόμιξη, SR (%), υπολογίζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης:

$$SR (\%) = (W_{ps} - W_p) 100 / W_c \quad (1.4)$$

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)

Το ποσοστό SR (%) που υπολογίζεται από τον παραπάνω τύπο συγκρίνεται με τις τιμές του **Πίνακα 1.7** και το ΑΣΣ κατηγοριοποιείται καταλλήλως [3,22].



Εικόνα 1.16 Τυπικός εξοπλισμός δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης [3]

Πίνακας 1.7 Κατηγορίες αντίστασης σε απόμιξη μέσω κοσκίνισης σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-11:2010 [22]

Κατηγορία	Απομιγμένο ποσοστό (%)
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

9. Δοκιμή προσδιορισμού πυκνότητας νωπού σκυροδέματος

Κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο όγκου τουλάχιστον 5 λίτρων πληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία φάση, χωρίς οποιαδήποτε ανάδευση ή μηχανική συμπίκνωση. Αμέσως μετά ζυγίζεται το δοχείο για να προσδιοριστεί η μάζα (m_2) και καταγράφεται η τιμή της. Η πυκνότητα του ΑΣΣ υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [24] :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1.5)$$

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

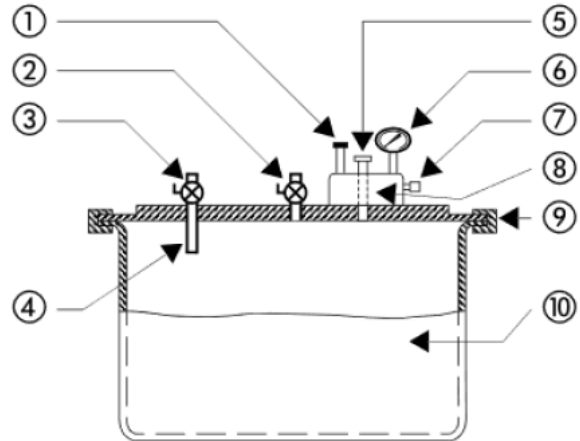
V : ο όγκος του δοχείου, σε m^3

10. Δοκιμή προσδιορισμού περιεχόμενου αέρα

Για να προσδιοριστεί η περιεκτικότητα του νωπού σκυροδέματος σε αέρα ακολουθείτε η μέθοδος εξισορρόπησης της πίεσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-7. Όπως και στη δοκιμή μέτρησης της πυκνότητας, χρησιμοποιείται κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο όγκου τουλάχιστον 5 λίτρων το οποίο πληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία φάση, χωρίς οποιαδήποτε ανάδευση ή μηχανική συμπίκνωση και σφραγίζεται αεροστεγώς. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην εξισορρόπηση γνωστού όγκου αέρα σε γνωστή πίεση με τον άγνωστο όγκο αέρα που βρίσκεται εντός του σκυροδέματος. Η διάταξη για τον

προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε αέρα του ΑΣΣ δίνεται σχηματικά στην **Εικόνα 1.17** [25].

- 1 Αντλία
- 2 Βαλβίδα Β
- 3 Βαλβίδα Α
- 4 Θάλαμοι εκτόνωσης για έλεγχο κατά τη βαθμονόμηση
- 5 Κύρια βαλβίδα αέρα
- 6 Μετρητής πίεσης
- 7 Βαλβίδα εκτόνωσης
- 8 Χώρος αέρα
- 9 Κολάρο σφράγισης
- 10 Δοχείο



Εικόνα 1.17 Διάταξη συσκευής για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε αέρα του ΑΣΣ με τη μέθοδο της εξισορρόπησης πίεσης.

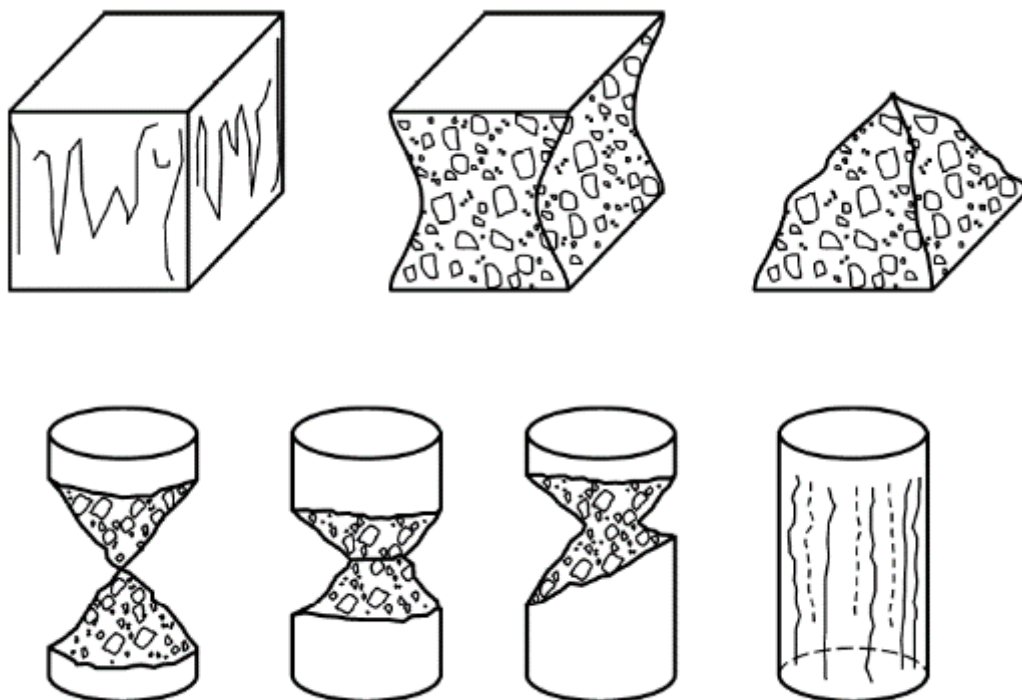
1.5 Δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών

1. Δοκιμή Θλιπτικής αντοχής

Η θλιπτική αντοχή αποτελεί βασική μηχανική ιδιότητα του σκυροδέματος. Προκειμένου να μετρηθεί ακολουθείται η διαδικασία σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-3 όπου για κάθε σύνθεση ΑΣΣ απαιτείται συγκεκριμένος αριθμός δοκιμίων τα οποία αφότου τοποθετηθούν σε μήτρες όταν το ΑΣΣ βρίσκεται στη νωπή του φάση, αφήνονται για 24 ώρες και έπειτα αφαιρούνται από τις μήτρες και τοποθετούνται σε υγρό περιβάλλον. Στη συνέχεια για κάθε ηλικία δοκιμίου (7, 28 ή 90 ημερών) για την οποία πρέπει να μετρηθεί η θλιπτική αντοχή, συγκεκριμένος αριθμός δοκιμίων απομακρύνονται από το νερό, αφήνονται να στεγνώσουν σε ξηρό περιβάλλον, ζυγίζονται και έπειτα τοποθετούνται σε διάταξη προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής, μέχρις ότου αστοχήσουν έναντι θλίψης. Μια τυπική διάταξη της πρέσας παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.18**, ενώ στην **Εικόνα 1.19** φαίνονται οι συνηθισμένες μορφές αστοχίας των κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων σε δοκιμές έναντι θλίψης [26].



Εικόνα 1.18 Μηχανική διάταξη προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής



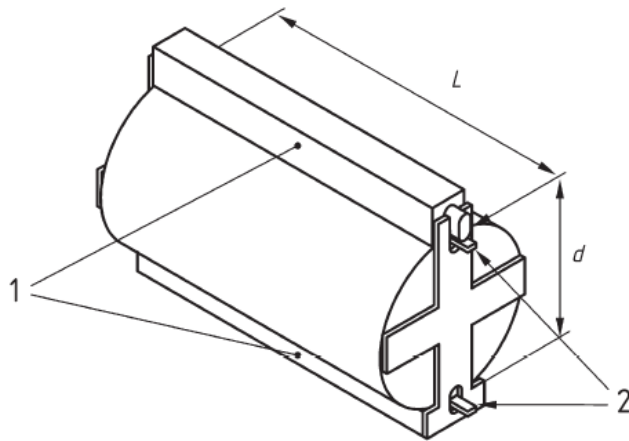
Εικόνα 1.19 Μορφές αστοχίας κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων έναντι θλίψης

2. Δοκιμή θλιπτικής αντοχής έναντι υψηλών θερμοκρασιών

Στη συγκεκριμένη δοκιμή ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής των απλών δοκιμίων, με μόνη διαφορά ότι αφού τα δοκίμια απομακρυνθούν από το νερό, αφήνονται να στεγνώσουν σε ξηρό περιβάλλον και έπειτα τοποθετούνται σε κλίβανο, ζυγίζονται και τέλος τοποθετούνται σε διάταξη προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής, μέχρις ότου αστοχήσουν έναντι θλίψης.

3. Δοκιμή εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης

Προκειμένου να μετρηθεί η εφελκυστική διάρρηξη ακολουθείται η διαδικασία σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-6. Όμοια με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τη δοκιμή της θλιπτικής αντοχής το νωπό μίγμα ΑΣΣ τοποθετείται σε κυλινδρικές μήτρες οι οποίες αφήνονται για 24 ώρες και έπειτα τα δοκίμια αφαιρούνται από τις μήτρες και τοποθετούνται σε υγρό περιβάλλον. Στη συνέχεια, όταν τα δοκίμια φτάσουν την ηλικία των 90 ημερών απομακρύνονται από το νερό, αφήνονται να στεγνώσουν σε ξηρό περιβάλλον, ζυγίζονται και έπειτα τοποθετούνται σε διάταξη προσδιορισμού εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης, μέχρις ότου αστοχήσουν έναντι διάρρηξης. Στην **Εικόνα 1.20**, παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή προσδιορισμού εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης [27].



1 Χαλύβδινο μέρος για επιβολή φορτίου
 2 Λεπτές λωρίδες κατάλληλου ξύλου (plywood)
 L μήκος δοκιμίου
 D διάμετρος δοκιμίου

Εικόνα 1.20 Τυπική διάταξη δοκιμής εφελκυσμού μέσω διάρρηξης

Η εφελκυστική αντοχή μέσω διάρρηξης του ΑΣΣ υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [27] :

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (1.6)$$

όπου:

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

F : το μέγιστο φορτίο, σε N

L : το μήκος της γραμμής επαφής του δοκιμίου, σε mm

d : η καθορισμένη διάσταση διατομής, σε mm

4. Οπτικός δείκτης σταθερότητας

Στα διερρηγμένα πλέον δοκίμια από τη δοκιμή διάρρηξης, μπορεί να προσδιοριστεί η κατηγορία του ΑΣΣ με βάση τον οπτικό δείκτη σταθερότητας και να παρατηρηθούν τυχόντα σημάδια στρώσης πάστας τσιμέντου ή κονιάματος στο πάνω μέρος του κυλινδρικού δοκιμίου ή οποιαδήποτε διαφορά στην κατανομή καθ' ύψος των χονδρόκοκκων και των λεπτόκοκκων αδρανών. Πιο συγκεκριμένα, εάν δεν παρατηρείται πάστα ή κονίαμα στο πάνω μέρος του κυλινδρικού δοκιμίου και δεν υπάρχει διαφορά όσον αφορά στην κατανομή των αδρανών κατά μήκος τότε η σταθερότητα του ΑΣΣ αξιολογείται ως 0 και το δείγμα θεωρείται σταθερό. Εάν υπάρχει μια μικρή διαφορά στην κατανομή των αδρανών κατά μήκος, χωρίς όμως να υπάρχει επίστρωση πάστας ή κονιάματος στο πάνω μέρος του δείγματος, η σταθερότητα του ΑΣΣ αξιολογείται ως 1 και το δείγμα θεωρείται σταθερό. Τέλος, σε περιπτώσεις που παρατηρείται και επίστρωση πάστας ή κονιάματος στο πάνω μέρος του κυλινδρικού δοκιμίου αλλά και διαφορά στην κατανομή των αδρανών τότε η σταθερότητα του ΑΣΣ αξιολογείται ως 2 ή 3 ανάλογα με την ένταση του φαινομένου [3].

5. Δοκιμή συστολής ξήρανσης

Προκειμένου να μετρηθεί η συστολή ξήρανσης ακολουθείται η διαδικασία σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-16. Πιο συγκεκριμένα για κάθε μίγμα ΑΣΣ πρισματικές μήτρες πληρώνονται με νωπό σκυρόδεμα και αφήνονται για 24 ώρες. Έπειτα τα δοκίμια αφαιρούνται από τις πρισματικές μήτρες, ζυγίζονται και μετράται το μήκος τους και στη συνέχεια τοποθετούνται σε δωμάτιο συντήρησης με ελεγχόμενη θερμοκρασία (24°C) και υγρασία (65%). Επιπλέον μετρήσεις της μάζας και του μήκους των δοκιμίων καταγράφονται σε ηλικίες 7, 14, 28, 56 και 90 ημερών.

Η συστολή ξήρανσης κάθε δοκιμίου υπολογίζεται για κάθε διαδοχική μέτρηση με τον εξής τύπο ($\times 10^{-6}$) [29]:

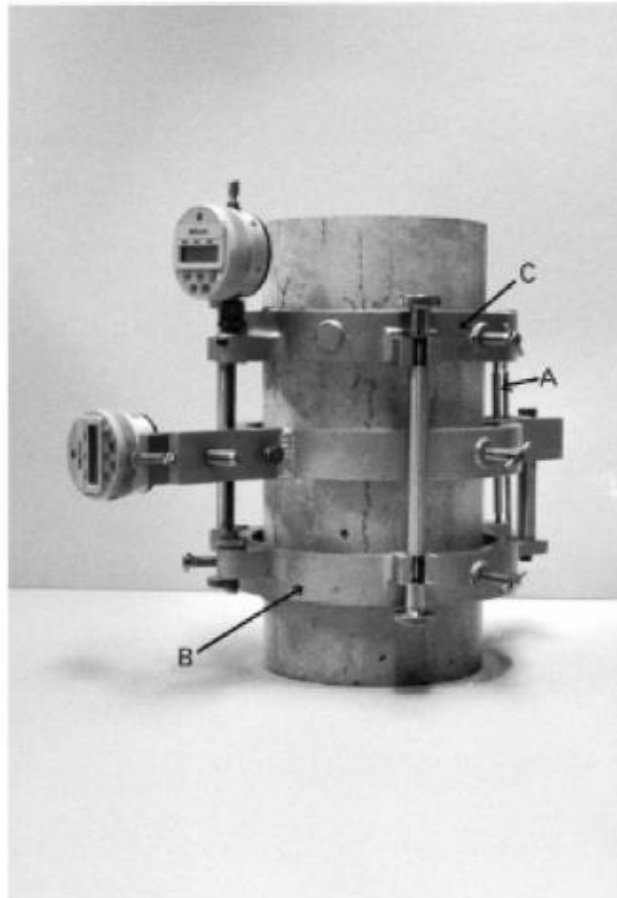
$$\varepsilon_{cs}(t,t_0) = \frac{(L(t_0) - L_{cs}(t))}{L_0} \quad (1.7)$$

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

6. Δοκιμή μέτρησης μέτρου ελαστικότητας

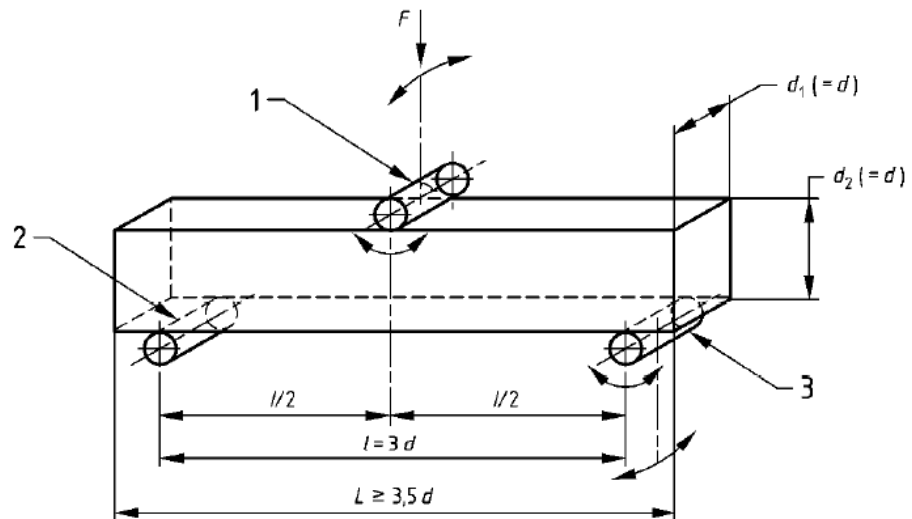
Προκειμένου να μετρηθεί το μέτρο ελαστικότητας του ΑΣΣ ακολουθείται η διαδικασία σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 469. Το νωπό μίγμα ΑΣΣ τοποθετείται σε κυλινδρικές μήτρες οι οποίες αφήνονται για 24 ώρες και έπειτα τα δοκίμια αφαιρούνται από τις μήτρες και τοποθετούνται σε υγρό περιβάλλον για 28 ημέρες. Στη συνέχεια, απομακρύνονται από το νερό, αφήνονται να στεγνώσουν σε ξηρό περιβάλλον, ζυγίζονται και έπειτα τοποθετούνται σε κατάλληλο συμπιεσόμετρο όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.21**. Στη συνέχεια, διατηρώντας τη θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος σταθερή σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής, το κυλινδρικό δοκίμιο μαζί με τον εξοπλισμό μέτρησης καταπόνησης τοποθετείται στο μπλοκ έδρασης της μηχανής δοκιμών και εφόσον ευθυγραμμιστεί με το μηχάνημα ξεκινάει ο πρώτος κύκλος επιβολής φορτίων με σταθερό ρυθμό έως το φορτίο να φτάσει στη τιμή που έχει καθοριστεί ως μέγιστη, για τη συγκεκριμένη δοκιμή. Έπειτα, με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο εφαρμόστηκε το φορτίο μειώνεται μέχρι να φτάσει στο μηδέν. Ο πρώτος κύκλος φορτίσεως αποσκοπεί κυρίως στη βαθμονόμηση της διαδικασίας δοκιμών, αλλά και στον προσανατολισμό – ανακατανομή της υφιστάμενης μικρορηγματώσης της μεταβατικής ζώνης. Συνιστώνται τουλάχιστον δύο επακόλουθες φορτίσεις με τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφηκε παραπάνω έτσι ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα της δοκιμής. Τέλος, το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου υπολογίζεται με δεδομένα που προκύπτουν από τον μέσο όρο των επακόλουθων δοκιμών [28].



Εικόνα 1.21 Συμπιεσόμετρο για τον προσδιορισμό E και ν.

7. Δοκιμή καμπτικής αντοχής

Η δοκιμή γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-5. Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείται στα ίδια πρισματικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της συστολής ξήρανσης, μετά το πέρας 90 ημερών. Πιο συγκεκριμένα, τα πρισματικά δοκίμια ζυγίζονται, έπειτα τοποθετούνται σε διάταξη προσδιορισμού καμπτικής αντοχής και τοποθετούνται έτσι ώστε ο διαμήκης άξονας τους να σχηματίζει ορθή γωνία με τους άνω και κάτω κυλίνδρους όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.22**. Αφού εξασφαλιστεί ότι η διεύθυνση της φόρτισης είναι κάθετη προς την κατεύθυνση χύτευσης του δοκιμίου τότε εφαρμόζεται φορτίο με σταθερό ρυθμό 1.67 KN/sec μέχρις ότου τα δοκίμια αστοχήσουν έναντι κάμψης [30].



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

Εικόνα 1.22 Τυπική διάταξη φόρτισης κεντρικού σημείου σε κάμψη (center-point loading)

Η καμπτική αντοχή του δοκιμίου υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση [30] :

$$f_{ct,fl} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2} \quad (1.8)$$

όπου:

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

F: το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε, σε N

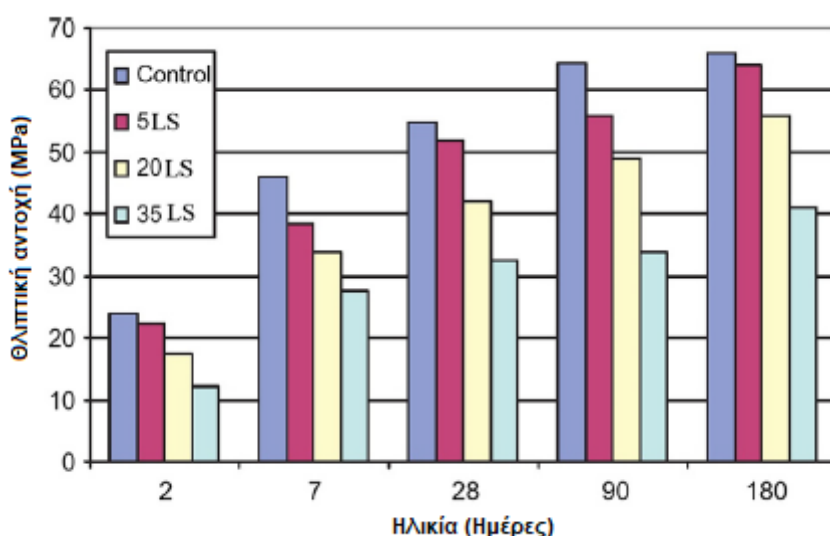
l: η απόσταση μεταξύ των υποστηρικτικών κυλίνδρων, σε mm

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

1.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στο ΑΣΣ με εναλλακτικά λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά

Σύμφωνα με τους Wang et al. η προσθήκη ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού στο σκυρόδεμα μπορεί να έχει θετική ή αρνητική επίδραση στην εργασιμότητα του ανάλογα με το ποσοστό ενσωμάτωσης, το μέγεθος των σωματιδίων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα σωματίδια τσιμέντου καθώς και την περιεκτικότητα σε οξείδιο του μαγνησίου, η αύξηση του οποίου αυξάνει το ιξώδες του μίγματος.

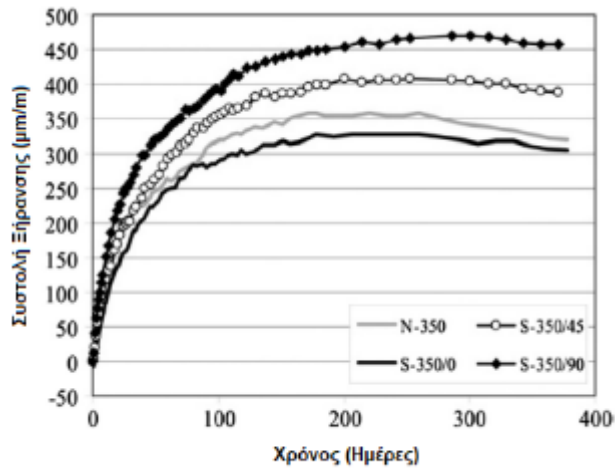
Όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες του ΑΣΣ, όσο αυξάνεται η ποσότητα του ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού τόσο μειώνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 1.10**, λόγω της εμφάνισης του φαινομένου αραίωσης που προκαλείται από την υψηλή περιεκτικότητα σε πληρωτικό υλικό. Παρ' όλα αυτά, η βέλτιστη περιεκτικότητα σε ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό με κατάλληλη κατανομή μεγέθους σωματιδίων θα μπορούσε να αυξήσει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος λόγω της βελτιωμένης στοίβαξης του ΑΣΣ που είναι αποτέλεσμα της πλήρωσης των κενών μεταξύ των σωματιδίων τσιμέντου [31].



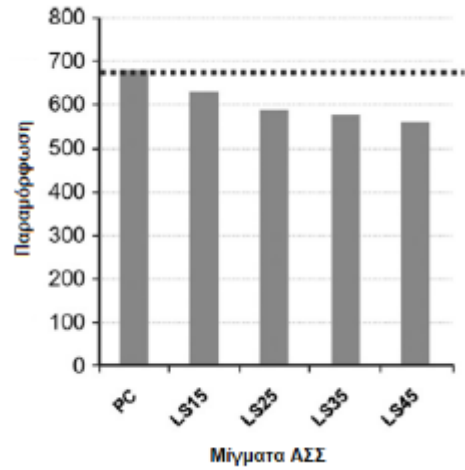
Σχήμα 1.10 Επίδραση του ασβεστολιθικού πληρωτικού στη θλιπτική αντοχή δοκιμίων διαφορετικής ηλικίας

Το ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό θεωρείται ότι είναι υλικό υψηλότερης σκληρότητας σε σύγκριση με το σκυρόδεμα, το οποίο οδηγεί σε υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας. Αν και η επίδραση του στην καμπτική αντοχή δεν φαίνεται να είναι προφανής, τείνει να αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ το γεγονός ότι η σκόνη ασβεστόλιθου είναι σίγουρα λιγότερο αντιδραστική από το τσιμέντο και άλλα υδραυλικά ή ποζολανικά υλικά οδηγεί σε μειωμένη συρρίκνωση του σκυροδέματος όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα. Πιο συγκεκριμένα στο **Σχήμα 1.11** (α) παρατηρείται ότι η συστολή ξήρανσης του μίγματος S-305/90 (Τσιμέντο: 350 kg/m³, Σκόνη ασβεστολίθου: 90 kg/m³) ήταν 18.1% μεγαλύτερη από αυτή του μίγματος S-305/45 που με τη σειρά της ήταν 50% μεγαλύτερη από αυτή του μίγματος S-305/0 σε 365 ημέρες. Στο **Σχήμα 1.11** (β)

επίσης παρατηρείτε η παραμόρφωση που υπέστησαν τα δοκίμια μιγμάτων που περιείχαν από 15 έως 45% σκόνη ασβεστολίθου συγκριτικά με τη σύνθεση αναφοράς [31].



(α)



(β)

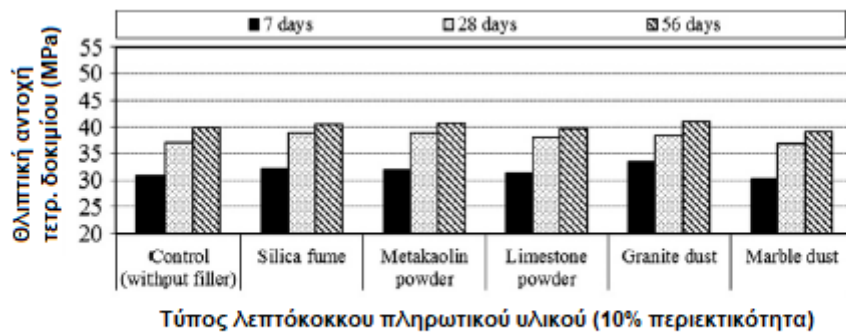
Σχήμα 1.11 (α) Συστολή ξήρανσης και (β) παραμόρφωση δοκιμίων μιγμάτων ΑΣΣ με διαφορετική περιεκτικότητα σε σκόνη ασβεστόλιθου

Οι Elyamani et al. συνέκριναν την επίδραση διαφορετικών πληρωτικών υλικών στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες του ΑΣΣ. Η μελέτη τους έδειξε πως τα μη ποζολανικά πληρωτικά υλικά, όπως η μαρμαρόσκονη, περιόρισαν τα φαινόμενα της εξίδρωσης και του διαχωρισμού σε σύγκριση με τα ποζολανικά πληρωτικά υλικά, όπως η πυριτική παιπάλη και ο μετακαολίνης, ενώ η παρουσία της μαρμαρόσκονης μείωσε επίσης το ποσοστό απορρόφησης νερού. Δίνονται ενδεικτικά στο **Σχήμα 1.12** τα διαγράμματα για μίγματα ΑΣΣ με 10% ποσοστό λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού (τα αποτελέσματα είχαν παρόμοια τάση και για τις υπόλοιπες δοκιμές με διαφορετικό ποσοστό λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού) [8]



Σχήμα 1.12 Διαγράμματα ποσοστού εξίδρωσης και απορρόφησης νερού ως προς τους διαφορετικούς τύπους λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών με ποσοστό περιεκτικότητας 10%

Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές όσον αφορά στην επίδραση του είδους του πληρωτικού υλικού (ποζολανικού /μη ποζολανικού) στη θλιπτική αντοχή, αν και τα μη ποζολανικά, παρόλο που δεν συμμετέχουν στις αντιδράσεις ενυδάτωσης, βελτίωσαν τη μικροδομή της τσιμεντόπαστας με θετική επίδραση στη μεταβατική ζώνη. Δίνονται στο **Σχήμα 1.13** διαγραμματικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε δοκίμια 7, 28 και 56 ημερών για τους διαφορετικούς τύπους πληρωτικών υλικών [8].

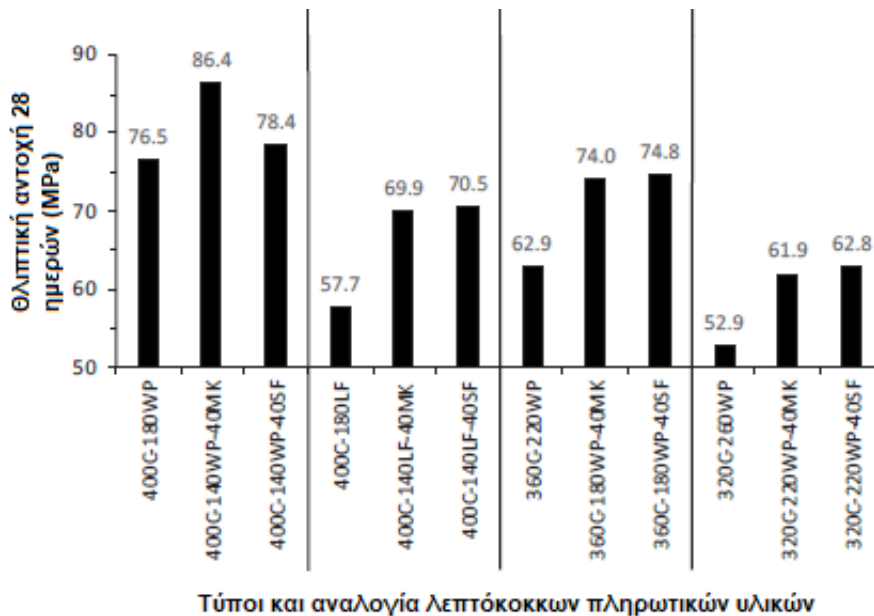


Σχήμα 1.13 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής ΑΣΣ ως προς τους διαφορετικούς τύπους λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών με ποσοστό περιεκτικότητας 10% και για διαφορετικές ηλικίες δοκιμίων

Οι Danish et al. μελέτησαν την επίδραση του μετακαολίνης ως ορυκτό πρόσθετο και της μαρμαρόσκονης ως πληρωτικό υλικό στη σύνθεση του ΑΣΣ. Και τα δύο έχουν σημαντικό θετικό αντίκτυπο στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος καθώς μετριάζουν τυχόντα σημάδια διαχωρισμού και ενισχύουν τη σταθερότητα και τη συνοχή του νωπού ΑΣΣ. Επιπλέον, τα παραπάνω υλικά βελτιώνουν τις ιδιότητες του ΑΣΣ που σχετίζονται με τη θλιπτική αντοχή, την απορροφητικότητα, τη διαπερατότητα αερίων και τη διείδυση χλωριόντων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής με τη χρήση μετακαολίνης σε ποσοστό από 5 έως 10% κατά βάρος και παρατηρήθηκε κυρίως σε δοκίμια μεγαλύτερης ηλικίας λόγω της υψηλής ποζολανικής δραστηριότητας του μετακαολίνης. Παρατηρήθηκε επίσης ότι με αύξηση της περιεκτικότητας μετακαολίνης σε ποσοστό μεγαλύτερο του 15%, μειώθηκε η θλιπτική αντοχή και αυτό αποδόθηκε στο ότι χρησιμοποιήθηκε επιπλέον υπερρυστοποιητής για να επιτευχθεί η απαιτούμενη εργασιμότητα [32].

Οι El Mir et al. διερεύνησαν τη χρήση σκόνης απορριπτέου περλίτη σε συνδυασμό με μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη σε διαφορετικές αναλογίες σε συνθέσεις ΑΣΣ και στη συνέχεια συνέκριναν τα αποτελέσματα με μίγματα που περιέχουν ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό αντί για σκόνη περλίτη. Η ενσωμάτωση απορριπτέου περλίτη είχε ως αποτέλεσμα τις χαμηλότερες απαιτήσεις χημικών προσμίκτων σε σύγκριση με συνθέσεις που περιέχουν συμπληρωματικά τσιμενοειδή υλικά. Ωστόσο, οι συνθέσεις που περιέχουν σκόνη ασβεστόλιθου αντί για περλίτη είχαν ακόμη χαμηλότερες απαιτήσεις υπερρυστοποιητή. Σε δοκίμια ΑΣΣ με σκόνη περλίτη παρατηρήθηκε σημαντικά υψηλότερη αντοχή σε θλίψη σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια με ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό, η οποία μπορεί να εξηγηθεί από την αλουμινοπυριτική φύση του περλίτη και την αντίστοιχη συμμετοχή του σε ποζολανικές αντιδράσεις, από τις οποίες

παράγεται περισσότερο ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (C-S-H, calcium silicate hydrates) και άλλες ένυδρες φάσεις ασβεστίου – αργιλίου – πυριτίου (C-A-S-H/calcium aluminate silicate hydrates). Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.14** εμφανίζεται η θλιπτική αντοχή δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών (f_c) για διάφορα μίγματα που περιέχουν περλίτη (WP), μετακαολίνη (MK), σκόνη ασβεστολίθου (LS) και πυριτική παιπάλη (SF) ως λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό σε διαφορετικό ποσοστό κάθε φορά. Παρατηρείται ότι το μίγμα 400C-140WP-40MK απέδωσε την υψηλότερη θλιπτική αντοχή 28 ημερών με τιμή 86.4 MPa [33].

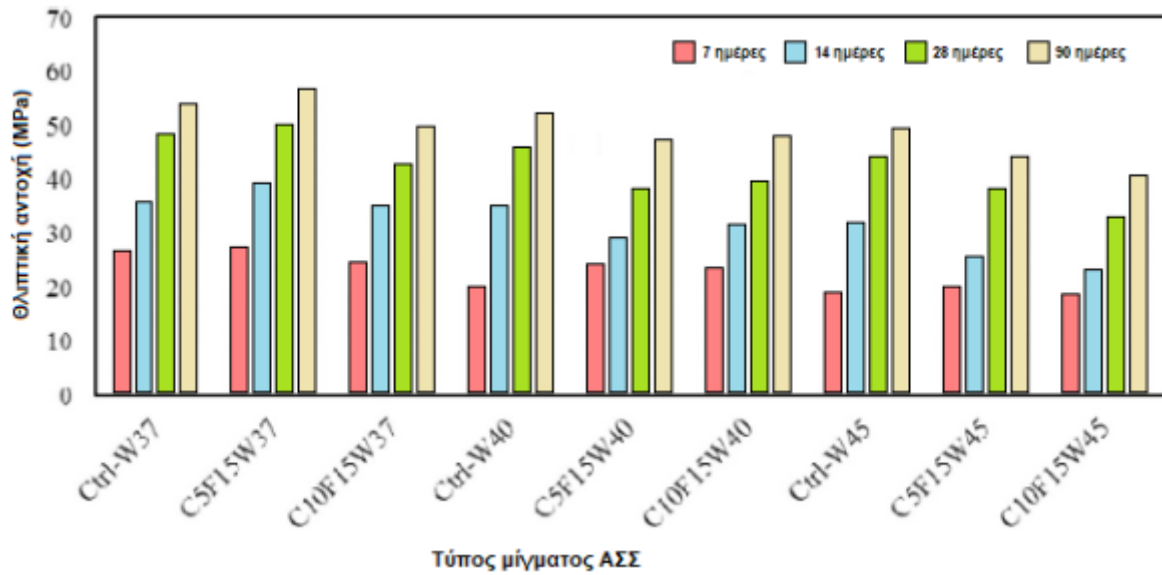


Σχήμα 1.14 Επίδραση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών στη θλιπτική αντοχή 28 ημερών

Οι Abukhashaba et al. χρησιμοποίησαν σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων σε ενισχυμένο με ίνες ΑΣΣ και κατάφεραν να παράγουν ένα βιώσιμο ΑΣΣ που μειώνει τη ρύπανση του αέρα λόγω της αξιοποίησής της. Ωστόσο, οι φυσικές ιδιότητες της σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων οδήγησαν σε υψηλότερη απαίτηση ποσότητας υπερρευστοποιητή προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ρεολογική συμπεριφορά [34]. Οι Siddique et al. ισχυρίστηκαν ότι η ενσωμάτωση της σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων στο σκυρόδεμα σε κατάλληλη αναλογία θα μπορούσε να έχει θετική επίδραση στην απορροφητικότητα και την αλκαλοπυριτική αντίδραση, ενώ δεν φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά ιδιότητες όπως η αντοχή σε θλίψη και κάμψη [35].

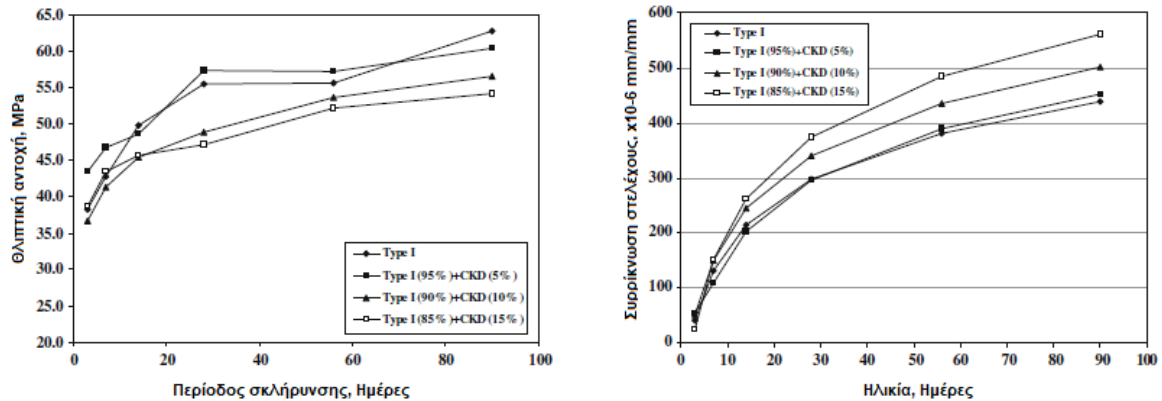
Οι Bagheri et al. χρησιμοποίησαν σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων και ιπτάμενη τέφρα σε διαφορετικές αναλογίες (0-40% και 0-30%, αντίστοιχα) προκειμένου να παραχθεί ένα οικολογικότερο σκυρόδεμα με βελτιωμένες ιδιότητες και στη νωπή αλλά και στη σκληρυμένη του κατάσταση. Η αντικατάσταση 20% τσιμέντου με 5% σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων και 15% ιπτάμενης τέφρας οδήγησε σε υψηλότερη θλιπτική αντοχή, ενώ σε μίγματα με παραπάνω από 20% σκόνη αποκονίωσης

περιστροφικών καμίνων η θλιπτική αντοχή μειώθηκε σημαντικά όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.15** (σε κάθε μίγμα ο αριθμός δίπλα από τα C, F και W, υποδηλώνει το ποσοστό της σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων, ιπτάμενης τέφρας σε νερό που περιέχει το κάθε μίγμα, αντίστοιχα [36]).



Σχήμα 1.15 Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής σε θλίψη μιγμάτων που περιέχουν συνδυασμό σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων και ιπτάμενης τέφρας, σε σχέση με την ηλικία.

Οι Maslehuddin et al. διερεύνησαν επίσης τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα σκυροδέματος που περιέχει 0 – 15% σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων. Η αύξηση του ποσοστού σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων μειώνει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Παρ’ όλα αυτά παρατηρήθηκε πως για αντικατάσταση τσιμέντου με σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων έως 5% δεν επηρεάστηκε σημαντικά αρνητικά ούτε η θλιπτική αντοχή, ούτε η συστολή ξήρανσης. Πιο συγκεκριμένα στο **Σχήμα 1.16** παρατηρείται η θλιπτική αντοχή και η συστολή ξήρανσης μιγμάτων που περιέχουν 5%, 10% και 15% ποσοστό σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων σε διαφορετικές ηλικίες δοκιμών σε σύγκριση με το μίγμα αναφοράς [37].

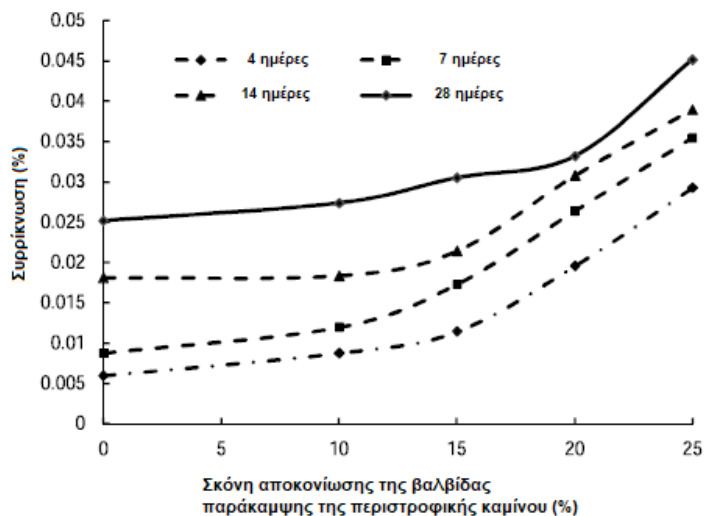


Σχήμα 1.16 Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής σε θλίψη και δοκιμής συρρίκνωσης μιγμάτων που περιέχουν σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων, σε σχέση με την ηλικία.

Επίσης, οι ιδιότητες ανθεκτικότητας όπως η διείδυση χλωριόντων και η ηλεκτρική αντίσταση τείνουν να επιδεινώνονται όταν το μίγμα ΑΣΣ περιέχει σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων και ειδικότερα σε υψηλότερο ποσοστό [37].

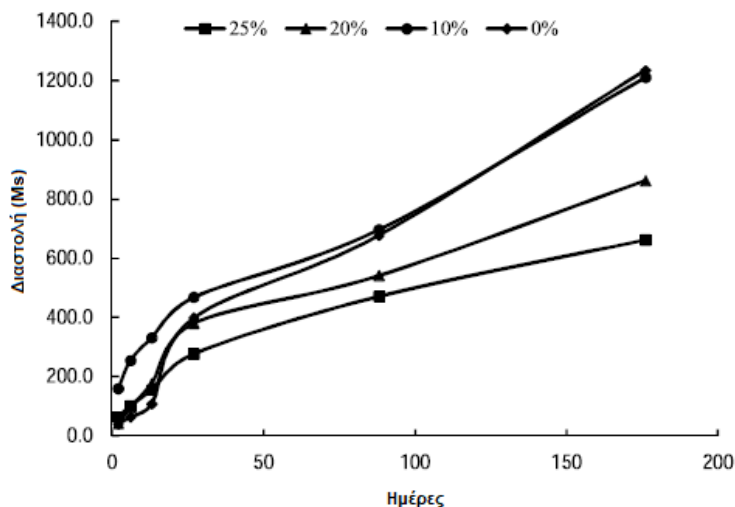
Οι Viacava et al. παρήγαγαν ΑΣΣ μεσαίας αντοχής αντικαθιστώντας το τσιμέντο με σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων σε ποσοστά 20% και 30%. Για αντικατάσταση τσιμέντου με σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων σε ποσοστό 20% παρατηρήθηκε η χαμηλότερη τάση απόμιξης και το υψηλότερο ιξώδες όσον αφορά στη δοκιμή απόμιξης και τη δοκιμή χόανης V αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η αύξηση του ποσοστού σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων οδηγεί σε μειωμένη θλιπτική αντοχή τόσο στα δοκίμια των 7 ημερών όσο και σε αυτά των 28 ημερών. Αυτή η μείωση είναι σημαντικά υψηλότερη όταν το ποσοστό αντικατάστασης είναι 30% σε σύγκριση με ποσοστό σκόνης αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων 20% [38].

Οι Ashteyat et al. παρήγαγαν πέντε συνθέσεις ΑΣΣ αντικαθιστώντας το τσιμέντο με σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (BPD) σε ποσοστό από 0 έως 25%, χωρίς να αντιμετωπίσουν κανένα πρόβλημα όσον αφορά την εργασιμότητα του κάθε μίγματος. Παρόλο που η θλιπτική αντοχή ήταν επαρκής, παρουσιάστηκε κλιμακούμενη μείωσή της ανάλογα με το BPD στη σύνθεση. Η συστολή ξήρανσης καθώς και οι μετρήσεις του τριχοειδούς πορώδους εμφανίστηκαν ελαφρώς αυξημένες λόγω της περιεκτικότητας σε BPD όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.17** [39].



Σχήμα 1.17 Διάγραμμα της συρρίκνωσης δοκιμών διαφορετικής ηλικίας μιγμάτων ΑΣΣ με διαφορετικό ποσοστό BPD ως λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό.

Το πορώδες μειώθηκε για αντικατάσταση τσιμέντου με σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου έως 10% ενώ το πιο ενθαρρυντικό αποτέλεσμα αφορούσε την αντίσταση του ΑΣΣ στην αντίδραση αλκαλίων-πυριτίας, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.18** [39].



Σχήμα 1.18 Αλκαλιοπυριτική αντίδραση μιγμάτων ΑΣΣ με διαφορετικό ποσοστό BPD ως λεπτόκοκκο πληρωτικό υλικό

2 Πειραματικό μέρος

2.1 Υλικά και Συνθέσεις ΑΣΣ

Αδρανή

Αδρανή υλικά ονομάζονται τα λίθινα, φυσικά ή βιομηχανικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα τεχνικά έργα είτε με άλλο συγκολλητικό υλικό ή αυτούσια. Τα αδρανή υλικά είναι οι περισσότερες χρησιμοποιούμενες φυσικές πρώτες ύλες στον πλανήτη. Ανάλογα με την προέλευση τους χωρίζονται σε φυσικά, συλλεκτά, τεχνητά ή ανακυκλούμενα. [40]

Τα αδρανή (που ονομάζονται έτσι γιατί είναι χημικά αδρανή προς το τσιμέντο) παίζουν καθοριστικό ρόλο κυρίως για το βάρος, το μέτρο ελαστικότητας και τη μεταβολή του όγκου του ΑΣΣ. Ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες για τις ιδιότητες του ΑΣΣ είναι το πορώδες, το σχήμα και η υφή των αδρανών. Τα συλλεκτά (ή φυσικά) αδρανή προέρχονται απευθείας από τη φύση και είναι γενικά στρογγυλόμορφα με λεία επιφάνεια. Αντίθετα, τα θραυστά αδρανή προέρχονται από τη θραύση πετρωμάτων και είναι γενικά κυβόμορφα, γωνιώδη, πλακοειδή ή επιμήκη με τραχεία επιφάνεια. Με εξαίρεση τα περισσότερα ελαφρά αδρανή με κυψελωτή δομή, τα αδρανή έχουν γενικά μεγαλύτερη αντοχή από τις άλλες φάσεις του σκυροδέματος, γι' αυτό και δεν επηρεάζουν την αντοχή του άμεσα αλλά έμμεσα, μέσω του σχήματος και του μεγέθους τους [43].

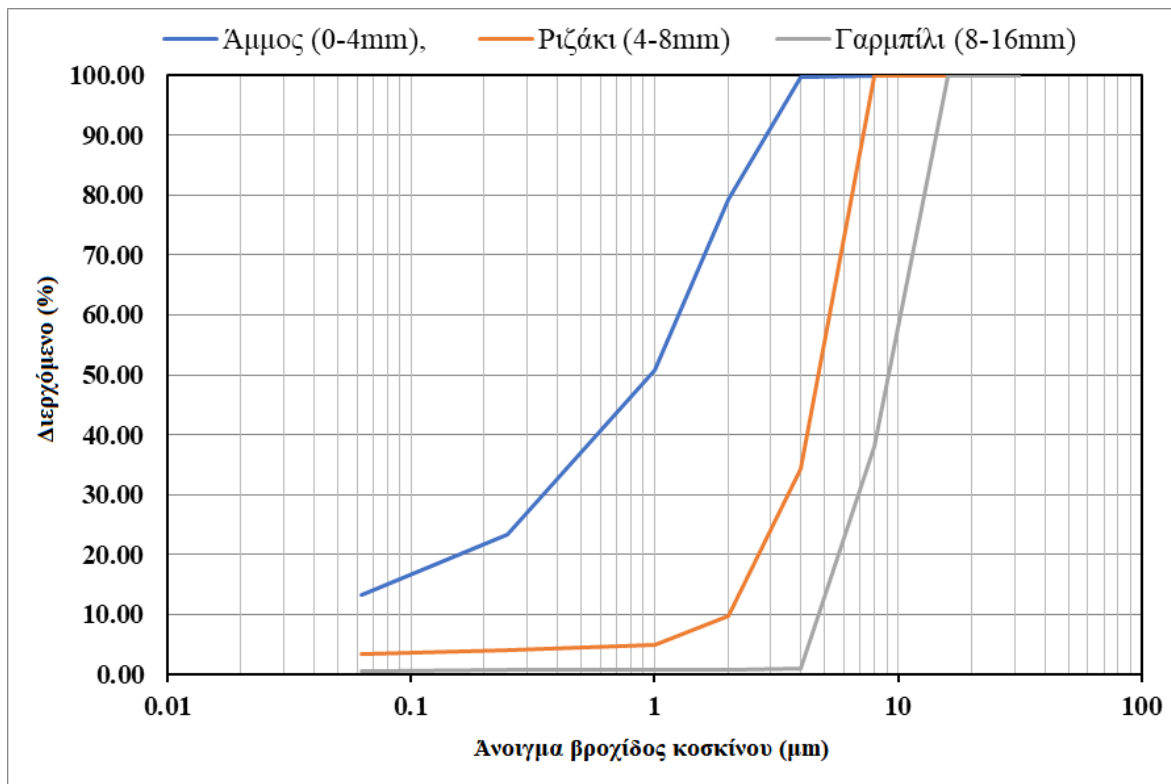
Για την παρασκευή ΑΣΣ με την προδιαγραφόμενη για κάθε έργο αντοχή επιβάλλεται χρήση αδρανών που έχουν κατάλληλη αντοχή και κοκκομετρική διαβάθμιση. Αδρανή που θρυμματίζονται ή χαράσσονται εύκολα θεωρούνται ακατάλληλα και η χρήση τους αποφεύγεται. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών επηρεάζει επίσης πολύ σημαντικά την αντοχή του ΑΣΣ που είναι μεγαλύτερη όταν ο όγκος του μίγματος περιέχει ελάχιστο ποσοστό κενών. Για ΑΣΣ με χαρακτηριστική αντοχή μεγαλύτερη από 16 MPa τα αδρανή πρέπει να είναι χωρισμένα σε τουλάχιστον τρία κλάσματα [42].

Ασβεστολιθικά αδρανή

Χρησιμοποιήθηκαν τρία κλάσματα ασβεστολιθικών αδρανών: άμμος (0-4mm), ριζάκι (4-8mm) και γαρμπίλι (8-16mm). Τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 και η κοκκομετρική τους διαβάθμιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1

Πίνακας.2.1 Χαρακτηριστικά των αδρανών ανά κοκκομετρία

Ασβεστολιθικά αδρανή ανά κοκκομετρία			
Μέγεθος κόκκου (mm)	0-4	4-8	8-16
Φαινόμενο ειδικό βάρος	2.71	2.71	2.71
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος	6.65	6.65	2.55
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος, εν κορεσμού	2.67	2.67	2.61



Σχήμα 2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των λεπτόκοκκων και των χονδρόκοκκων αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν.

Τσιμέντο

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή όλων των συνθέσεων σκυροδέματος ήταν τσιμέντο τύπου Portland. Το τσιμέντο τύπου Portland που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι βιομηχανικό προϊόν σε μορφή γκριζοπράσινης σκόνης που αποτελείται από κόκκους διαστάσεων 1-50 μm. Παρασκευάζεται με άλεση σβόλων διαμέτρου λίγων εκατοστών που λέγονται κλίνκερ με μικρή ποσότητα άλλων προσμίξεων (π.χ. γύψος, μηλαϊκή γη, θηραϊκή γη, ιπτάμενη τέφρα κ.α.). Το κλίνκερ αποτελείται κυρίως από τέσσερις βασικές σύνθετες χημικές ενώσεις σε ποσοστά που συνήθως βρίσκονται στα παρακάτω όρια και με την εξής χημική σύσταση: 40-80% C₃S (πυριτικό τριασβέστιο), 0-30% C₂S (πυριτικό διασβέστιο), 7-15% C₃A (αργιλικό τριασβέστιο) και 4-15% C₄AF (αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο). [41,45] Πιο συγκεκριμένα στην εργασία χρησιμοποιήθηκε τύπος τσιμέντου CEM I 42.5R σύμφωνα με το πρότυπο EN 12620:2013 με ειδικό βάρος 3150 kg/m³ και ειδική επιφάνεια 3470 cm²/g, η χημική ανάλυση του οποίου παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.2** και η κοκκομετρική του διαβάθμιση στο **Σχήμα 2.2**.

Νερό

Το νερό αναμείξεως τσιμέντου και αδρανών για την παρασκευή ΑΣΣ πρέπει να είναι καθαρό και απαλλαγμένο από επιβλαβείς ουσίες που μπορούν να προκαλέσουν μείωση της αντοχής του σκυροδέματος ή διάβρωση του οπλισμού. Το πόσιμο νερό του δικτύου ύδρευσης καθώς και κάθε πηγή φυσικού νερού χωρίς επιβλαβείς ουσίες θεωρούνται κατάλληλα. Τέτοιες επιβλαβείς ουσίες μπορούν να θεωρηθούν τα οργανικά ή ανόργανα στερεά ή θεϊκά άλατα. Το νερό των βάλτων ή των βιομηχανικών αποβλήτων, ακόμα και αν φαίνεται διαυγές, είναι ακατάλληλο. Το θαλασσινό νερό λόγω των αλάτων που περιέχει πρέπει επίσης να αποφεύγεται για την παρασκευή ΑΣΣ, εκτός αν κάτι διαφορετικό προβλέπεται στη σύμβαση του έργου. Το νερό που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία προήλθε από δίκτυο ύδρευσης, είχε pH 7, θερμοκρασία 20°C και ήταν απαλλαγμένο από επιβλαβείς ουσίες [42,45].

Λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά

Η συμπεριφορά τεσσάρων διαφορετικών λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών διερευνήθηκε στις συνθέσεις ΑΣΣ της συγκεκριμένης εργασίας.

Μαρμαρόσκονη (MP)

Η μαρμαρόσκονη είναι λεπτόκοκκο φυσικό κρυσταλλικό ανθρακικό ασβέστιο, υψηλής λευκότητας, που προέρχεται από το κοίτασμα λευκού μαρμάρου στο Διόνυσο Αττικής. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκε μαρμαρόσκονη της εταιρίας Dionyssomarble Group με εμπορική ονομασία Novocarb 20. Το ειδικό βάρος της είναι 2700 kg/m³ και η ειδική επιφάνειά της είναι 12700 cm²/g. Η χημική ανάλυση της μαρμαρόσκονης οποιού παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.2** και η κοκκομετρική της διαβάθμιση στο **Σχήμα 2.2** [44].

Σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων (CKD)

Η σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων είναι παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου και αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη. Περιέχει επίσης χαλαζία, δολομίτη, αλβίτη, καολινίτη και ιλίτη. Το ειδικό βάρος της είναι 2700 kg/m³ και η ειδική επιφάνεια της είναι 25000 cm²/g. Η χημική της ανάλυση παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.2** και η κοκκομετρική της διαβάθμιση στο **Σχήμα 2.2**.

Σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (BPD)

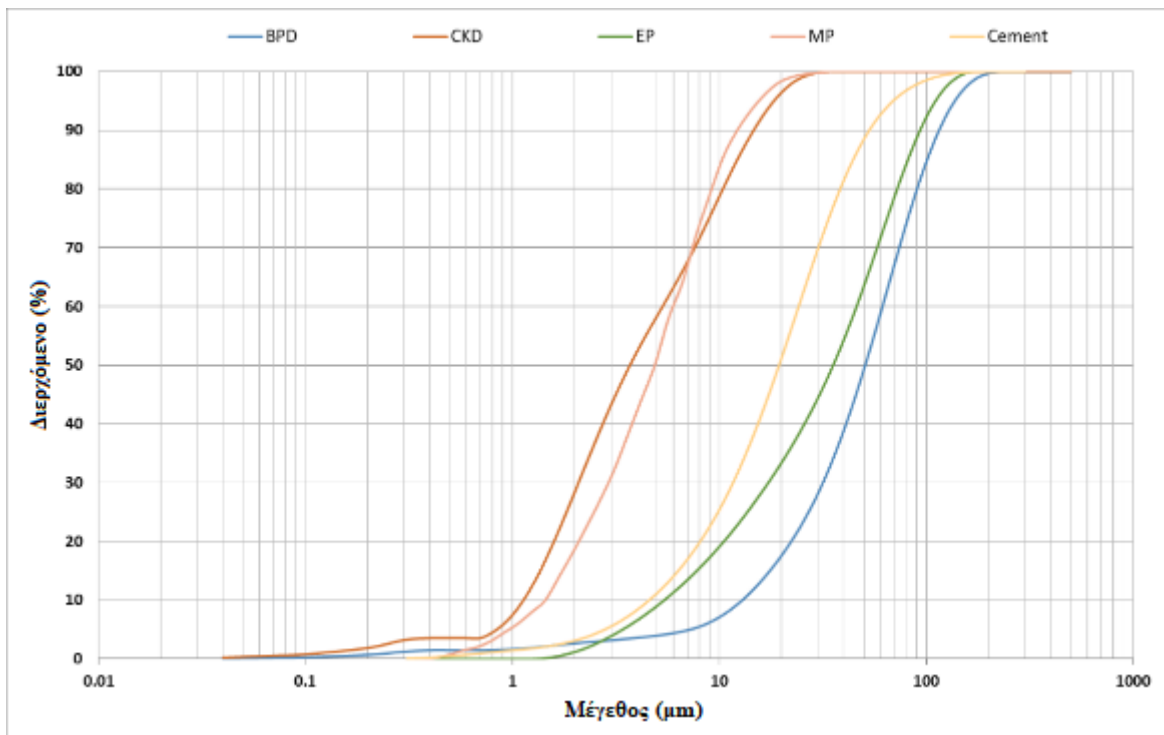
Η σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου είναι επίσης παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου και περιέχει κυρίως άσβεστο, ενώ η ύπαρξη ανυδρίτη, σανιδίνου και χλωριούχου κάλιου (KCl) είναι σημαντικό να αναφερθούν λόγω της περιεκτικότητας τους σε SO_4^{2-} , αλκάλια και Cl⁻ αντίστοιχα. Επίσης, στη σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου ανιχνεύονται ψήγματα κλίνκερ, κυρίως C_2S . Το ειδικό βάρος της είναι 2800 kg/m^3 και η ειδική επιφάνεια της είναι $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Η χημική της ανάλυση παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.2** και η κοκκομετρική της διαβάθμιση στο **Σχήμα 2.2**.

Σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP)

Τα σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη αποτελούν άμορφο πυριτικό υλικό. Πιο συγκεκριμένα, το υλικό τροφοδοσίας που συλλέγεται από τις αποθήκες των γραμμών παραγωγής διογκώνεται σε μικροσφαιρίδια χρησιμοποιώντας έναν κατακόρυφο ηλεκτρικό κλίβανο και εφαρμόζοντας τεχνολογία έμμεσης θέρμανσης επιτυγχάνεται η θερμική επεξεργασία των πολύ λεπτών σωματιδίων του περλίτη [46]. Σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο διαστολής, αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την επεξεργασία εξαιρετικά λεπτών υλικών ($-90 \mu\text{m}$) και μέσω του ακριβούς ελέγχου της θερμοκρασίας ($1000 \text{ }^\circ\text{C}$), η παραγωγή υλικού έχει βελτιωθεί στο επιθυμητό επίπεδο [47]. Το ειδικό βάρος τους είναι 1500 kg/m^3 και η ειδική επιφάνεια τους είναι $2335 \text{ cm}^2/\text{g}$. Η χημική ανάλυση του περλίτη (EP) παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.2** και η κοκκομετρική του διαβάθμιση στο **Σχήμα 2.2**.

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

	Cement	MP20	CKD	BPD	EP
SiO ₂	19.02	0.35	10.18	19.39	74.91
Al ₂ O ₃	4.59	-	3.64	5.13	10.47
Fe ₂ O ₃	3.63	0.07	2.06	3.46	0.97
CaO	63.43	55.41	43.53	52.73	1.02
MgO	2.02	0.76	1.31	2.22	0.16
MnO	-	0.01	-	-	-
SO ₃	3.48	-	1.18	6.73	-
K ₂ O	0.47	-	1.71	4.84	5.77
Na ₂ O	0.28	-	0.37	0.46	3.80
P ₂ O ₅	0.17	-	-	-	-
TiO ₂	0.28	-	-	-	0.09
Cl	-	-	0.35	2.16	-
LOI	2.62	43.40	35.65	2.88	2.82



Σχήμα 2.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση του τσιμέντου και των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών.

Χημικά πρόσμικτα

Όπως περιγράφηκε και στην Ενότητα 1.2 τα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται στη σύνθεση των μίγμάτων ΑΣΣ είναι οι υπερρευστοποιητές – superplasticizers (SP) και οι ρυθμιστές ιξώδους – viscosity modifying agents (VMA) και στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα εξής [48] :

Υπερρευστοποιητής – Superplasticizer (SP)

Ο υπερρευστοποιητής CHEMIUM NT 2 της εταιρίας DOMYLCO Construction Chemicals ο οποίος είναι υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυμερών έτοιμο για χρήση, πολύ μεγάλης απόδοσης τόσο σε ρευστότητα όσο και σε διάρκεια ρευστότητας και πληροί την προδιαγραφή EN 934-2. Ο συγκεκριμένος ρευστοποιητής είναι ιδανικό πρόσθετο για σκυροδέματα μεγάλων απαιτήσεων όπως π.χ. με πολύ χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντου. Έχοντας αυτήν τη δυνατότητα χρησιμοποιείται στην παραγωγή βιομηχανικού σκυροδέματος επιτυγχάνοντας πολύ υψηλές πρώιμες και τελικές αντοχές και υψηλή πυκνότητα σκυροδέματος. Προσδίδει ρευστότητα πολύ μεγάλης διάρκειας (1-2 ώρες στο 20°C) και για αυτό το λόγο προστίθεται αποκλειστικά στον αναμεικτήρα της μονάδας παραγωγής [49].

Ρυθμιστής ιξώδους – Viscosity Modifying Agents (VMA)

Ο ρυθμιστής ιξώδους CHEMIUM VMA της εταιρίας DOMYLCO Construction Chemicals. Το CHEMIUM VMA είναι υδατικό διάλυμα χαμηλού ιξώδους, έτοιμο για χρήση, πολύ μεγάλης απόδοσης σε ρεολογικές ιδιότητες. Σε συνδυασμό με τους υπερρυστοποιητές της σειράς CHEMIUM πληροί την προδιαγραφή EN 934-2. Το CHEMIUM VMA είναι ιδανικό πρόσθετο για νέας τεχνολογίας αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα. Επιτυγχάνει παράλληλα βελτίωση της αντλησιμότητας, και μεγάλη συνοχή του νωπού σκυροδέματος. Το CHEMIUM VMA προστίθεται στο σκυροδέμα που περιέχει υπερρυστοποιητή της σειράς CHEMIUM αφού όλες οι α' ύλες έχουν αναμειχθεί και δε συνιστάται η προανάμειξή του με άλλα πρόσθετα [50].

Συνθέσεις ΑΣΣ

Παρασκευάστηκαν τέσσερα (4) μίγματα ΑΣΣ με σταθερή αναλογία ενεργού νερού προς τσιμέντο (W/C) και ενεργού νερού προς σκόνη () με τιμές 0.60 και 0.45, αντίστοιχα. Το μίγμα αναφοράς περιέχει 200 kg/m³ μαρμαρόσκηνη, η οποία στις υπόλοιπες συνθέσεις, αντικαταστάθηκε σε ποσοστό 50% κ.ο. από άλλα λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά. Τονίζεται ότι στην περίπτωση των σφαιριδίων διογκωμένου περλίτη (EP), το ποσοστό της αντικατάστασης δεν υπολογίστηκε κατά βάρος αλλά κατ' όγκο λόγω της σχετικά χαμηλής πυκνότητας του σκελετού σε σύγκριση με τη μαρμαρόσκηνη. Όλα τα υπόλοιπα συστατικά του ΑΣΣ (τσιμέντο, νερό, λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή) διατηρήθηκαν σταθερά, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2.3**.

Για την κατάλληλη ανάμιξη και παραγωγή όλων των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκε αναμικτήρας πλανητικού τύπου με περιστρεφόμενες λεπίδες, χωρητικότητας 100 L όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.1**. Για κάθε σύνθεση ΑΣΣ παρασκευάστηκε ένα μίγμα 40 L με την ακόλουθη διαδικασία: όλα τα ξηρά συστατικά (χονδρόκοκκα αδρανή, λεπτόκοκκα αδρανή, τσιμέντο και λεπτόκοκκο υλικό πλήρωσης) εισήχθησαν στον αναμικτήρα με τη σειρά, ξεκινώντας από το πιο χονδρόκοκκα υλικά και καταλήγοντας στα πιο λεπτόκοκκα, και αναμείχθηκαν για 60 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια προστέθηκε το 80% της συνολικής ποσότητας νερού και το μίγμα αναμείχθηκε για 180 δευτερόλεπτα. Τέλος, το υπόλοιπο 20% του συνολικού νερού αναμειγμένο με την αρχική δοσολογία υπερρυστοποιητή (SP) προστέθηκε και ακολούθησε ανάμειξη για 60 δευτερόλεπτα. Για κάθε επιπλέον δοσολογία χημικών πρόσθετων (SP ή VMA), πραγματοποιήθηκε ανάμιξη 60 δευτερολέπτων. Στην Εικόνα παρουσιάζονται ενδεικτικές φωτογραφίες από τη διαδικασία σύνθεσης και ανάμιξης των υλικών του ΑΣΣ.

Πίνακας 2.3 Αναλογίες των συστατικών που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε σύνθεση ΑΣΣ

	W/C	W/P	Ποσότητες (kg/m ³)						
			Νερό	Τσιμέντο	MP	Εναλλακτικό πλ. υλικό	Άμμος (0-4mm)	Ριζάκι (4-8mm)	Γαρμπύλι (8-16mm)
MP	0.60	0.45	180	300	200	0	900	557	239
CKD	0.60	0.45	180	300	100	100	900	557	239
BPD	0.60	0.45	180	300	100	100	900	557	239
EP	0.60	0.45	180	300	100	55	900	557	239



Εικόνα 2.1 Ενδεικτικές φωτογραφίες από τη διαδικασία σύνθεσης και ανάμιξης των υλικών του ΑΣΣ όπως πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο.

Για τη χύτευση όλων των παραγόμενων συνθέσεων ΑΣΣ χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες μήτρες σε κατάλληλες διαστάσεις για κάθε δοκιμή. Πιο συγκεκριμένα για κάθε σύνθεση ΑΣΣ χρησιμοποιήθηκαν 13 κυβικές μήτρες των 100 mm, 6 κυλινδρικές μήτρες Φ100 και 2 πρισματικές μήτρες διαστάσεων 100 mm x 100 mm x 500 mm (**Εικόνα 2.2**). Τα δείγματα αποχτυτεύτηκαν μετά από 24 ώρες και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε νερό στους 20°C μέχρι την ηλικία δοκιμής, σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

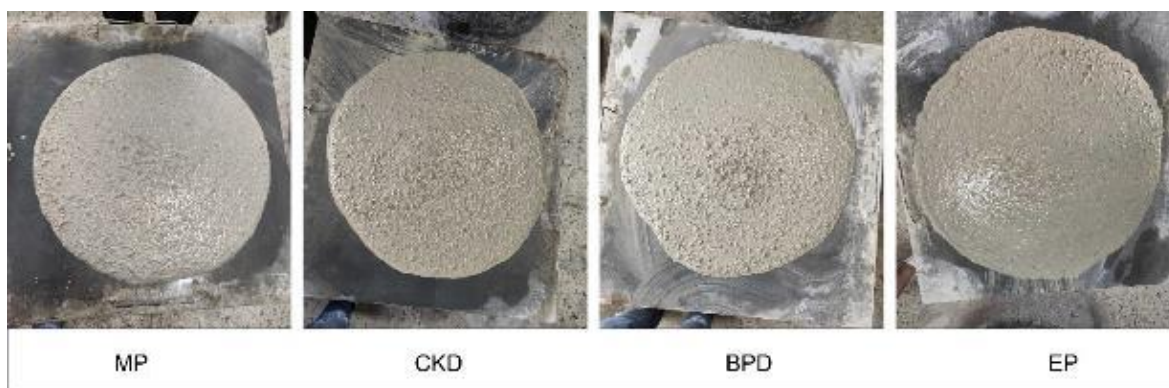


Εικόνα 2.2 Φωτογραφία των χαλύβδινων μητρών που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την παρούσα εργασία

2.2 Μέθοδοι και διαδικασίες

2.2.1 Δοκιμές νωπού ΑΣΣ

Για να διερευνηθεί η ρεολογική συμπεριφορά του κάθε μίγματος ΑΣΣ εφαρμόστηκε αρχικά η δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης και μετρήθηκε ο χρόνος εξάπλωσης ακολουθώντας τη διαδικασία που αναλύθηκε στην Ενότητα 1.4 σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8. Η δοσολογία του υπερρευστοποιητή (SP) προσδιορίστηκε με δοκιμές για κάθε μίγμα ώστε η διάμετρος που προκύπτει από τη δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης να είναι μεταξύ 690 – 710 mm, ενώ ρυθμιστής ιξώδους (VMA) χρησιμοποιήθηκε μόνο στις περιπτώσεις που παρατηρήθηκαν τάσεις απόμιξης/διαχωρισμού. Στην **Εικόνα 2.3** παρουσιάζεται η δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης και για τις τέσσερις συνθέσεις ΑΣΣ. Πρέπει να σημειωθεί πως η μικρή στεφάνη που διακρίνεται στην εξαπλωμένη επιφάνεια της σύνθεσης που περιείχε EP οφείλεται στην περίσσεια νερού πάνω στην πλάκα και όχι σε απόμιξη του μίγματος.



Εικόνα 2.3 Δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης των διαφορετικών συνθέσεων ΑΣΣ

Στη συνέχεια, ακολούθησε η δοκιμή χοάνης 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 ακολουθώντας τις διαδικασίες που περιεγράφηκαν για την κάθε δοκιμή στην Ενότητα 1.4 [19-23]. Ενδεικτικές φωτογραφίες για τις παραπάνω δοκιμές παρουσιάζονται παρακάτω στην **Εικόνα 2.4**, **Εικόνα 2.5** και **Εικόνα 2.6** αντίστοιχα για τη δοκιμή χοάνης V, τη δοκιμή δοχείου L και τη δοκιμή δακτυλίου J.



Εικόνα 2.4 Ενδεικτική φωτογραφία από τη δοκιμή χοάνης V.



Εικόνα 2.5 Ενδεικτικές φωτογραφίες από τη δοκιμή δοχείου L (L-Box).



Εικόνα 2.6 Ενδεικτικές φωτογραφίες από τη δοκιμή δακτυλίου J (J-Ring).

Παράλληλα με τις παραπάνω δοκιμές και σύμφωνα με τα πρότυπα EN 12350-11, EN 12350-6 και 12350-7, ακολουθήθηκαν οι διαδικασίες της δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης (**Εικόνα 2.7**) καθώς και η μέτρηση της πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε αέρα του ΑΣΣ αντίστοιχα [24,25].



Εικόνα 2.7 Ενδεικτική φωτογραφία της δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης (sieve segregation resistance ή sieve stability test).

2.2.2 Δοκιμές σκληρυμένου ΑΣΣ

Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-3 σε τρία κυβικά δοκίμια 100 x 100 x 100 mm³ ανά ηλικία 7, 28 και 90 ημερών. Ο ρυθμός αύξησης του φορτίου που εφαρμόστηκε ήταν 4.5 KN/sec. Στην **Εικόνα 2.8**, παρουσιάζονται ενδεικτικές φωτογραφίες από τη δοκιμή θλίψης όπως πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο.



Εικόνα 2.8 Ενδεικτικές φωτογραφίες από τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής.

Επιπλέον, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής σε δύο κυβικά δοκίμια 100x100x100mm³ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 300°C για δύο ώρες καθώς και άλλα δύο κυβικά δοκίμια 100x100x100mm³ που εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 400°C για δύο ώρες [26]. Όπως και στη δοκιμή θλιπτικής αντοχής σε απλά κυβικά δοκίμια, έτσι και σε αυτή τη δοκιμή ο ρυθμός αύξησης του φορτίου που εφαρμόστηκε ήταν 4.5 KN/sec. Στην **Εικόνα 2.9** ενδεικτικά εμφανίζονται δύο δοκίμια κατά την τοποθέτησή τους μέσα στον κλίβανο, ενώ στην **Εικόνα 2.10** παρουσιάζονται τα κυβικά δοκίμια των συνθέσεων αναφοράς, CKD και BPD μετά την έκθεσή τους σε θερμοκρασία 400°C.



Εικόνα 2.9 Ενδεικτική φωτογραφία κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στον κλίβανο



Εικόνα 2.10 Κυβικά δοκίμια των συνθέσεων MP, CKD και BPD έπειτα από έκθεση σε θερμοκρασία 400°C για 2 ώρες.

Η δοκιμή εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης και η δοκιμή για τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας διεξήχθησαν σύμφωνα με τα πρότυπα EN 12390-6 και ASTM C 469 σε κυλινδρικά δοκίμια ακτίνας 100mm και ύψους 200mm σε ηλικία 90 και 28 ημερών αντίστοιχα για την κάθε δοκιμή. Συγκεκριμένα για τη δοκιμή εφελκυστικής αντοχής μέσω διάρρηξης ο ρυθμός αύξησης του φορτίου που εφαρμόστηκε ήταν 1.5 KN/sec. Στην **Εικόνα 2.11** παρουσιάζεται μία ενδεικτική φωτογραφία από τη δοκιμή διάρρηξης (α) και μία από τη δοκιμή του μέτρου ελαστικότητας (β) , όπως πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Στην **Εικόνα 2.12** παρουσιάζονται επίσης δύο στιγμιότυπα από το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης της

δοκιμής του μέτρου ελαστικότητας. Μετά τη διάρρηξη, παρατηρήθηκαν τυχόντα σημάδια επίστρωσης πάστας ή κονιάματος στο πάνω μέρος του κυλινδρικού δοκιμίου ή οποιαδήποτε διαφορά στην κατανομή των χονδρόκοκκων και των λεπτόκοκκων αδρανών καθ' ύψος και προσδιορίστηκε ο οπτικός δείκτης σταθερότητας (VSI) σύμφωνα με τα κριτήρια που αναλύθηκαν στην Ενότητα 1.5 [28].

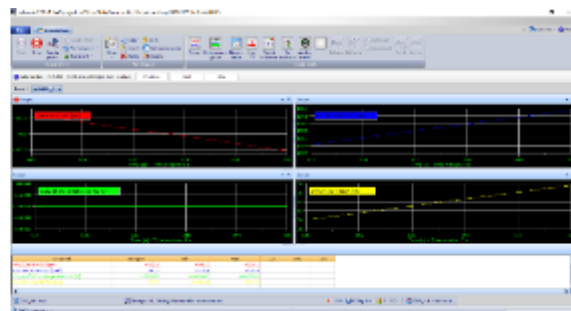
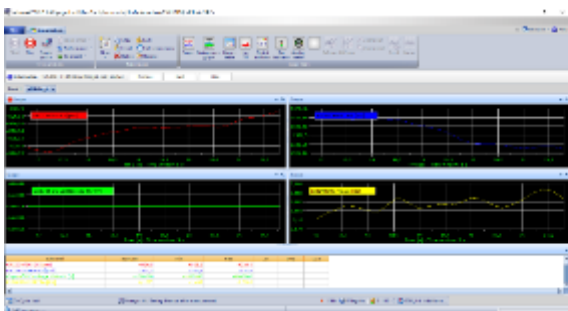


(α)



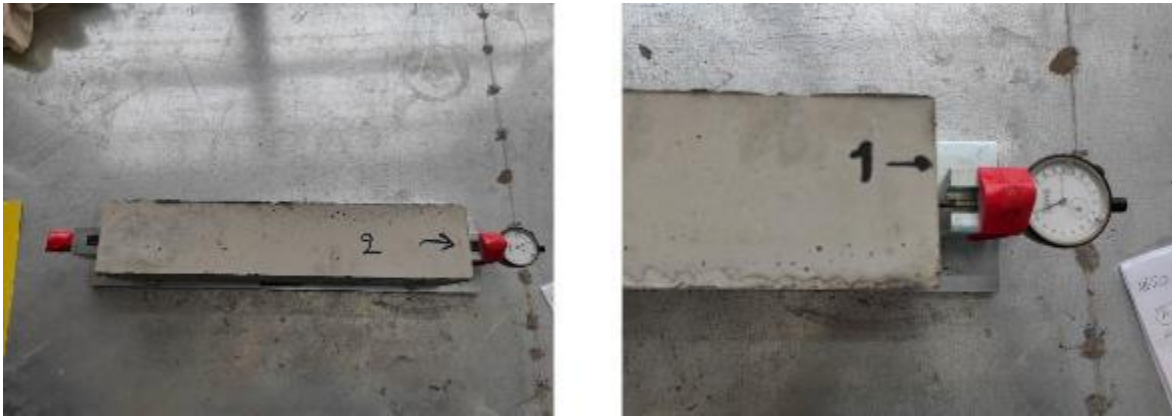
(β)

Εικόνα 2.11 Ενδεικτική φωτογραφία (α) της δοκιμής εφελκυστικής διάρρηξης και (β) της δοκιμής προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας.



Εικόνα 2.12 Στιγμιότυπα από το πρόγραμμα καταγραφής που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης της δοκιμής του μέτρου ελαστικότητας.

Τέλος, για τη μέτρηση της συρρίκνωσης και της απώλειας μάζας χρησιμοποιήθηκαν πρίσματα διαστάσεων $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$ σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-16 και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ηλικίες 7, 14, 28 και 90 ημερών, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.13**. Τα ίδια πρίσματα χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή κάμψης σε ηλικία 90 ημερών, σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-5 όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 1.5 και ο ρυθμός αύξησης του φορτίου που εφαρμόστηκε ήταν 1.67 KN/sec [29,30]. Μια ενδεικτική δοκιμή κάμψης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.14**.



Εικόνα 2.13 Μέτρηση της συστολής ξήρανσης ενός πρισματικού δοκιμίου.



Εικόνα 2.14 Δοκιμή κάμψης πρισματικού δοκιμίου ηλικίας 90 ημερών.

3 Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

3.1 Αποτελέσματα των δοκιμών νωπού ΑΣΣ

Όλες οι ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ που μετρήθηκαν μετά τη διαδικασία σύνθεσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται επίσης, οι δοσολογίες του υπερρευστοποιητή (SP) και του ρυθμιστή ιξώδους (VMA) που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε σύνθεση αλλά και το μοναδιαίο βάρος της σύνθεσης.

Πίνακας 3.1 Δοσολογία χημικών πρόσμικτων και αποτελέσματα δοκιμών νωπού ΑΣΣ

	MP	CKD	BPD	EP
SP / Τσιμέντο (%)	1.65	2.42	3.12	1.60
VMA / Τσιμέντο (%)	0.00	0.00	0.30	0.00
Μοναδιαίο Βάρος (kg/m ³)	2411	2365	2403	2364
Εξάπλωση – SF (mm)	705.0	697.5	690.0	702.5
T ₅₀₀ (sec)	3.35	2.50	5.60	4.09
Χρόνος εκκένωσης – VF (sec)	12.71	22.75	28.49	14.82
J-Ring – Εξάπλωση (mm)	665.0	622.5	630.0	590.0
J-Ring – ΔΗ (mm)	22.5	21.3	25.0	27.5
U-Box	0.84	0.79	0.77	0.89
L-Box	0.86	0.87	0.50	0.64
Sieve Segregation (%)	3.80	1.30	1.50	1.60
Περιεχόμενος αέρας (%)	2.20	2.50	1.80	2.00

Δεδομένου ότι όλες οι συνθέσεις ανήκουν στην κατηγορία SF2 και πιο συγκεκριμένα είχαν ανεμπόδιστη εξάπλωση εύρους 690-710 mm, η δοσολογία υπερρευστοποιητή θα μπορούσε να επηρεάσει σημαντικά, τόσο τη ρεολογική συμπεριφορά κάθε μίγματος, όσο και την επίδραση του κάθε λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού στην τάση διαρροής του ΑΣΣ.

Ρυθμιστής ιξώδους (VMA) προστέθηκε μόνο σε μίγματα που έδειξαν τάση απόμιξης. Ειδικότερα, η μόνη σύνθεση στην οποία προστέθηκε δόση VMA σε ποσοστό 0.3% ήταν αυτή που περιείχε BPD. Η συγκεκριμένη σύνθεση απαίτησε το υψηλότερο ποσοστό SP (3.12%) προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εξάπλωση. Αντίθετα, η σύνθεση που

περιείχε EP καθώς και το μίγμα αναφοράς (MP) είχαν τη χαμηλότερη απαίτηση σε SP με ποσοστό 1.60% και 1.65% αντίστοιχα. Σε αυτές τις δύο συνθέσεις μάλιστα, παρατηρήθηκε και το χαμηλότερο ιξώδες όπως φαίνεται έμμεσα από τον χρόνο εκκένωσης της δοκιμής χοάνης V με 14.82 και 12.71 δευτερόλεπτα αντίστοιχα για τα δύο μίγματα. Το μίγμα που περιείχε BPD ήταν το μόνο που ξεπέρασε το όριο των 25 δευτερολέπτων στη δοκιμή χοάνης V, ενώ το αυξημένο ιξώδες του μίγματος συγκρινόμενο με τα υπόλοιπα λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά επαληθεύεται επίσης από το ότι είχε το μεγαλύτερο χρόνο εξάπλωσης T_{500} , με τιμή 5.6 δευτερόλεπτα. Παρ' όλ' αυτά, όλα τα μίγματα σύμφωνα με τους χρόνους εξάπλωσης T_{500} ταξινομούνται στην κατηγορία ιξώδους VS2. Η αρνητική επίδραση του BPD στη ρεολογία του σκυροδέματος θα μπορούσε να εξηγηθεί από τη χαμηλή στρογγυλότητα των σωματιδίων του σε αντίθεση με την υψηλή στρογγυλότητα των σφαιρικών σωματιδίων EP που έχουν θετική επίδραση στις ρεολογικές ιδιότητες του ΑΣΣ.

Όσον αφορά στη δοκιμή σταθερότητας μέσω κοσκίνισης, όλα τα μίγματα ΑΣΣ βρίσκονται στο επιτρεπόμενο εύρος, με το μίγμα αναφοράς (MP) να δείχνει ελαφρώς υψηλότερη τάση απόμιξης απέχοντας όμως σημαντικά από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο του 20%.

Τα διαφορετικά λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά και η αντίστοιχη αλλαγή στην απαίτηση των χημικών προσμίκτων δεν επηρέασε σημαντικά ούτε την περιεκτικότητα του αέρα αλλά ούτε και την πυκνότητα του νωπού ΑΣΣ, καθώς σε όλα τα μίγματα οι τιμές τους κυμάνθηκαν μεταξύ 1.80% και 2.50% και μεταξύ 2364 kg/m^3 και 2411 kg/m^3 αντίστοιχα όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3.1** [12]. Οι χαμηλές αποκλίσεις στα μοναδιαία βάρη των μιγμάτων παρά τις διαφοροποιήσεις στη φαινόμενη πυκνότητα κόκκου μπορούν να εξηγηθούν από τη σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά.

3.2 Αποτελέσματα των δοκιμών σκληρυμένου ΑΣΣ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής θλιπτικής αντοχής παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.2**, **Πίνακα 3.3** και **Πίνακα 3.4** αντίστοιχα για ηλικία δοκιμών 7, 28 και 90 ημερών. Επίσης, στο **Σχήμα 3.1** παρουσιάζεται διαγραμματικά η θλιπτική αντοχή των 7, 28 και 90 ημερών και για τις τέσσερις συνθέσεις ΑΣΣ. Παρατηρείται ότι το μίγμα αναφοράς και το μίγμα που περιέχει CKD έχουν πολύ κοντινά αποτελέσματα στις δοκιμές ηλικίας 7 και 28 ημερών. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές τους για την ηλικία των 7 ημερών είναι 45.15 MPa και 47.90 MPa αντίστοιχα ενώ για τη δοκιμή ηλικίας 28 ημερών οι τιμές τους είναι 50.16 MPa και 54.18 MPa αντίστοιχα. Το μίγμα που περιείχε BPD ανέπτυξε τις υψηλότερες θλιπτικές αντοχές με τιμές 65.67 MPa και 73.26 MPa αντίστοιχα για τις δοκιμές ηλικίας 7 και 28 ημερών. Το μίγμα που περιείχε EP από την άλλη, παρουσίασε υψηλότερη θλιπτική αντοχή συγκριτικά με το μίγμα αναφοράς, με τιμές 53.81 MPa και 63.23 MPa αντίστοιχα για τις δοκιμές ηλικίας 7 και 28 ημερών. Στην ηλικία των 90 ημερών, η αντοχή σε θλίψη του μίγματος αναφοράς και του μίγματος που περιείχε CKD αυξήθηκε ελαφρώς σε σύγκριση με εκείνη των 28 ημερών, γεγονός που θα μπορούσε να υποδηλώνει την απουσία ποζολανικής δραστηριότητας των συγκεκριμένων λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών. Αντιθέτως, τα μίγματα που περιείχαν EP και BPD παρουσίασαν δραστηριότητα, με αποτέλεσμα η αναλογία της θλιπτικής αντοχής των 90 ημερών προς αυτή των 28 ημερών να είναι περίπου 1.16 όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.2**. Όσον αφορά συγκεκριμένα στο μίγμα που περιείχε EP, αναμενόταν αύξηση της θλιπτικής αντοχής με τον χρόνο, λόγω της υψηλής ποζολανικής φύσης του υλικού, της υψηλής περιεκτικότητας του σε SiO_2 και Al_2O_3 καθώς και των αντιδράσεων με πορτλαντίτη κατά την ενυδάτωση, που οδηγούν σε σχηματισμό μεγαλύτερης ποσότητας C-S-H και ενώσεων C-S-A-H [33,51].

Τα ευρήματα των El Mir et al. θα μπορούσαν να ενισχύσουν αυτά τα αποτελέσματα καθώς η θλιπτική αντοχή που μετρήθηκε για δοκίμια μεγάλης ηλικίας που περιείχαν EP ήταν 53% υψηλότερη από αυτά που περιείχαν το ίδιο ποσοστό σε ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό, ενώ η διαφορά ήταν λιγότερο αισθητή στις ηλικίες των 28 και 56 ημερών με 19% και 22% αντίστοιχα [52]. Η προσθήκη BPD βελτίωσε την θλιπτική αντοχή σε όλες τις ηλικίες δοκιμής, λόγω του συνδυασμού γύψου και ανυδρίτη που περιέχονται στο τσιμέντο και στο BPD αντίστοιχα. Τα παραπάνω, επίσης, συμβάλλουν θετικά στην ανάπτυξη της αντοχής, καθώς όσο πιο γρήγορα συμβαίνει η ενυδάτωση του C₃S τόσο πιο πυκνή είναι η τσιμεντοκονία που παράγεται [53]. Στην περίπτωση ενσωμάτωσης CKD στο ΑΣΣ, οι Najim et al. ερμήνευσαν τη μείωση της αντοχής που σημειώθηκε ως αποτέλεσμα της υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστη, καθώς και την επακόλουθη αντίδραση με το νερό που αυξάνει την ποσότητα Ca(OH)₂ και ως αποτέλεσμα αυξάνονται το πορώδες και οι εσωτερικές τάσεις [54].

Πίνακας 3.2 Μάζα, θλιπτική αντοχή, μέση θλιπτική αντοχή και τυπική απόκλιση (τ.α.) δοκιμίων ηλικίας 7 ημερών.

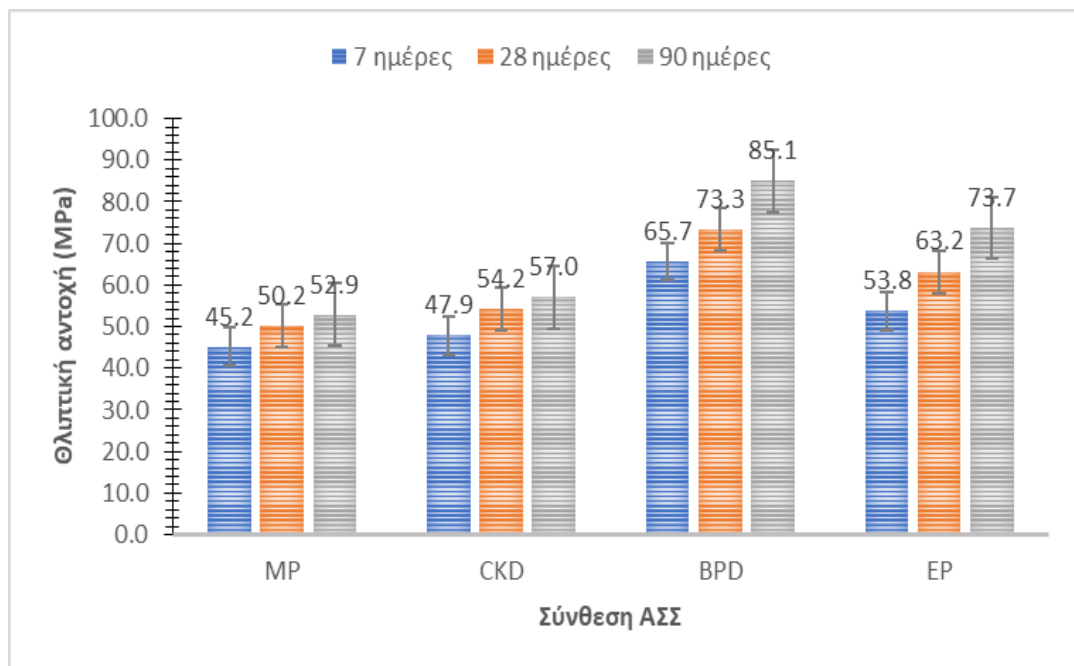
		7d							
α/ α	ΚΩΔ.	M1 (kg)	M2 (kg)	M3 (kg)	F1 (MPa)	F2 (MPa)	F3 (MPa)	τ.α. (MPa)	Μέση αντοχή (MPa)
1	MP	2408.72	2384.76	2374.87	45.47	44.85	45.13	0.31	45.15
2	CKD	2381.98	2371.12	2361.61	48.01	47.66	47.98	0.20	47.89
3	BPD	2429.97	2445.17	2443.71	66.13	65.10	65.76	0.52	65.67
4	EP	2383.02	2361.97	2369.93	52.59	54.21	54.60	1.06	53.81

Πίνακας 3.3 Μάζα, θλιπτική αντοχή, μέση θλιπτική αντοχή και τυπική απόκλιση (τ.α.) δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών

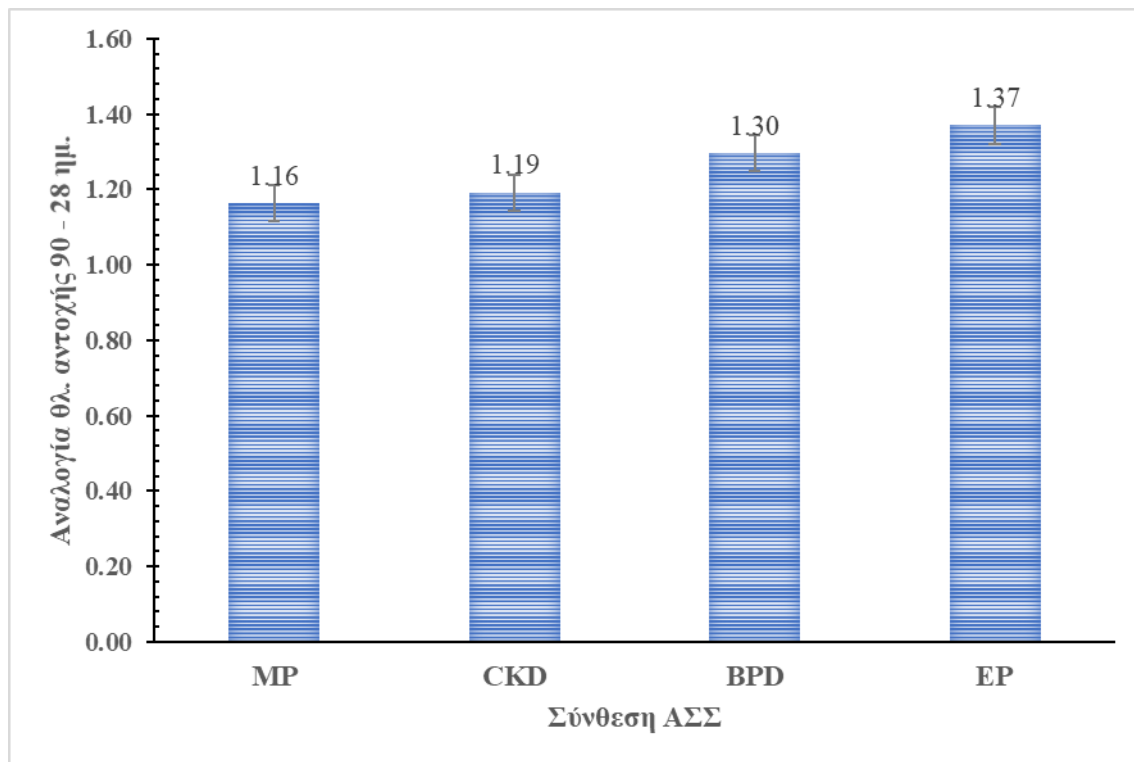
		28d							
α/ α	ΚΩΔ.	M1 (kg)	M2 (kg)	M3 (kg)	F1 (MPa)	F2 (MPa)	F3 (MPa)	τ.α. (MPa)	Μέση αντοχή (MPa)
1	MP	2371.25	2412.15	2405.05	49.28	49.87	51.33	1.05	50.16
2	CKD	2397.05	2384.69	2382.54	52.18	56.15	54.23	2.00	54.18
3	BPD	2432.03	2445.01	2462.83	73.66	74.62	71.50	1.60	73.26
4	EP	2354.34	2386.10	2397.37	63.00	63.26	63.43	0.22	63.23

Πίνακας 3.4 Μάζα, θλιπτική αντοχή, μέση θλιπτική αντοχή και τυπική απόκλιση (τ.α.) δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών

		90d							
α/ α	ΚΩΔ.	M1 (kg)	M2 (kg)	M3 (kg)	F1 (MPa)	F2 (MPa)	F3 (MPa)	τ.α. (MPa)	Μέση αντοχή (MPa)
1	MP	2385.80	2407.86	2411.84	53.91	51.89	52.83	1.01	52.88
2	CKD	2374.47	2369.48	2410.82	59.33	56.59	55.20	2.10	57.04
3	BPD	2467.18	2465.70	2472.84	86.31	82.35	86.53	2.35	85.06
4	EP	2373.22	2409.36	2400.02	79.45	70.12	71.57	5.02	73.71

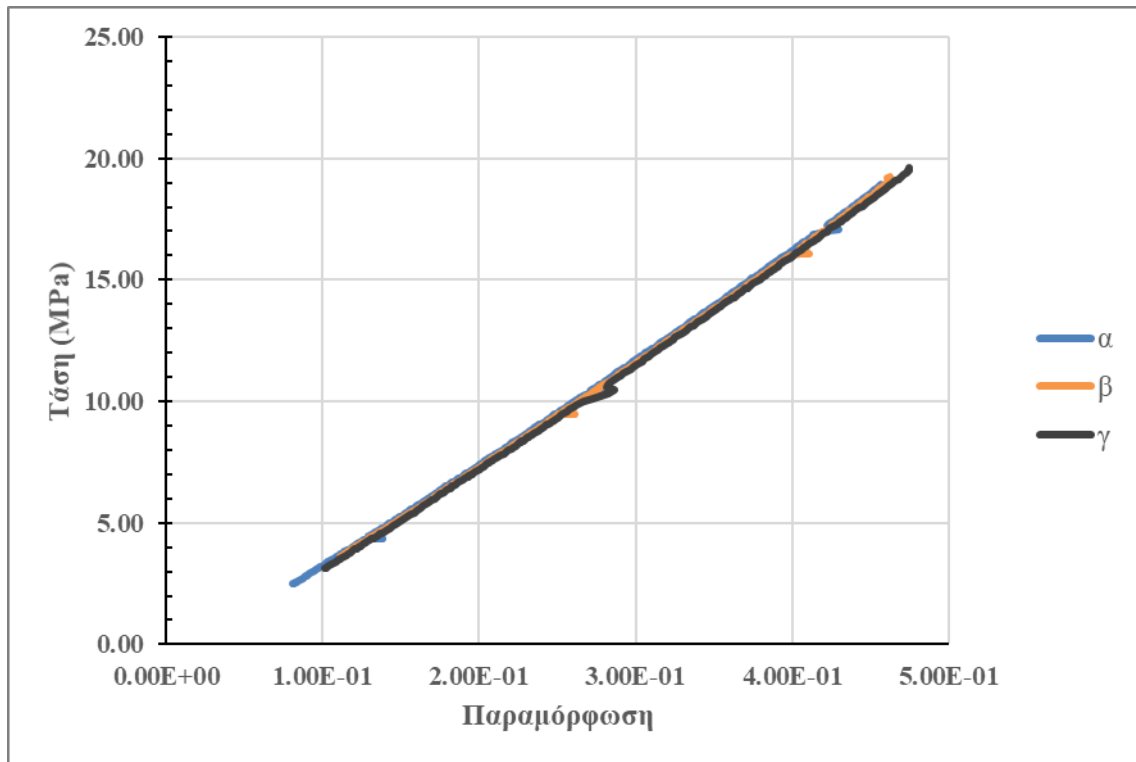


Σχήμα 3.1 Θλιπτική αντοχή ανά ηλικία (7, 28 και 90 ημερών) και ανά σύνθεση

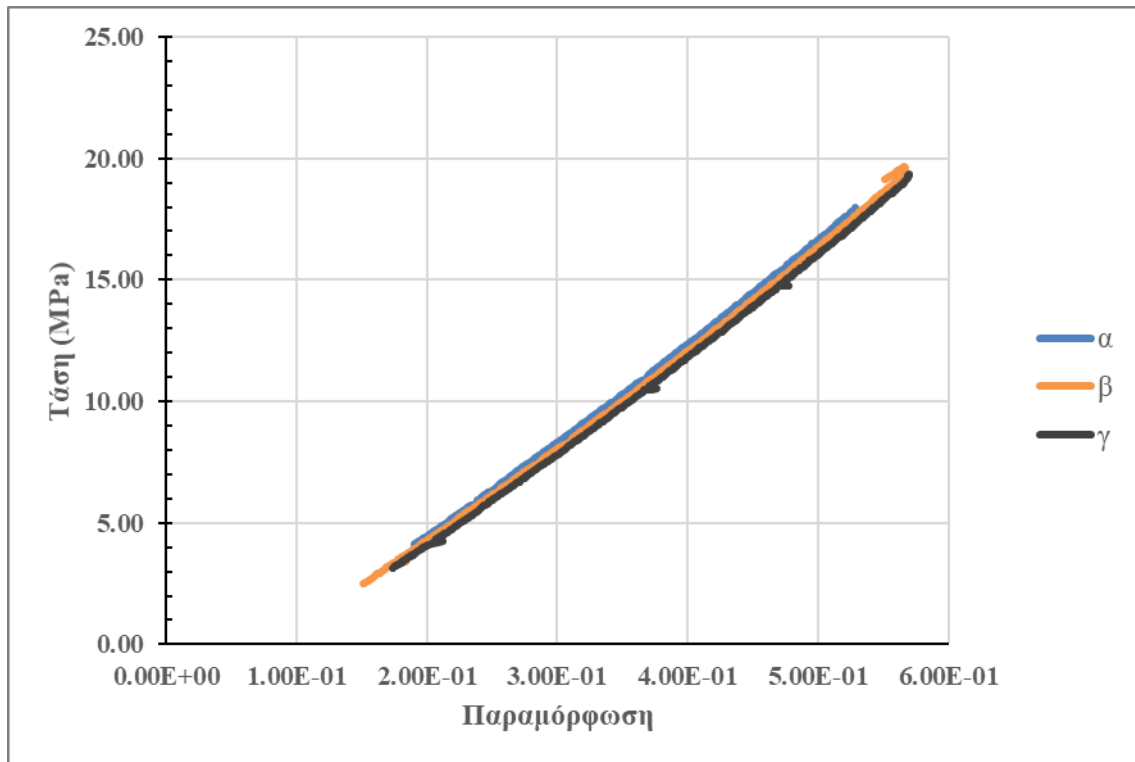


Σχήμα 3.2 Αναλογία θλιπτικής αντοχής 90 – 28 ημερών

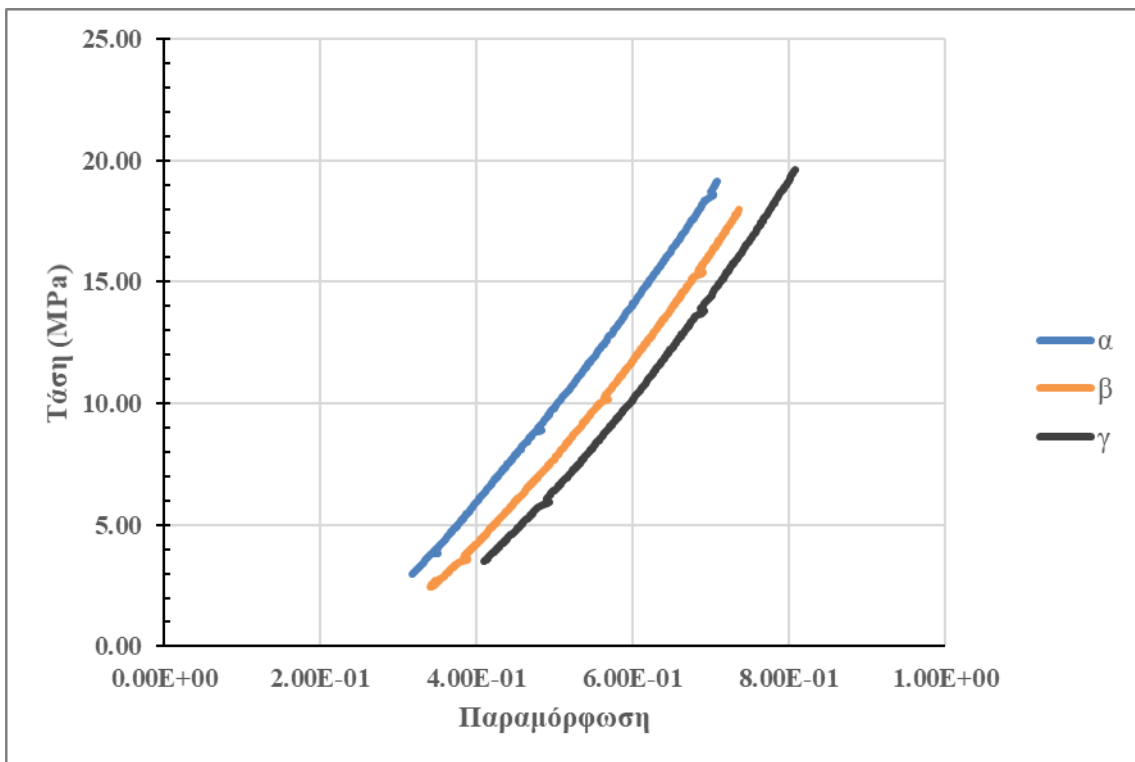
Στο **Σχήμα 3.3**, **Σχήμα 3.4**, **Σχήμα 3.5** και **Σχήμα 3.6** παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για ένα ενδεικτικό δοκίμιο ηλικίας 28 ημερών κάθε σύνθεσης, ενώ στο **Σχήμα 3.7** απεικονίζεται το μέτρο ελαστικότητας για κάθε σύνθεση ΑΣΣ όπως υπολογίστηκε από τα προαναφερθέντα διαγράμματα. Στο **Παράρτημα Α** παρουσιάζονται και τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης των υπόλοιπων δοκιμίων για όλες τις συνθέσεις. Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις κύκλοι φόρτισης για κάθε δοκίμιο. Ο πρώτος από τους κύκλους δεν λαμβάνεται υπόψη, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1.5 και περιγράφηκαν αναλυτικά στην Ενότητα 2.2. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, τα δοκίμια έφτασαν περίπου στο 40% της αντοχής τους. Όλες οι συνθέσεις χαρακτηρίστηκαν από εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο θα μπορούσε να εξηγηθεί από τον υψηλό βαθμό περιεκτικότητας τους σε μαρμαρόσκονη, η οποία αποτελεί λεπτό αδρανές με υψηλότερη σκληρότητα από αυτή της τσιμεντόπαστας [31]. Ένας επιπλέον λόγος που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι οι μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας έγιναν σε κορεσμένα δοκίμια, που συνεπάγεται αύξηση περίπου 15% του αποτελέσματος σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ξηρά δοκίμια. [55]. Παρατηρήθηκε αμελητέα απόκλιση μεταξύ των μέτρων ελαστικότητας τους που υπολογίστηκαν στα 42.2 , 42.3, 42.5 και 42.4 GPa αντίστοιχα για ηλικία δοκιμίων 28 ημερών.



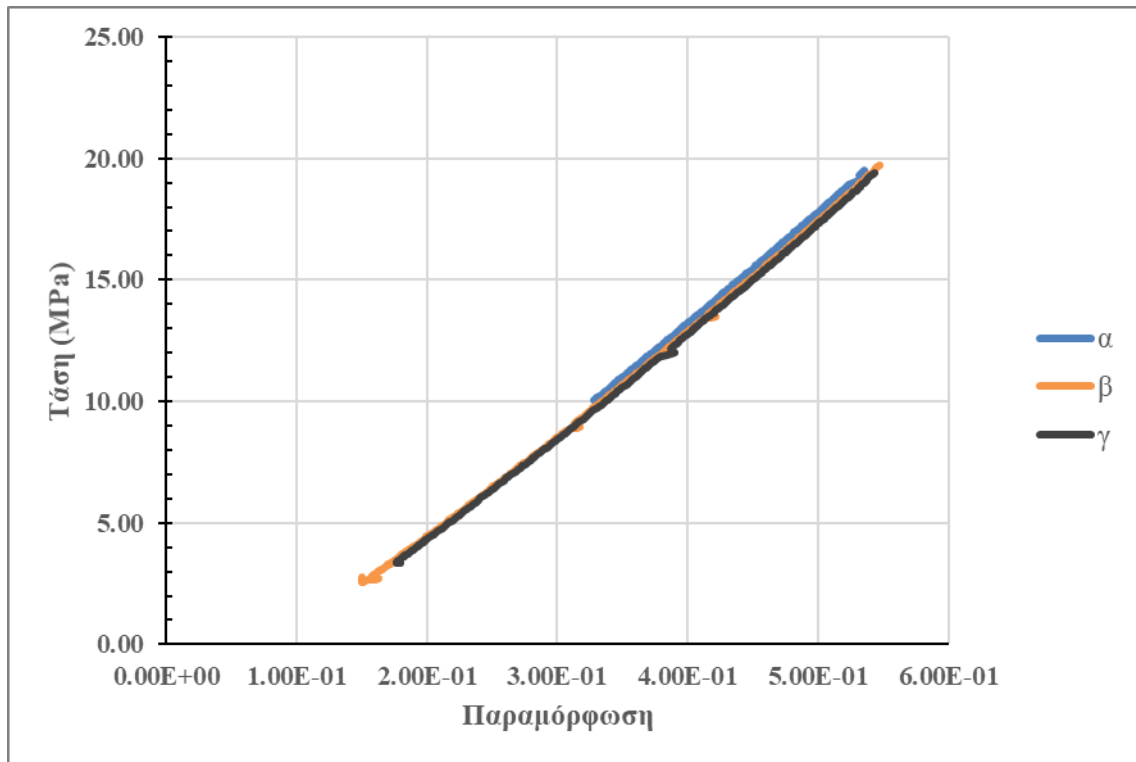
Σχήμα 3.3 Κλάδοι αποφόρτισης διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων κυλινδρικού δοκιμίου της σύνθεσης αναφοράς ΑΣΣ (ΜΡ), για τρείς επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ)



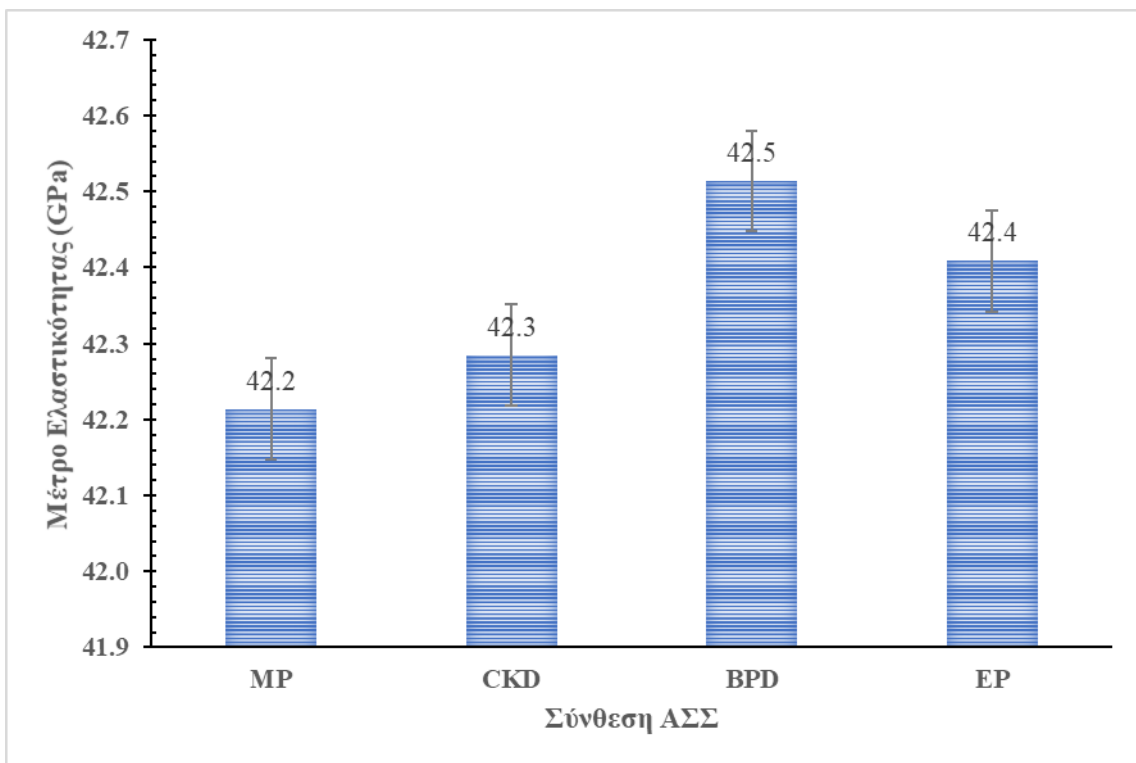
Σχήμα 3.4 Κλάδοι αποφόρτισης διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων κυλινδρικού δοκιμίου της σύνθεσης ΑΣΣ που περιέχει CKD, για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ)



Σχήμα 3.5 Κλάδοι αποφόρτισης διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων κυλινδρικού δοκιμίου της σύνθεσης ΑΣΣ που περιέχει BPD, για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ)

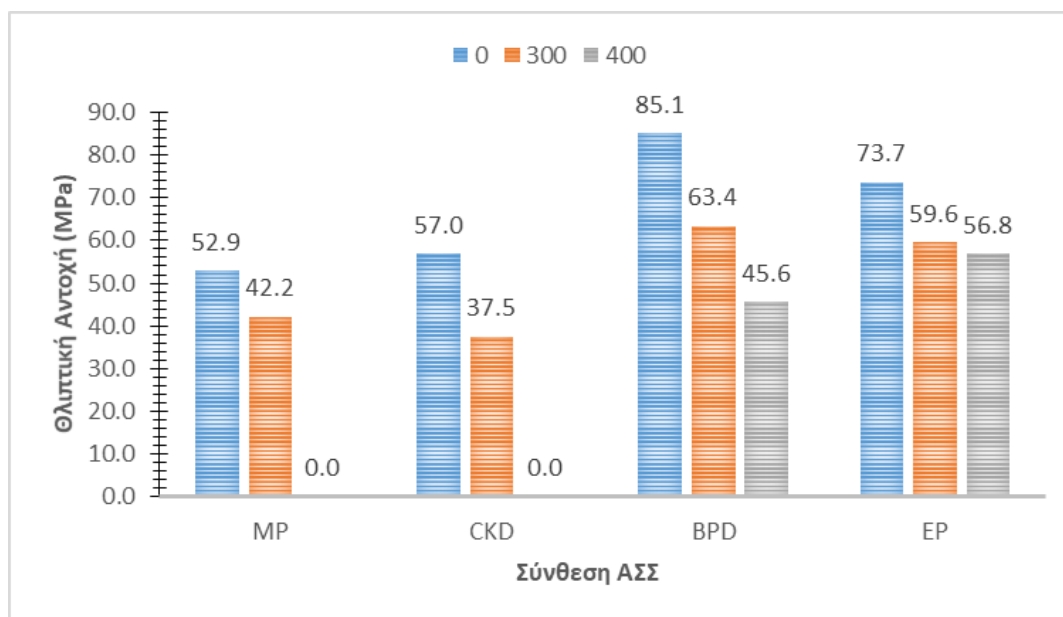


Σχήμα 3.6 Κλάδοι αποφόρτισης διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων κυλινδρικού δοκιμίου της σύνθεσης ΑΣΣ που περιέχει ΕΡ, για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ)



Σχήμα 3.7 Μέσο μέτρο ελαστικότητας για την κάθε σύνθεση ΑΣΣ

Όπως ήταν αναμενόμενο, η έκθεση των δοκιμίων σε υψηλές θερμοκρασίες είχε δυσμενείς επιπτώσεις στη δομή και στη θλιπτική αντοχή τους. Πιο συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 300°C η θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ δείχνει μία μικρή μείωση που οφείλεται στη διάσπαση των χημικών δεσμών του νερού. Μία ακόμα μείωση είχε ήδη συμβεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 20-150°C όπου χάνεται το ελεύθερο νερό, οι δυνάμεις της C-S-H γέλης εξασθενούν και ο ετρινγκίτης αποσυντίθεται. Στους 400°C ξεκινά η σημαντική μείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της φυσικής και χημικής αλλοίωσης που οδηγεί σε διάλυση των δεσμών του C-S-H [56]. Όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.8**, σε θερμοκρασία 300°C, σε κανένα δοκίμιο δε συνέβη εκρηκτική αποφλοίωση, ωστόσο η ποσοστιαία μείωση της θλιπτικής αντοχής είχε διακυμάνσεις και θα μπορούσε να αποτελέσει κριτήριο για την συμπεριφορά των δοκιμίων κάθε σύνθεσης στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Τα καλύτερα αποτελέσματα τα παρουσίασαν τα δοκίμια που περιείχαν ΕΡ καθώς η θλιπτική αντοχή τους μειώθηκε μόνο κατά 19% ενώ τα δοκίμια που περιείχαν ΒΡD παρουσίασαν τα δεύτερα καλύτερα αποτελέσματα με ποσοστό απώλειας 25%. Τα δοκίμια του μίγματος αναφοράς και του μίγματος που περιείχε CKD είχαν σημαντική απώλεια αντοχής σε ποσοστό 33% και 34% αντίστοιχα. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι σημαντικό να αναφερθούν καθώς τα σκυροδέματα υψηλότερης θλιπτικής αντοχής τείνουν να συμπεριφέρονται χειρότερα σε μία μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της πυκνότερης δομής τους και κατά συνέπεια της μεγαλύτερης δυσκολίας εκτόνωσης των πιέσεων που αναπτύσσονται λόγω της περιεκτικότητας σε νερό. Σε θερμοκρασία 400°C ωστόσο πολλά δοκίμια εμφάνισαν εκρηκτική αποφλοίωση όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.5**. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του μίγματος αναφοράς και του μίγματος που περιείχε CKD, όλα τα δοκίμια που εισήχθησαν στον κλίβανο εξερράγησαν. Μόνο ένα δοκίμιο του μίγματος που περιείχε ΒΡD εξερράγη, ενώ ένα υπέστη μικρή τοπική φθορά και η μείωση της θλιπτικής αντοχής του ανήλθε στο 46%. Κανένα δοκίμιο του μίγματος που περιείχε ΕΡ δεν αποφλοιώθηκε και η μέση θλιπτική αντοχή των συγκεκριμένων δοκιμίων μειώθηκε μόνο κατά 23%. Το φαινόμενο της αποφλοίωσης είναι το πιο συνηθισμένο πρόβλημα στα ΑΣΣ σε σύγκριση με τα συμβατικά σκυροδέματα λόγω της πυκνότερης μικροδομής τους [57].



Σχήμα 3.8 Θλιπτική αντοχή δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών που εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες 300°C και 400°C, για κάθε σύνθεση ΑΣΣ

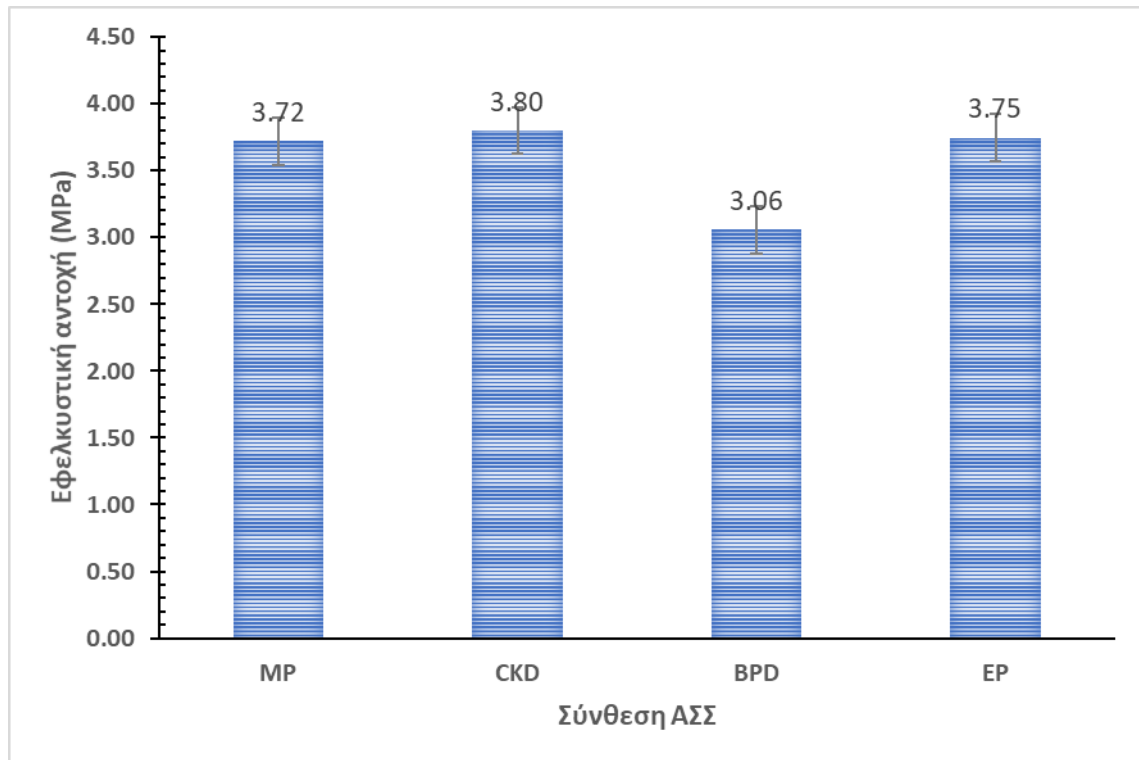
Πίνακας 3.5 Αποτελέσματα δοκιμής θλιπτικής αντοχής δοκιμών ηλικίας 90 ημερών που εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες 300°C και 400°C, για κάθε σύνθεση ΑΣΣ

ΚΩΔ.	n/n	Θερμοκρασία (°C)	Θλ. Αντοχή (KN)	Μέσος όρος (KN)	Παρατηρήσεις
MP20	1	300	33.683		
	2	300	36.717	35.2	
	3	400			Εκρηκτική Αποφλοίωση
	4	400			Εκρηκτική Αποφλοίωση
CKD	1	300	37.760		
	2	300	37.306	37.5	
	3	400			Εκρηκτική Αποφλοίωση
	4	400			Εκρηκτική Αποφλοίωση
BPD	1	300	63.222		
	2	300	63.613	63.4	
	3	400			Εκρηκτική Αποφλοίωση
	4	400	45.591	45.6	Μικρή τοπική φθορά
EP	1	300	60.451		
	2	300	58.824	59.6	
	3	400	57.694		Μικρή τοπική φθορά
	4	400	55.945	56.8	

Ο Πίνακας 3.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού μέσω διάρρηξης και κάμψης, ενώ στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη κάθε διαφορετικές σύνθεσης ΑΣΣ. Όσον αφορά στα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού μέσω διάρρηξης, τα δοκίμια του μίγματος αναφοράς, του μίγματος που περιείχε CKD και του μίγματος που περιείχε EP είχαν σχεδόν ίδιες τιμές $f_{ct,sp}$ με εύρος μεταξύ 3.72 έως 3.80 MPa. Τα δοκίμια της σύνθεσης που περιείχε BPD είχαν ελαφρώς χαμηλότερη αντοχή με τιμή 3.06 MPa που αποτελεί απροσδόκητο αποτέλεσμα λόγω της υψηλής θλιπτικής αντοχής του ΑΣΣ που περιείχε BPD και της κοινής ανοδική τάσης μεταξύ θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής. Μία πιο ακριβής ερμηνεία θα μπορούσε να δοθεί αν μελετηθεί σε βάθος η μικροδομή και το πορώδες της μεταβατικής διεπιφανειακής ζώνης [55].

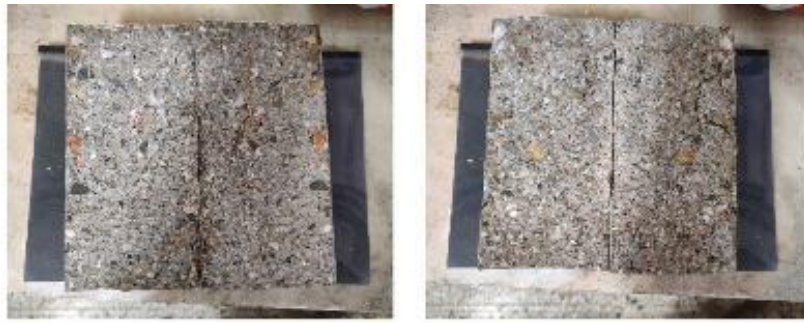
Πίνακας 3.6 Αποτελέσματα μετρήσεων εφελκυσμού διάρρηξης τριών δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών, για κάθε σύνθεση ΑΣΣ

α/α	Κωδ.	D (mm)	L (mm)	Μάζα (g)	Φορτίο (kN)	$f_{ct.sp}$ (MPa)	min fct.fl	max fct.fl	τ.α.	Μ.Ο. $f_{ct.sp}$ (MPa)	Παρατηρήσεις
1	MP - A	100	200	3744	91	2.90	3.22	5.21	1.26	3.72	
2	MP - B	100	200	3941	97.2	3.09	3.43	5.57			και Διατμ.
3	MP - C	100	200	3780	162.5	5.17	5.74	9.31			
4	CKD - A	100	200	3743	115.7	3.68	4.09	6.63	0.72	3.80	
5	CKD - B	100	200	3767	143.6	4.57	5.07	8.23			
6	CKD - C	100	200	3770	99	3.15	3.50	5.67			
7	BPD - A	100	200	4088	98.7	3.14	3.49	5.66	0.13	3.06	
8	BPD - B	100	200	3901	91.4	2.91	3.23	5.24			
9	BPD - C	100	200	3847	98	3.12	3.46	5.61			
10	EP - A	100	200	3724	110.7	3.52	3.91	6.34	0.84	3.75	
11	EP - B	100	200	3945	95.5	3.04	3.37	5.47			και Διατμ.
12	EP - C	100	200	3726	146.8	4.67	5.19	8.41			



Σχήμα 3.9 Μέσος όρος της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη για κάθε σύνθεση ΑΣΣ

Στην **Εικόνα 3.1** παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των δοκιμίων μετά τη δοκιμή διάρρηξης για όλες τις συνθέσεις ΑΣΣ. Όπως περιγράφηκε και στην Ενότητα 1.5, τα δοκίμια ελέγχονται για τυχόν ύπαρξη πάστας ή κονιάματος στο πάνω μέρος του κυλινδρικού δοκιμίου καθώς και για το αν υπάρχει διαφορά όσον αφορά στην κατανομή των αδρανών καθ' ύψος του κυλινδρικού δοκιμίου. Όπως φαίνεται στις φωτογραφίες των δοκιμίων (Εικόνα 3.1) αλλά και όπως ελέγχθηκε επιτόπου στο εργαστήριο, κανένα από τα δοκίμια δεν εμφάνισε επίστρωση πάστας ή κονιάματος στο πάνω μέρος του αλλά ούτε παρατηρήθηκε οποιαδήποτε διαφορά στην κατανομή των λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών τους. Ως εκ τούτου, σύμφωνα με τον οπτικό δείκτη σταθερότητας όλα τα δοκίμια βαθμολογούνται με την τιμή 0 [3].

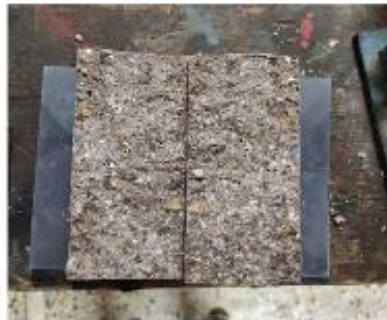


MP (α)

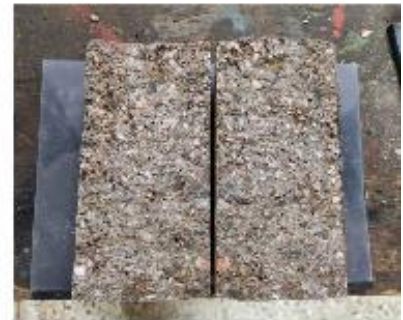
MP (β)



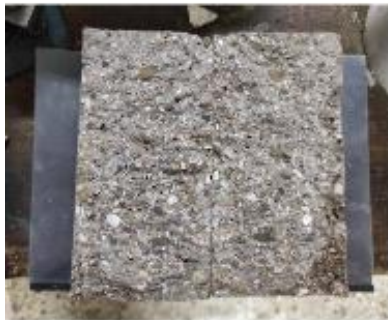
CKD (α)



CKD (β)



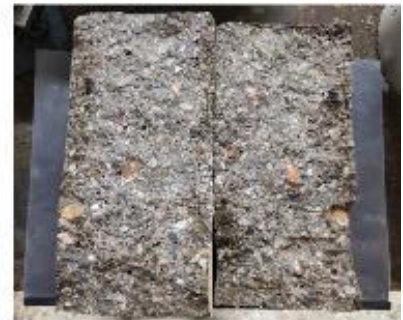
CKD (γ)



BPD (α)



BPD (β)



BPD (γ)



EP (α)



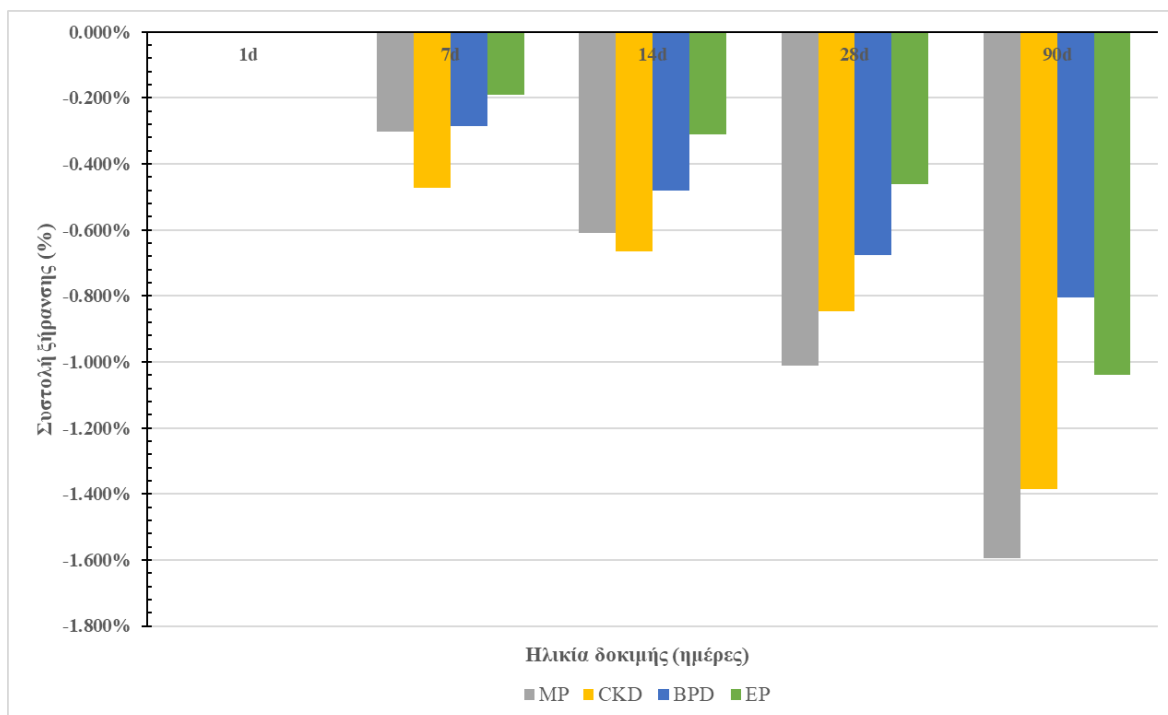
EP (β)



EP (γ)

Εικόνα 3.1 Φωτογραφίες των τριών κυλινδρικών δοκιμών (α, β, γ) μετά τη δοκιμή διάρρηξης για κάθε σύνθεση (MP, CKD, BPD και EP).

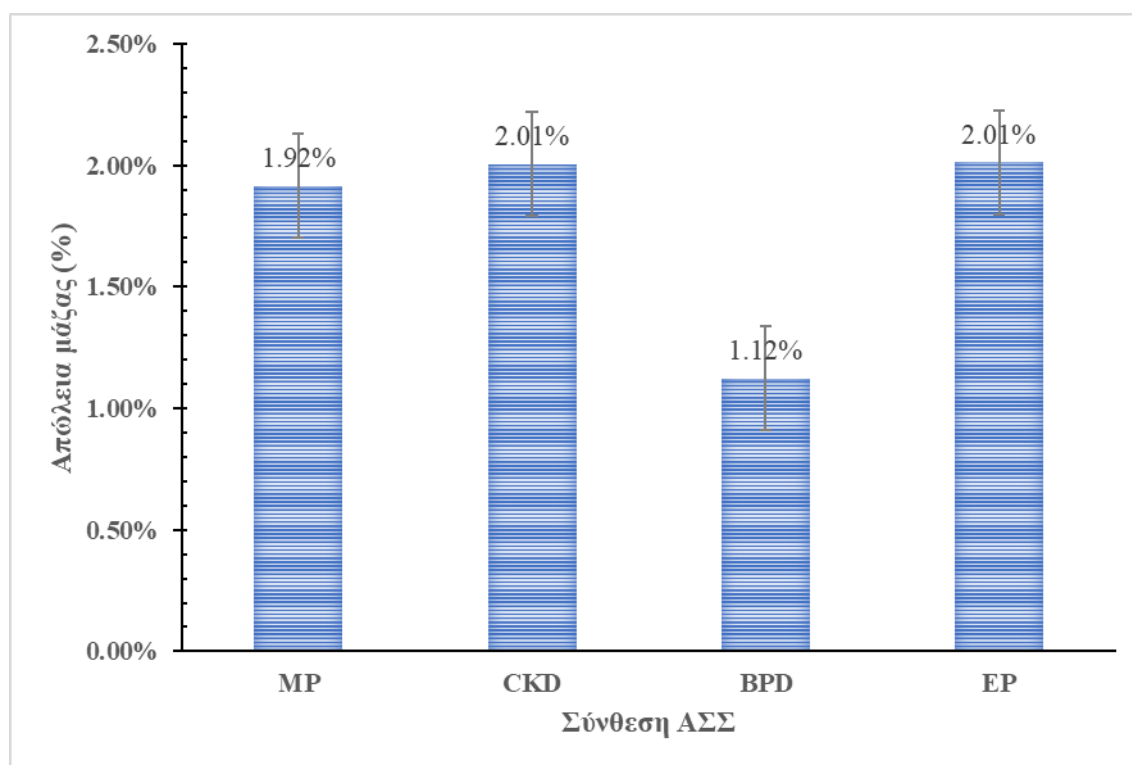
Το **Σχήμα 3.10** φαίνεται η εξέλιξη του ποσοστού της παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης κάθε σύνθεσης για ηλικίες 7, 14, 28 και 90 ημέρες, ενώ στον **Πίνακα 3.7** παρουσιάζονται οι ακριβείς τιμές των μετρήσεων του ποσοστού παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης των δοκιμίων κάθε σύνθεσης σε ηλικία 1, 7, 14, 28 και 90 ημερών. Η παραμόρφωση λόγω συστολή ξήρανσης της σύνθεσης αναφοράς (MP) παρουσίασε μία σχετικά σταθερή κλίση σε όλες τις ηλικίες, εμφανίζοντας τη μεγαλύτερη μεταβολή στην ηλικία των 90 ημερών σε σύγκριση με τις άλλες συνθέσεις. Η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε CKD, παρόλο που στις πρώτες 7 ημέρες είχε συγκριτικά το μεγαλύτερο ποσοστό παραμόρφωσης (-0.471%), δεν διατήρησε τον ίδιο ρυθμό μεταβολής κατά την περίοδο από 7 έως 28 ημέρες, με αποτέλεσμα το τελικό ποσοστό παραμόρφωσης λόγω συστολής σε ηλικία 90 ημερών να είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό του δοκιμίου της σύνθεσης αναφοράς, με τιμές -1.384% έναντι -1.594% αντίστοιχα. Ωστόσο, αν και οι τιμές φαίνονται να είναι σχετικά υψηλές, παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων [58]. Η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε BPD παρουσίασε μικρή συστολή στις 7, 14 και 28 έχοντας το μικρότερο ποσοστό παραμόρφωσης λόγω συστολής στην ηλικία των 90 ημερών με τιμή -0.805%. Τα δοκίμια της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε EP από την ημέρα χύτευσης έως την ηλικία των 28 ημερών παρουσίασε το μικρότερο ποσοστό παραμόρφωσης λόγω συστολής με τιμές -0.191%, -0.309% και -0.461% στις ηλικίες 7, 14 και 28 ημερών αντίστοιχα. Ωστόσο, στη συνέχεια παρουσιάστηκε μια αύξηση στον ρυθμό μεταβολής του κατά την περίοδο μεταξύ 28 και 90 ημερών που είχε ως αποτέλεσμα το τελικό ποσοστό της παραμόρφωσης λόγω συστολής να είναι -1.039%, το οποίο είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό παραμόρφωσης λόγω συστολής των δοκιμίων σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε BPD. Σύμφωνα με τους Ashteyat et al. για σύνθεση ΑΣΣ με BPD η ανηγμένη παραμόρφωση λόγω συστολής ξήρανσης που μετρήθηκε για ηλικίες 7, 14 και 28 ημέρες ήταν ίση με 0.035, 0.038 και 0.044 αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι 25% ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με BPD είχε ως αποτέλεσμα αύξηση κατά 4.83% της συστολής ξήρανσης ηλικίας 28 ημερών [38]. Αντιθέτως, στη συγκεκριμένη εργασία, η προσθήκη BPD και EP φάνηκε να μειώνει τη συστολή ξήρανσης και αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ποζολανική τους δράση και πιθανώς στην υψηλή επίδραση συσώρευσης τους [58]. Τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα σχετικά με τη συστολή ξήρανσης μπορούν να αποδοθούν σε μεγάλο βαθμό στις υψηλές τιμές των μέτρων ελαστικότητας, που εκφράζουν το βαθμό αντίστασης έναντι της παραμόρφωσης. Έτσι, η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε BPD και είχε το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας που μετρήθηκε με τιμή 42.5 GPa είναι επίσης η σύνθεση με τη χαμηλότερη συστολή ξήρανσης [55]. Επιπλέον, η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε BPD είχε μακράν τη χαμηλότερη απώλεια μάζας σε ποσοστό περίπου 1.12% ενώ οι άλλες τρεις συνθέσεις είχαν σχεδόν τη διπλάσια απώλεια με ποσοστά που κυμαίνονταν από 1.92% για τη σύνθεση αναφοράς έως 2.01% για τις συνθέσεις που περιείχαν CKD και EP. Οι παραπάνω μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ηλικία 90 ημερών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.11** και στον **Πίνακα 3.8**. Το φαινόμενο της απώλειας μάζας σχετίζεται σαφώς με την ελεύθερη συστολή ξήρανσης του εκάστοτε δοκιμίου. Η ξήρανση του δοκιμίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του δοκιμίου λόγω της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και σαφώς με τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος [59].



Σημια 3.10 Διάγραμμα της εξέλιξη της ανηγμένης παραμόρφωσης (%) λόγω συστολής ξήρανσης κάθε σύνθεσης ΑΣΣ για ηλικίες 7, 14, 28 και 90 ημέρες.

Πίνακας 3.7 Τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης (%) λόγω συστολής ξήρανσης των δοκιμίων κάθε σύνθεσης, σε ηλικίες 1, 7, 14, 28 και 90 ημερών

	1d	7d	14d	28d	90d
MP	0	-0.302%	-0.610%	-1.011%	-1.594%
CKD	0	-0.471%	-0.665%	-0.847%	-1.384%
BPD	0	-0.284%	-0.482%	-0.677%	-0.805%
EP	0	-0.191%	-0.309%	-0.461%	-1.039%



Σχήμα 3.11 Ποσοστό απώλειας μάζας των πρισματικών δοκιμίων για κάθε σύνθεση ΑΣΣ

Πίνακας 3.8 Μετρήσεις απώλειας μάζας για κάθε σύνθεση ΑΣΣ

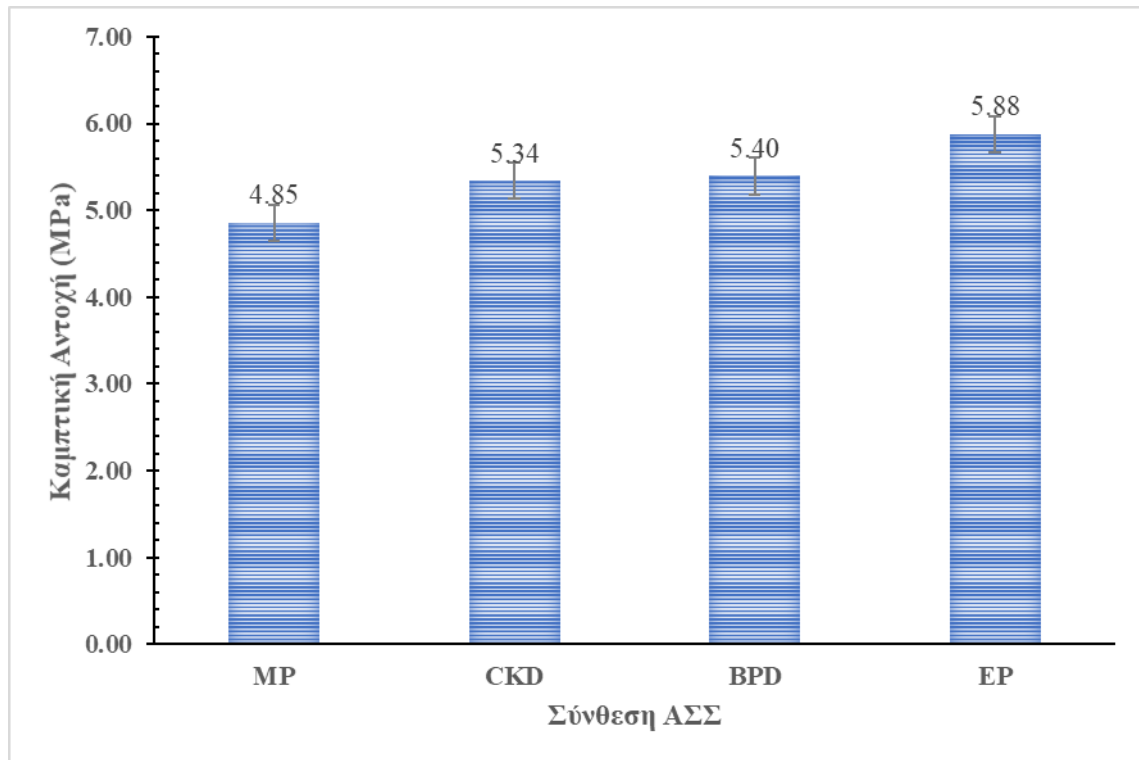
	Αρχική μάζα (g)	Τελική μάζα (g)	Απώλεια μάζας (%)	Μ.Ο. απώλειας μάζας (%)
MP - A	12202	11972	1.88%	1.92%
MP - B	12227	11989	1.95%	
CKD - A	12095	11854	1.99%	2.01%
CKD - B	12037	11794	2.02%	
BPD - A	12471	12332	1.11%	1.12%
BPD - B	12546	12404	1.13%	
EP - A	12193	11941	2.07%	2.01%
EP - B	12102	11865	1.96%	

Μετά το πέρας των 90 ημερών τα ίδια πρισματικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή συστολής ξήρανσης χρησιμοποιήθηκαν και για τη δοκιμή της καμπτικής τους αντοχής όπως αναλύεται στην Ενότητα 1.5 και 2.2. Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.9**, ενώ στο **Σχήμα 3.12** εμφανίζονται συγκεντρωτικά ο μέσος όρος των καμπτικών αντοχών των δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών για κάθε σύνθεση ΑΣΣ. Στο **Σχήμα 3.13** παρουσιάζεται η συσχέτιση της συστολής ξήρανσης και της απώλειας μάζας δοκιμίων ΑΣΣ για ηλικία 90 ημερών.

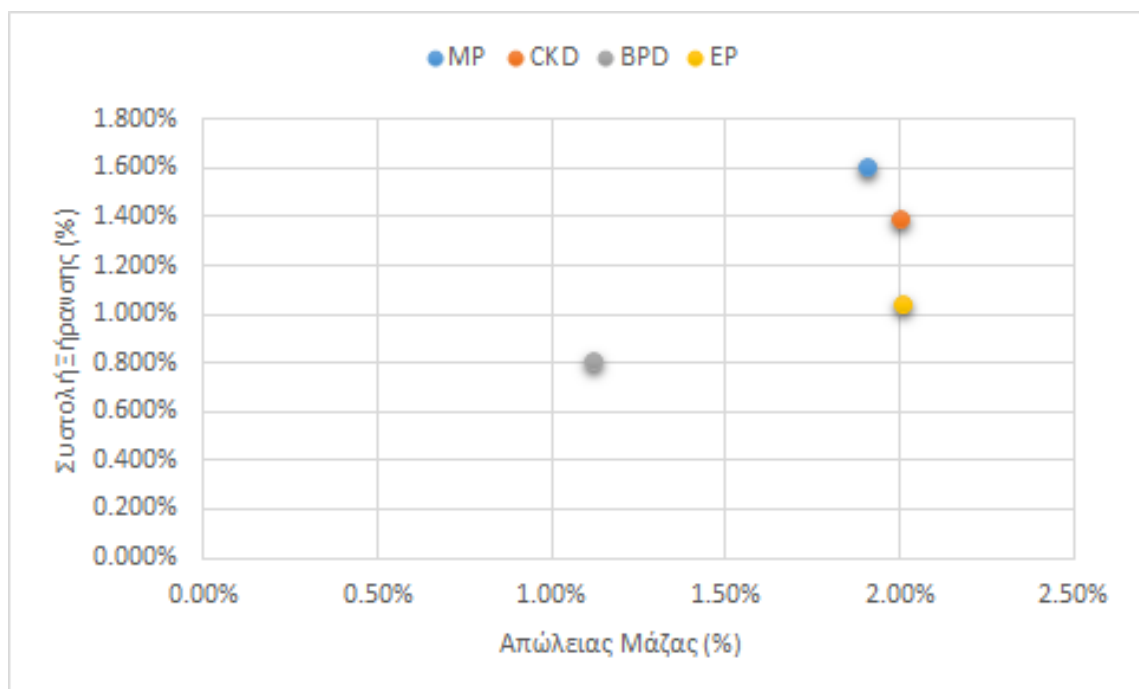
Παρατηρείται ότι όλες οι συνθέσεις που περιείχαν λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά εμφάνισαν υψηλότερη καμπτική αντοχή από αυτή της σύνθεσης αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε ΕΡ εμφάνισε την μεγαλύτερη καμπτική αντοχή με τιμή 5.88 ΜΡα ενώ η σύνθεση αναφοράς (ΜΡ) εμφάνισε τη μικρότερη καμπτική αντοχή με τιμή 4.85 ΜΡα. Οι συνθέσεις που περιείχαν CKD και BPD εμφάνισαν παρόμοια καμπτική αντοχή με τιμές 5.34 ΜΡα και 5.40 ΜΡα αντίστοιχα. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι η καμπτική αντοχή πιθανότατα θα είχε υψηλότερες τιμές, καθότι η ωρίμανση των δοκιμίων δεν έγινε στο νερό αλλά σε θάλαμο ξήρανσης με σταθερή θερμοκρασία 24°C και υγρασία 65%, για λόγους που σχετίζονται με την πειραματική διαδικασία μέτρησης της συστολής ξήρανσης τους. Παρόλα αυτά, μπορούν να εξαχθούν συγκριτικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του κάθε λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού στην καμπτική αντοχή του ΑΣΣ.

Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης δύο πρισματικών δοκιμίων ηλικίας 90 ημερών για την κάθε σύνθεση ΑΣΣ

		Καμπτική Αντοχή					Μέσος όρος Κ. Αντοχής (Μρα)
α/α	ΚΩΔ.	Φορτίο (KN)	l (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	Κ. Αντοχή (Μρα)	
1	MP - A	16.31	300	100	100	4.89	
2	MP - B	16.04	300	100	100	4.81	4.85
3	CKD - A	17.63	300	100	100	5.29	
4	CKD - B	17.96	300	100	100	5.39	5.34
5	BPD - A	17.86	300	100	100	5.36	
6	BPD - B	18.12	300	100	100	5.44	5.40
7	EP - A	20.44	300	100	100	6.13	
8	EP - B	18.74	300	100	100	5.62	5.88



Σχημα 3.12 Μέση καμπτική αντοχή κάθε σύνθεσης ΑΣΣ



Σχημα 3.13 Συσχέτιση συστολής ξήρανσης και απώλειας μάζας δοκιμίων ΑΣΣ για ηλικία 90 ημερών

4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρασκευάστηκαν συνθέσεις αξιοποιώντας βιομηχανικά παραπροϊόντα ως λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά. Οι συνθέσεις μελετήθηκαν ως προς τα ρεολογικά τους χαρακτηριστικά αλλά και ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες και τη συμπεριφορά τους έναντι θερμικής καταπόνησης. Τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται ως ακολούθως:

- Όλες οι συνθέσεις ΑΣΣ, με τη χρήση κατάλληλης δοσολογίας χημικών προσμίκτων (υπερρευστοποιητή και ρυθμιστή ιξώδους), παρουσίασαν αποδεκτές ρεολογικές ιδιότητες. Ειδικότερα, για την επίτευξη της επιθυμητής εξάπλωσης των συνθέσεων ΑΣΣ που περιείχαν CKD και σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP) απαιτήθηκε το μεγαλύτερο και το μικρότερο ποσοστό υπερρευστοποιητή αντίστοιχα. Η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε BPD ήταν η μόνη σύνθεση που απαιτήσε την προσθήκη ρυθμιστή ιξώδους λόγω εμφάνισης ελαφριάς απόμιξης και η μόνη που ξεπέρασε ελάχιστα το άνω όριο της δοκιμή χοάνης V.

- Όλες οι συνθέσεις ΑΣΣ παρουσίασαν μικρή διακύμανση όσον αφορά στην πυκνότητα του νωπού ΑΣΣ και οι συνθέσεις που περιείχαν το μεγαλύτερο και μικρότερο ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα, περιείχαν αντίστοιχα CKD και BPD.

- Όλες οι συνθέσεις ΑΣΣ παρουσίασαν πολύ υψηλή θλιπτική αντοχή. Η σύνθεση με BPD απέδωσε τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή στις 7, 28 και 90 ημέρες, ενώ η σύνθεση αναφοράς τη χαμηλότερη. Ειδικότερα η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε BPD παρουσίασε σημαντική αύξηση θλιπτικής αντοχής από τις 28 στις 90 ημέρες, γεγονός που αποδίδεται στη σύστασή της και συγκεκριμένα στο περιεχόμενο C₂S.

- Όλες οι συνθέσεις ΑΣΣ είχαν ιδιαίτερα υψηλό μέτρο ελαστικότητας, χωρίς αυτό να αποδίδεται στο είδος του χρησιμοποιούμενου λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού.

- Οι συνθέσεις αναφοράς (MP) με CKD και με σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP) εμφάνισαν τη μεγαλύτερη καμπτική αντοχή με πολύ κοντινές τιμές. Στις 90 ημέρες η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP) παρουσίασε την υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό.

- Οι συνθέσεις ΑΣΣ που περιείχαν BPD και σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP) παρουσίασαν, μετά το πέρας 90 ημερών, τη μικρότερη συστολή ξήρανσης.

- Η σύνθεση ΑΣΣ που περιείχε σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP) παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά κατά τη θερμική καταπόνηση σε θερμοκρασίες 300°C και 400°C. Αντίθετα στα δοκίμια της σύνθεσης αναφοράς (MP) και της σύνθεσης που περιείχε CKD, σημειώθηκε εκρηκτική αποφλοίωση μετά την έκθεση τους σε θερμοκρασία 400°C.

Βιβλιογραφία

- [1] H. Okamura, M. Ouchi, Sel-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.1, April 2003, 1 (2003) 5–15.
- [2] The European Project Group, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Eur. Guidel. Self Compact. Concr. (2005) 63.
- [3] Τεχνική Οδηγία 5 - Αυτοσυμπκνούμενο Σκυρόδεμα (2005)
- [4] K. Khayat, G. De Schutter, *State-of-the-Art Report on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete (SCC)*, 2014. <https://biblio.ugent.be/publication/4343086>.
- [5] C. Shi, Z. Wu, K. Lv, L. Wu, A review on mixture design methods for self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 84 (2015) 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079>.
- [6] EFNARC - *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete* (2002)
- [7] B. Meko, J.O. Ighalo, O.M. Ofuyatan, Enhancement of self-compactability of fresh self-compacting concrete : A review, *Clean. Mater.* 1 (2021) 100019. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100019>.
- [8] H.E. Elyamany, A.E.M. Abd Elmoaty, B. Mohamed, Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete, *Alexandria Eng. J.* 53 (2014) 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010>.
- [9] N. Gupta, R. Siddique, R. Belarbi, Sustainable and Greener Self-Compacting Concrete incorporating Industrial By-Products: A Review, *J. Clean. Prod.* 284 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124803>.
- [10] O. Benjeddou, C. Soussi, M. Jedidi, M. Benali, Experimental and theoretical study of the effect of the particle size of limestone fillers on the rheology of self-compacting concrete, *J. Build. Eng.* 10 (2017) 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.02.003>.
- [11] T.Z.H. Ting, M.E. Rahman, H.H. Lau, M.Z.Y. Ting, Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 201 (2019) 763–777. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.128>.
- [12] B. Łązniewska-Piekarczyk, The influence of admixtures type on the air-voids parameters of non-air-entrained and air-entrained high performance SCC, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.086>.
- [13] M. Lachemi, *Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste* (2003)
- [14] EN 12620:2013, “Aggregates for concrete”, 2013, (n.d.).
- [15] EN 12878:2014, “Pigments for the colouring of building materials based on cement and/or lime. Specifications and methods of test”, 2014, (n.d.).

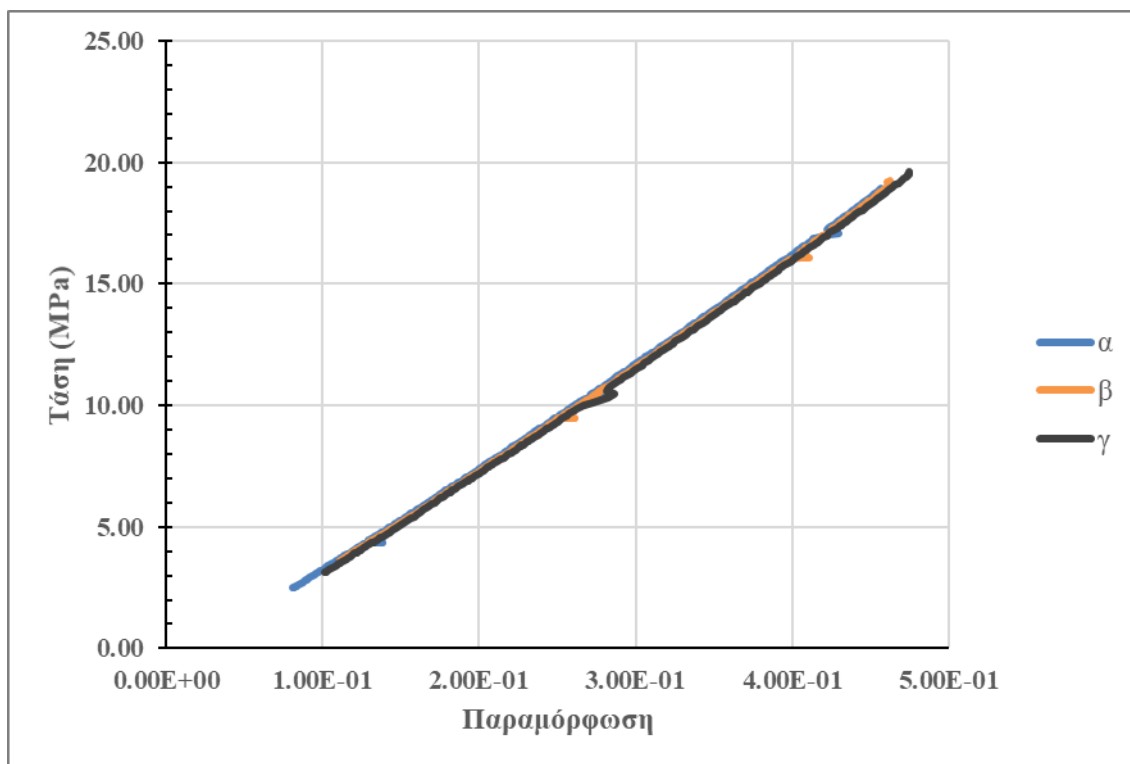
- [16] EN 450-1:2012, “Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria”, 2012, (n.d.).
- [17] prEN 13263-1:2002, “Silica fume for concrete - part 1: definitions, requirements and conformity criteria”, 2002, (n.d.).
- [18] BS 6699:1992, “Specification for ground granulated blastfurnace slag for use with Portland cement”, 1992, (n.d.).
- [19] EN 12350-8:2010, “Testing fresh concrete – Part 8: Slump-flow test”, 2010, (n.d.).
- [20] EN 12350-9:2010, “Testing fresh concrete – Part 9: V-funnel test”, 2010, (n.d.).
- [21] EN 12350-10:2010, “Testing fresh concrete – Part 10: L-box test”, 2010, (n.d.).
- [22] EN 12350-11:2010, “Testing fresh concrete – Part 11: Sieve segregation test”, 2010, (n.d.).
- [23] EN 12350-12:2010, “Testing fresh concrete – Part 12: J-Ring test”, 2010, (n.d.).
- [24] EN 12350-6:2009, “Testing fresh concrete – Part 6: Density”, 2009, (n.d.).
- [25] EN 12350-7:2009, “Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods”, 2009, (n.d.).
- [26] EN 12390-3:2009, “Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens”, 2009, (n.d.).
- [27] EN 12390-6:2009, “Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting of test specimens”, 2009, (n.d.).
- [28] Illinois Test Procedure SCC-6, Standard Test Method for Static Segregation of Hardened Self-Consolidating Concrete Cylinders, (n.d.).
- [29] EN 12390-16:2019, “Testing hardened concrete - Part 16: Determination of the shrinkage of concrete”, 2019, (n.d.).
- [30] EN 12390-5:2009, “Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens”, 2009, (n.d.).
- [31] D. Wang, C. Shi, N. Farzadnia, Z. Shi, H. Jia, A review on effects of limestone powder on the properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* 192 (2018) 153–166.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119>.
- [32] P. Danish, G. Mohan Ganesh, Study on influence of Metakaolin and waste marble powder on self-compacting concrete – A state of the art review, *Mater. Today Proc.* (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.629>.
- [33] A. El Mir, S.G. Nehme, J.J. Assaad, Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders, *Heliyon.* 6 (2020) e03165.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03165>.
- [34] M.I. Abukhashaba, M.A. Mostafa, I.A. Adam, Behavior of self-compacting fiber reinforced concrete containing cement kiln dust, *Alexandria Eng. J.* 53 (2014) 341–354.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.006>.

- [35] R. Siddique, Utilization of cement kiln dust (CKD) in cement mortar and concrete-an overview, *Resour. Conserv. Recycl.* 48 (2006) 315–338. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.010>.
- [36] S.M. Bagheri, M. Koushkbaghi, E. Mohseni, S. Koushkbaghi, B. Tahmouresi, Evaluation of environment and economy viable recycling cement kiln dust for use in green concrete, *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101809. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101809>.
- [37] M. Maslehuddin, O.S.B. Al-Amoudi, M.K. Rahman, M.R. Ali, M.S. Barry, Properties of cement kiln dust concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2357–2361. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.002>.
- [38] I. Rodríguez Viacava, A. Aguado De Cea, G. Rodríguez De Sensale, Self-compacting concrete of medium characteristic strength, *Constr. Build. Mater.* 30 (2012) 776–782. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.070>.
- [39] A.M. Ashteyat, R.H. Haddad, Y.T. Obaidat, Case study on production of self compacting concrete using white cement by pass dust, *Case Stud. Constr. Mater.* 9 (2018) e00190. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00190>.
- [40] Αδρανή Υλικά, <https://el.wikipedia.org>
- [41] Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, “*Δομικά Υλικά*”, 2013, σελ. 143, 174-176
- [42] Μ. Καραβεζυρόγλου – Βέμπερ, “*Στοιχεία υπολογισμού και διαμόρφωσης ολόσωμων κατασκευών*”, 2011, σελ. 15-23
- [43] Βιομηχανικά ορυκτά, <https://el.wikipedia.org>
- [44] Πούδρα ανθρακικού ασβεστίου NOVOCARB No 20 - Dionyssomarble Group
- [45] EN 197-1:2011, “Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements”, 2011, (n.d.).
- [46] P.M. Angelopoulos, C. Maliachova, K. Papakonstantinou, M. Taxiarchou, S. Diplas, Structural and physical characteristics of fine perlite expanded with a novel method in a vertical electric furnace, *Trans. Institutions Min. Metall. Sect. C Miner. Process. Extr. Metall.* 125 (2016) 71–80. <https://doi.org/10.1080/03719553.2016.1156244>.
- [47] P.M. Angelopoulos, M. Taxiarchou, I. Paspaliaris, Production of durable expanded perlite microspheres in a Vertical Electrical Furnace, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 123 (2016). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/123/1/012061>.
- [48] EN 934-2:2009, “Admixtures for concrete, mortar and grout - Concrete admixtures. Definitions, requirements, conformity, marking and labelling”, 2009, (n.d.).
- [49] CHEMIUM NT 2 - DOMYLCO Construction Chemicals. www.domylco.gr
- [50] CHEMIUM VMA - DOMYLCO Construction Chemicals. www.domylco.gr
- [51] A.M. Rashad, A synopsis about perlite as building material - A best practice guide for Civil Engineer, *Constr. Build. Mater.* 121 (2016) 338–353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001>.

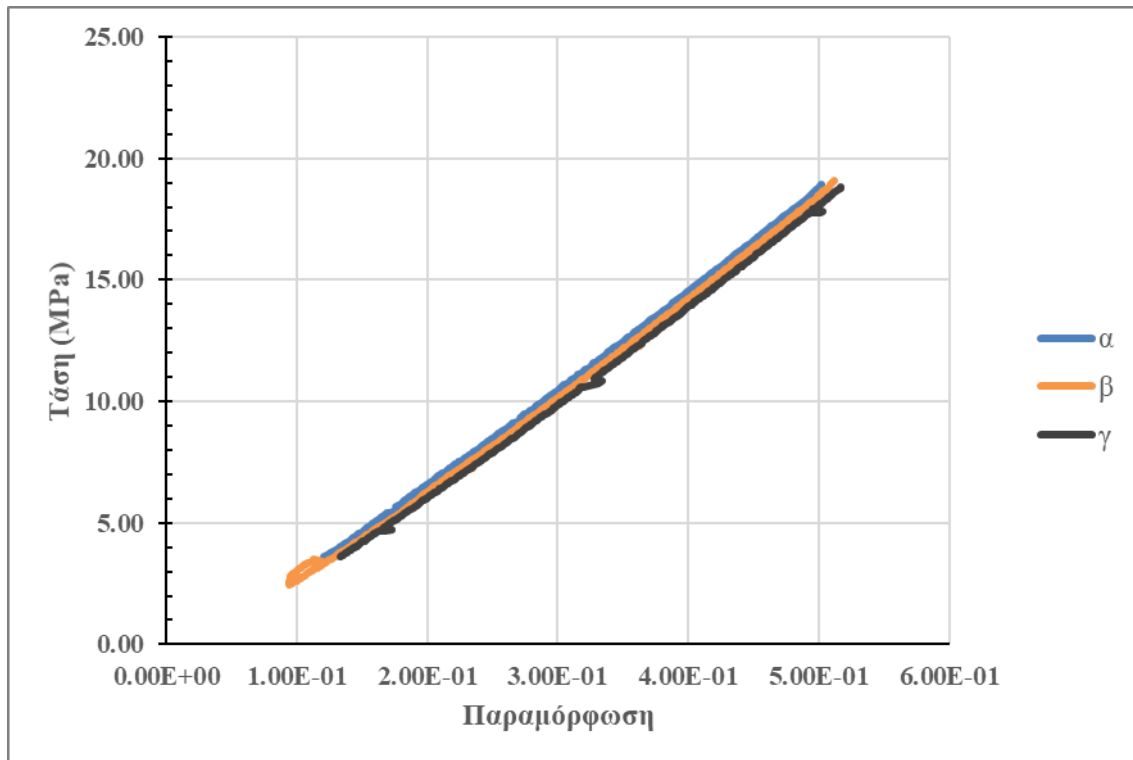
- [52] A. El Mir, S.G. Nehme, Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete, *J. Clean. Prod.* 156 (2017) 507–517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.103>.
- [53] G. Tzouvalas, N. Dermatas, S. Tsimas, Alternative calcium sulfate-bearing materials as cement retarders: Part I. Anhydrite, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 2113–2118. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.020>.
- [54] K.B. Najim, Z.S. Mahmud, A.K.M. Atea, Experimental investigation on using Cement Kiln Dust (CKD) as a cement replacement material in producing modified cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 55 (2014) 5–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.015>.
- [55] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concrete microstructure, properties, and materials*, McGraw-Hill, Berkeley, 2006, (n.d.).
- [56] M. Abed, J. de Brito, Evaluation of high-performance self-compacting concrete using alternative materials and exposed to elevated temperatures by non-destructive testing, *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101720. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101720>.
- [57] A. Pineaud, P. Pimienta, S. Rémond, H. Carré, Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature, *Constr. Build. Mater.* 112 (2016) 747–755. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.132>.
- [58] B. Alsubari, P. Shafigh, M.Z. Jumaat, Utilization of high-volume treated palm oil fuel ash to produce sustainable self-compacting concrete, *J. Clean. Prod.* 137 (2016) 982–996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.133>.
- [59] B. Kucharczyková, H. Šimonová, Z. Keršner, P. Daněk, D. Kocáb, P. Misák, P. Possl, Evaluation of Shrinkage, Mass Changes and Fracture Properties of Fine-aggregate Cement-based Composites during Ageing, *Procedia Eng.* 190 (2017) 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.349>.

Παράρτημα Α.

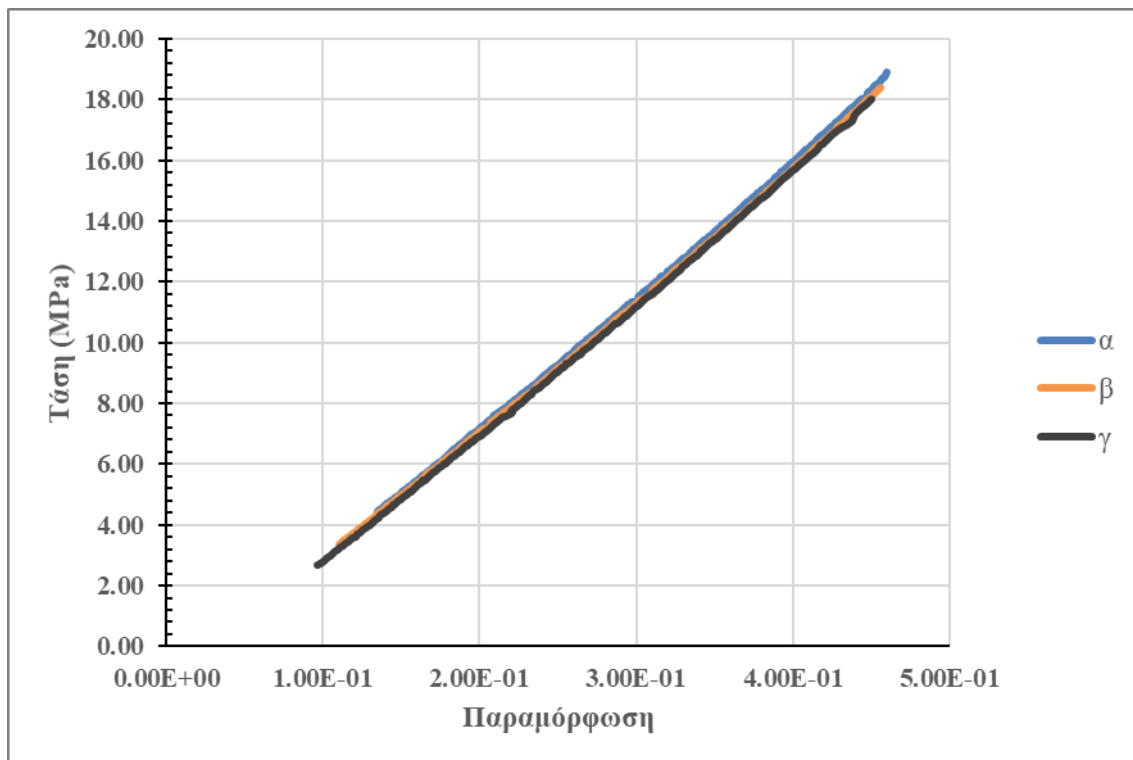
Στα Σχήματα Α1.1-Α1.10 παρουσιάζονται οι κλάδοι αποφόρτισης των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων όλων των δοκιμίων και για τις τέσσερις συνθέσεις, όπως μετρήθηκαν κατά την δοκιμή του μέτρου ελαστικότητας.



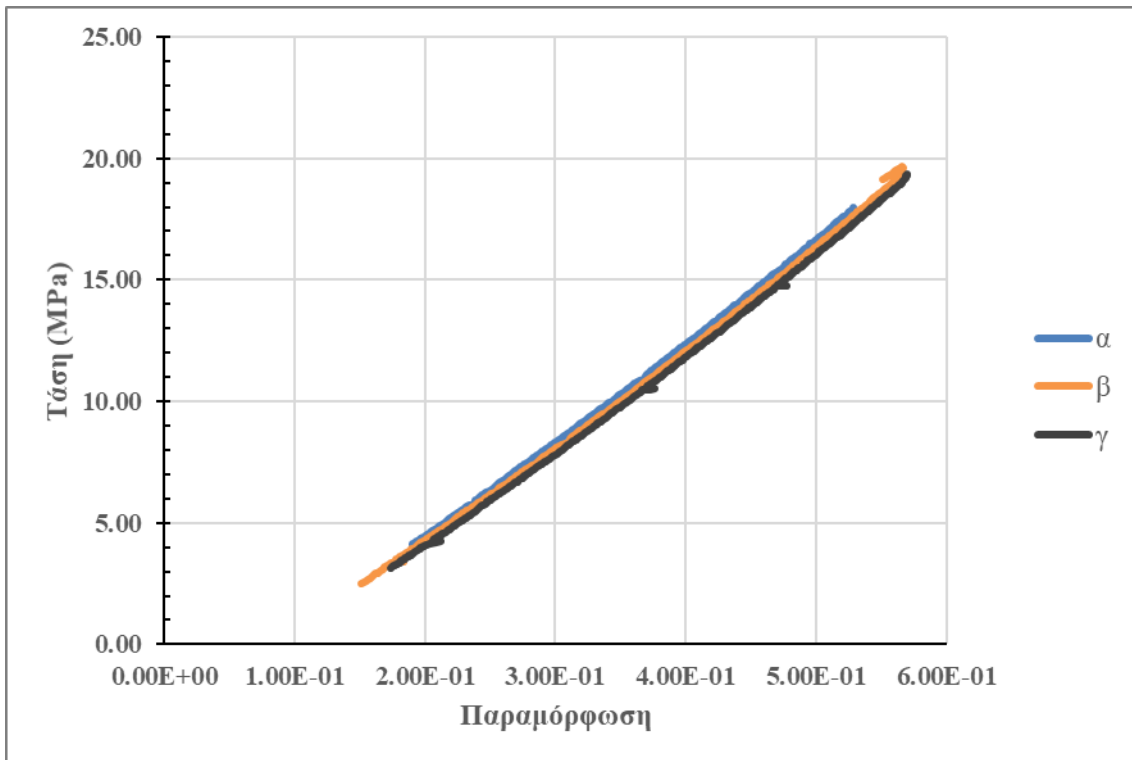
Σχήμα Α1.1 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του πρώτου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης αναφοράς ΑΣΣ (MP)



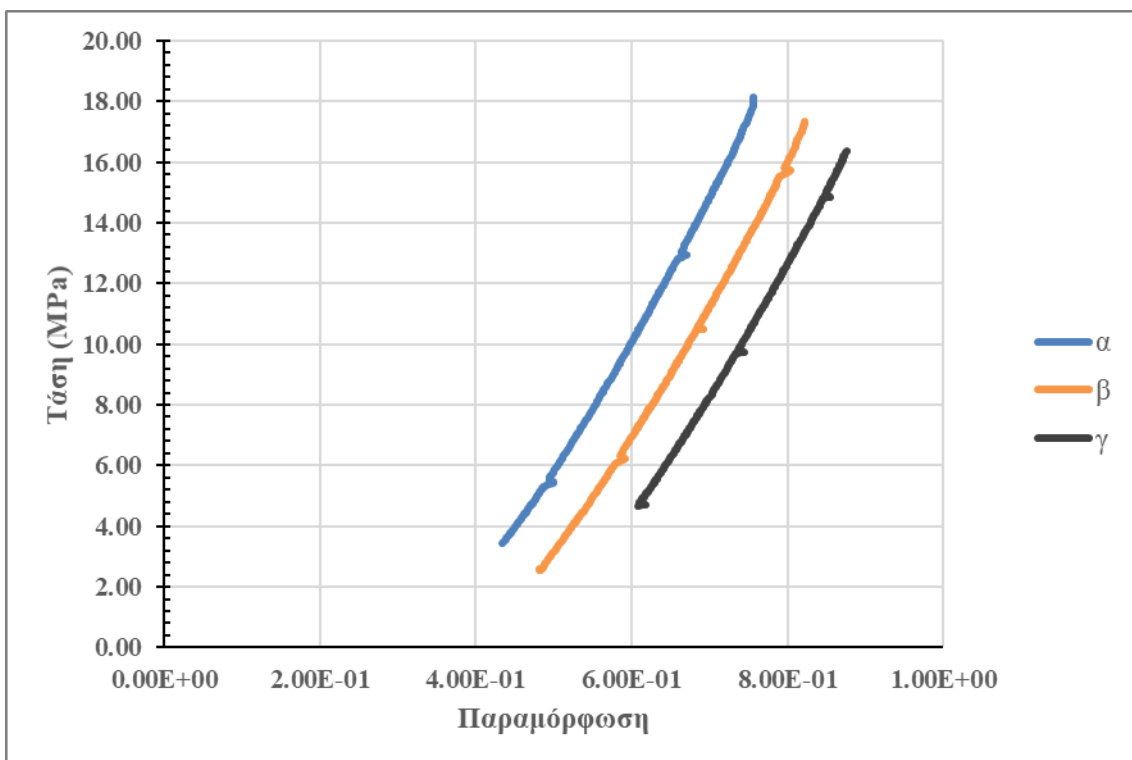
Σχήμα A1.2 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του δεύτερου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης αναφοράς ΑΣΣ (ΜΡ)



Σχήμα A1.3 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του τρίτου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης αναφοράς ΑΣΣ (ΜΡ)

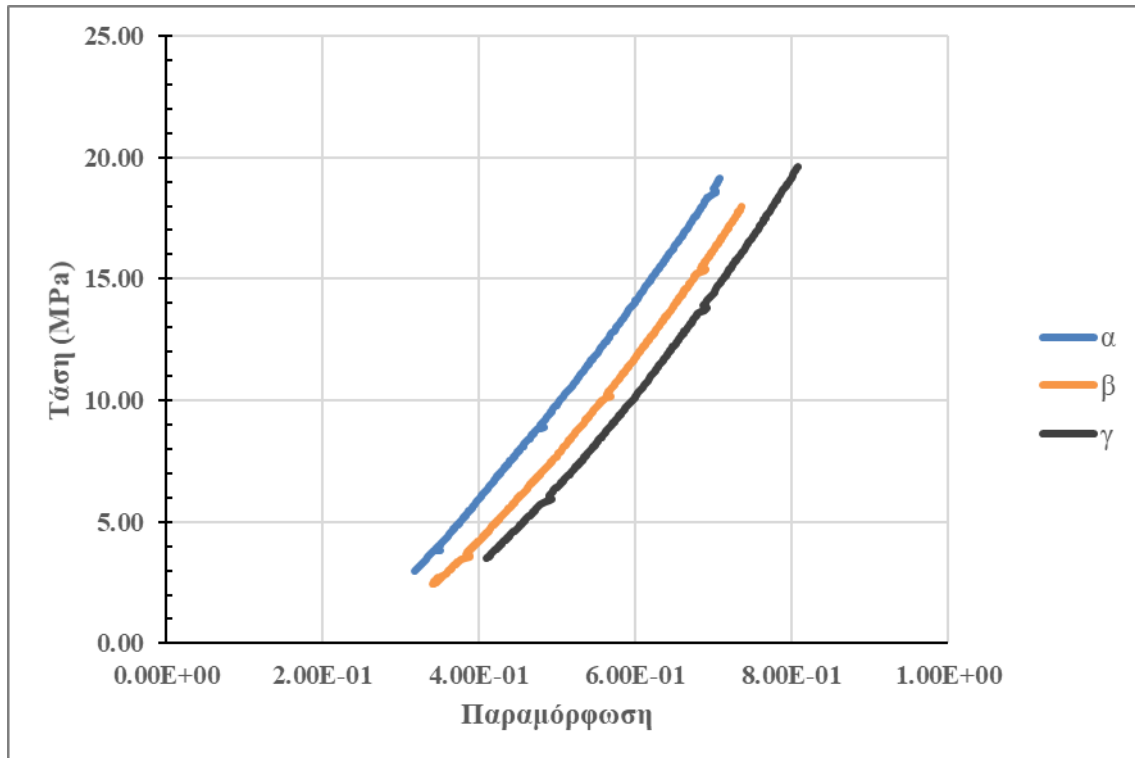


Σχήμα A1.4 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του πρώτου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε CKD

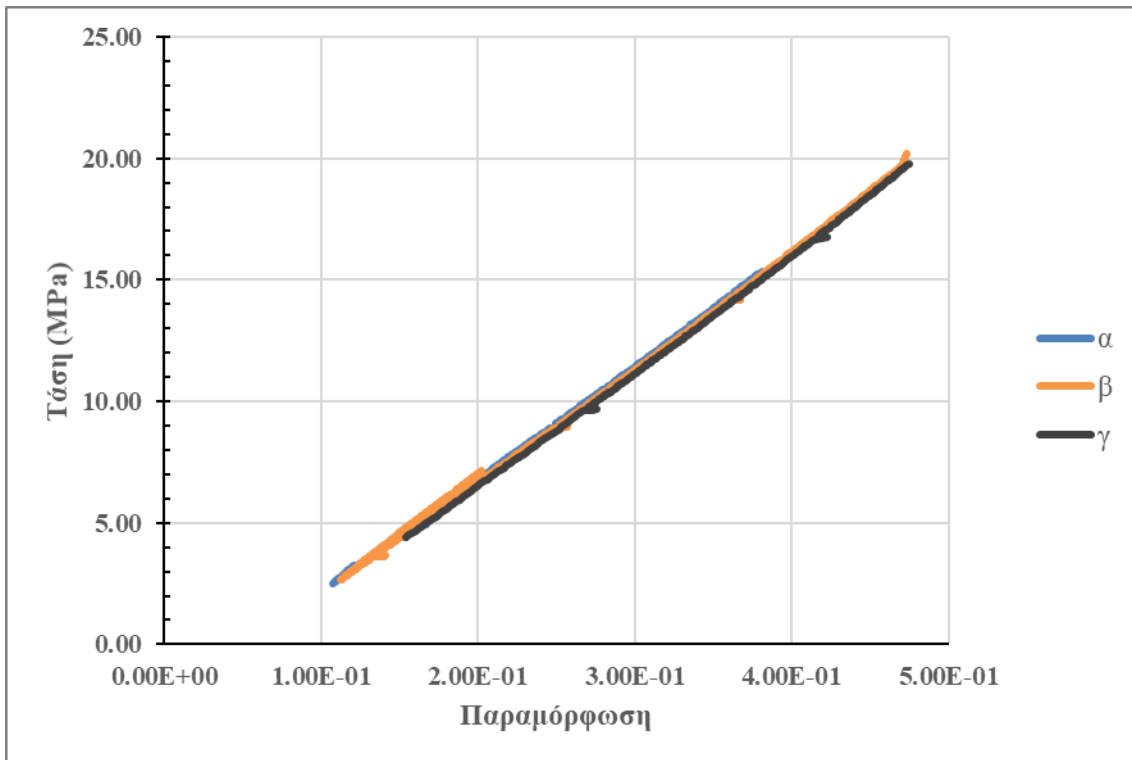


Σχήμα A1.5 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του πρώτου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε CKD *

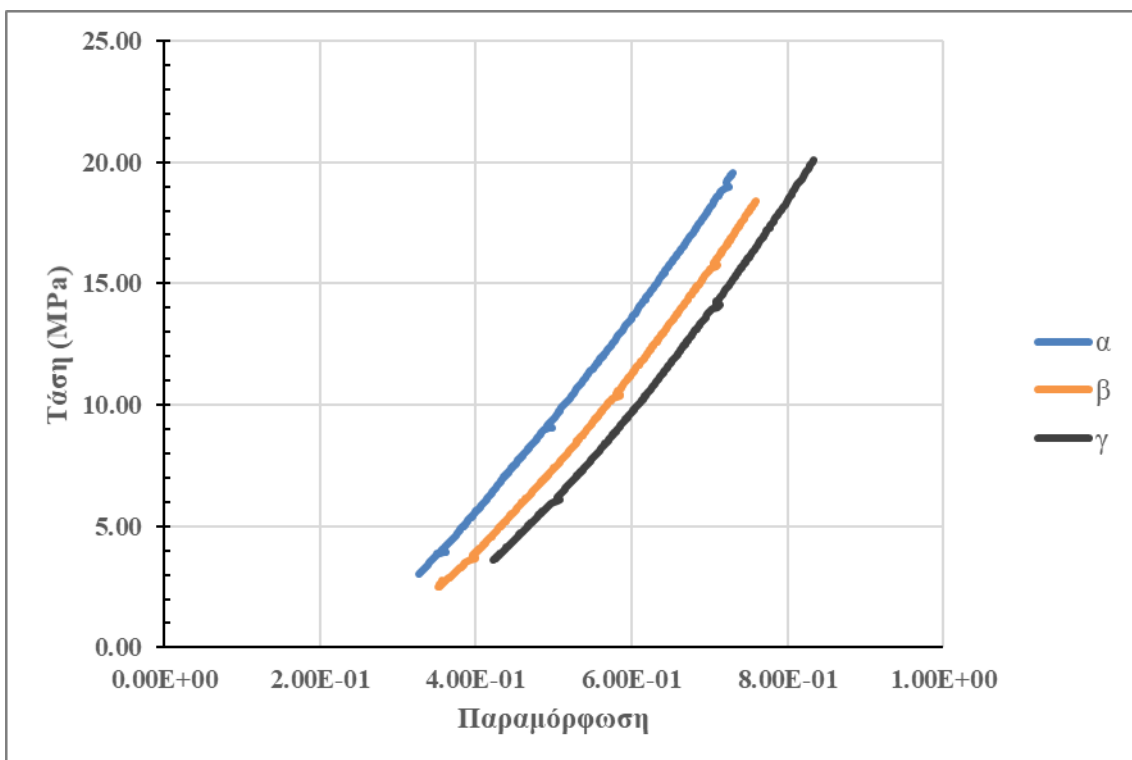
*Ο λόγος που παρουσιάζονται οι μετρήσεις για δύο δοκίμια στη συγκεκριμένη σύνθεση και όχι τρία όπως στις υπόλοιπες συνθέσεις είναι ότι το ένα δοκίμιο υπέστη σημαντική φθορά κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης λόγω κακής γεωμετρίας του δοκιμίου και ως εκ τούτου δεν συμπεριλήφθηκαν τα αποτελέσματα.



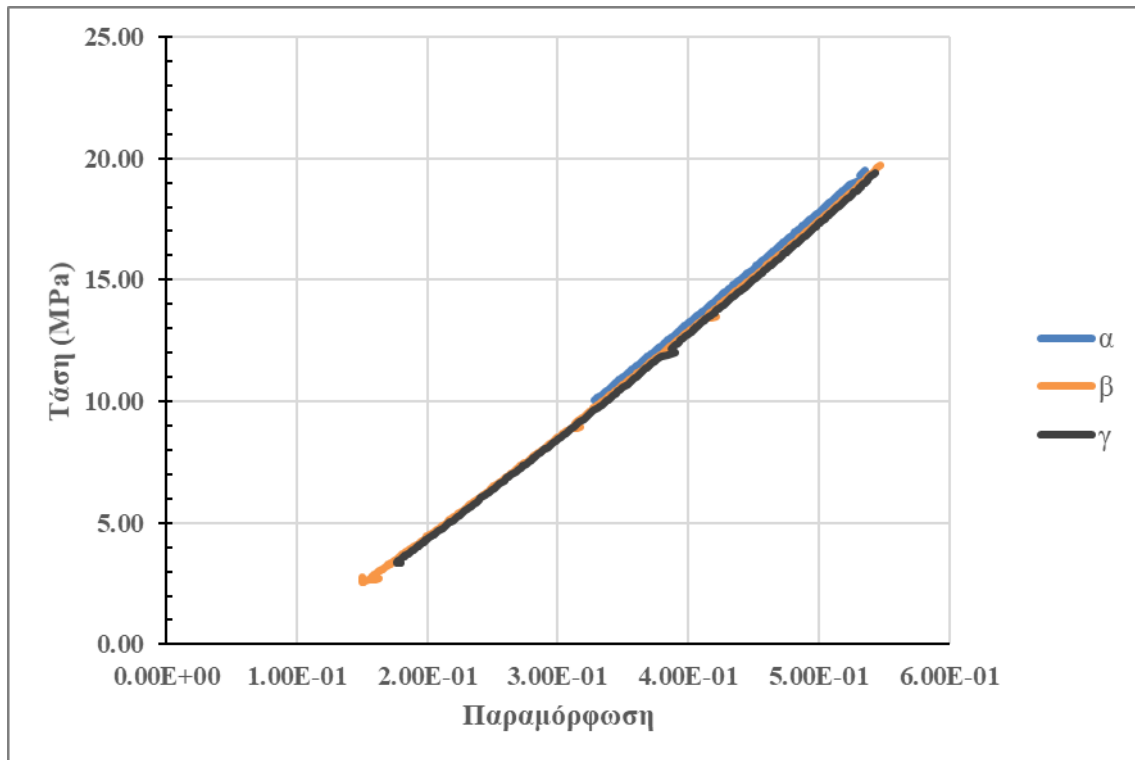
Σχήμα A1.6 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του πρώτου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε BPD



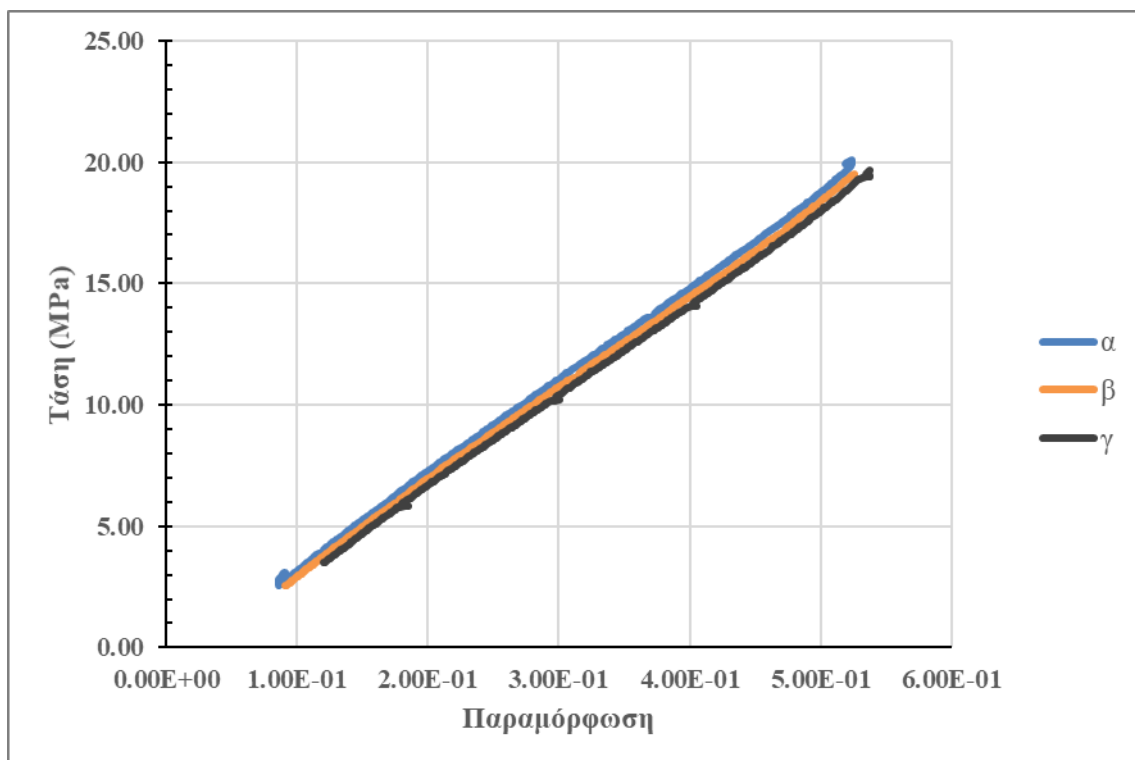
Σχήμα A1.7 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του δεύτερου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε BPD



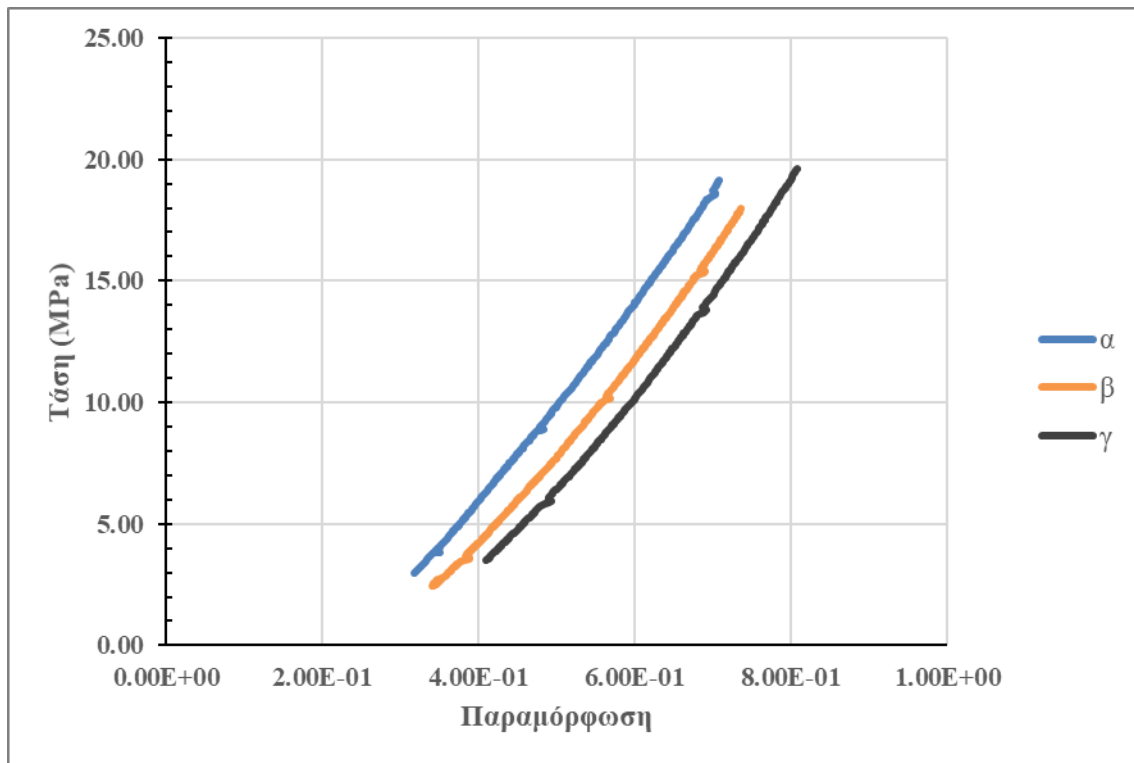
Σχήμα A1.8 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του τρίτου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε BPD



Σχήμα A1.9 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του πρώτου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε ΕΡ



Σχήμα A1.10 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του δεύτερου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε ΕΡ



Σχήμα A1.11 Κλάδος αποφόρτισης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του τρίτου δοκιμίου για τρεις επαναλήψεις φόρτισης (α, β, γ) της σύνθεσης ΑΣΣ που περιείχε ΕΡ