



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



**Αξιολόγηση της περατότητας και
της απορροφητικότητας
αυτοσυμπυκνούμενου
σκυροδέματος με εναλλακτικά
πληρωτικά υλικά**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μανωλαράκης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων:

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

Αθήνα, Μάρτιος 2024

ΕΟΣ ΔΕ 2024/02

Μανωλαράκης Κ. (2024).
Αξιολόγηση της περατότητας και της απορροφητικότητας αυτοσυμπυκνούμενου
σκυροδέματος με εναλλακτικά πληρωτικά υλικά
Διπλωματική Εργασία ΕΟΣ ΔΕ 2024/02
Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Manolarakis K. (2024).
Permeability and absorption of self compacted concrete with alternative fillers
Diploma Thesis ΕΟΣ ΔΕ 2024/02
Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

Περιεχόμενα

1	Θεωρητικό μέρος.....	1
	Εισαγωγή.....	1
	Σκυρόδεμα - Ιστορική Αναδρομή.....	1
	Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα - Βασικά στοιχεία.....	5
	Ειδικά ΑΣΣ.....	11
	Είδη και επίδραση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών στα χαρακτηριστικά του ΑΣΣ.....	12
	Εφαρμογές Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος.....	14
	Ανθεκτικότητα ΑΣΣ.....	16
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	18
	Ανθεκτικότητα ΑΣΣ με εναλλακτικά λεπτόκοκκα πληρωτικά.....	18
	Κύκλος Υγρού Ξηρού.....	26
3	Πειραματικό μέρος.....	28
	Υλικά και συνθέσεις ΑΣΣ.....	28
	Μέθοδοι και διαδικασίες πειραματικής μελέτης.....	32
	Ανοικτό πορώδες.....	32
	Τριχοειδής αναρρόφηση.....	34
	Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων.....	37
	Κύκλος Υγρού - Ξηρού.....	40
4	Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	42
	Ανθεκτικότητας.....	42
	Ανοικτό πορώδες.....	42
	Τριχοειδής αναρρόφηση.....	45
	Διείσδυση Cl.....	48
	Κύκλος Υγρού - Ξηρού.....	50
5	Συμπεράσματα.....	52
	Βιβλιογραφία.....	53
	Παράρτημα Α	
	Ανοικτό πορώδες.....	56
	Τριχοειδής αναρρόφηση.....	58
	Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων.....	60

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: Φωτογραφία αρχαίου κτιρίου από την φυλή Nabataea [πηγή: news.wef.org]	2
Σχήμα 2: Φωτογραφία του Gillender Building στην Νέα Υόρκη της Αμερικής [πηγή: www.shorpy.com]	3
Σχήμα 3: Απεικόνιση διαμέτρων δοκιμής χρόνου ανεμπόδιστης εξάπλωσης [πηγή: www.researchgate.net]	6
Σχήμα 4: Φωτογραφία δοκιμής οπτικού δείκτη σταθερότητας [πηγή: Πετράκης, 2021]	6
Σχήμα 5: Φωτογραφία δοκιμής οπτικού δείκτη σταθερότητας [πηγή: www.semanticscholar.or]	7
Σχήμα 6: Απεικόνιση δοκιμής χοάνης V και L-box [πηγή: www.researchgate.net]	8
Σχήμα 7: Απεικόνιση δοκιμής δοχείου U [πηγή: dreamcivil.com]	8
Σχήμα 8: Απεικόνιση δοκιμής απόμιξης στήλης σκυροδέματος [πηγή: www.sciencedirect.com]	9
Σχήμα 9: Απεικόνιση δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης [πηγή: Harith Sabah Naji, 2018]	9
Σχήμα 10: Απεικόνιση δοκιμής δακτυλίου J [πηγή: www.atlanticsupply.com]	10
Σχήμα 11: Διάφοροι τύποι αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πηγή: [www.researchgate.net]	11
Σχήμα 12: Φωτογραφία τσιμέντου, ιπτάμενης τέφρας, πυριτικής παιπάλης και σκωρίας υψικαμίνου [www.nevadareadymix.com/concrete-tips/supplementary-cementitious-materials]	13
Σχήμα 13: Φωτογραφία του Αστεροσκοπίου του Meudon στην Γαλλία [https://www.britannica.com/place/Meudon]	14
Σχήμα 14: Φωτογραφία του Sodra Lanken Project στην Σουηδία [www.miljobarometern.stockholm.se]	15
Σχήμα 15: Φωτογραφία (α) Κτίριο Burj Khalifa, Dubai / [https://tasrealitydxb.com/burj-khalifa/] (β) Δεξαμενή Αερίου LNG στην Οσάκα, Ιαπωνία [https://www.toyokanetsu.co.jp/global/product/plant/introduction/]	15
Σχήμα 16: Μέση τιμή φαινόμενου πορώδους των μιγμάτων σε ηλικία 28 και 90 ημερών	20
Σχήμα 17: Μέση τιμή συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων διαφόρων συνθέσεων σκυροδέματος σε ηλικία 90 ημερών	21
Σχήμα 18: Διακύμανση των συντελεστών τριχοειδούς σε σχέση με την περιεκτικότητα σε filler	22
Σχήμα 19: Απεικόνιση μιγμάτων σε βάθος ενανθράκωσης και βάθος διείσδυσης χλωριόντων (Dnssm) μετρούμενο μετά από 400 μέρες	23
Σχήμα 20: Επίδραση του πληρωτικού υλικού στην θλιπτική αντοχή σε ηλικία 28 ημερών και η διακύμανση της αντοχής σε μεγαλύτερη ηλικία	25
Σχήμα 21: Ποσοστιαίες μεταβολές των μάζων δοκιμίων σκυροδέματος συνολικής διάρκειας 40 κύκλων, από την δοκιμή υγρού - ξηρού [https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/51034]	27
Σχήμα 22: Θλιπτική αντοχή για ηλικία (7, 28 και 90 ημερών) ανά την κάθε σύνθεση	31
Σχήμα 23: Πειραματικός εξοπλισμός προσδιορισμού ανοικτού πορώδους (α) Ζύγιση υπό αιώρηση(β) Φούρνος ξήρανσης	32
Σχήμα 24: Εξοπλισμός πειράματος τριχοειδούς αναρρόφησης (α) ξηραντήρες (β) δεξαμενή με μεταλλική σχάρα	34
Σχήμα 25: (α), (β), (γ) Εξοπλισμός και διαδικασία πειράματος	38
Σχήμα 26: Δοκίμια που ψεκάστηκαν με διάλυμα νιτρικού αργύρου και μέτρηση της εισχώρησης χλωριόντων	39
Σχήμα 27: Εξοπλισμός πειράματος κύκλου υγρού-ξηρού	40
Σχήμα 28: Φωτογραφία από τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια	41
Σχήμα 29: Υγρός θάλαμος όπου τοποθετήθηκαν τα δοκίμια μετά το πέρας του πειράματος	41
Σχήμα 30: Ανοικτό πορώδες (OP %) ανά σύνθεση ΑΣΣ	44
Σχήμα 31: Μέση απορρόφηση νερού κάθε χρονική στιγμή (i, mm) σε σχέση με τον χρόνο ($t^{0.5}$), για όλες τις συνθέσεις ΑΣΣ	46
Σχήμα 32: Μέσος συντελεστής τριχοειδούς αναρρόφησης για τις συνθέσεις ΑΣΣ	47
Σχήμα 33: Μέση τιμή συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων Dsnmm	49
Σχήμα 34: Ποσοστιαία μεταβολή της μάζας κάθε δοκιμίου σκυροδέματος (wet κατάσταση) διάρκειας 16 κύκλων, στην δοκιμή υγρού - ξηρού	50
Σχήμα 35: Ποσοστιαία μεταβολή της μάζας κάθε δοκιμίου σκυροδέματος (dry κατάσταση) διάρκειας 16 κύκλων, στην δοκιμή υγρού - ξηρού	50

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Βάθος ενανθράκωσης και βάθος διείδυσης χλωριόνων (Dnssm) μετρούμενο μετά από 400 μέρες σε διαφορετικά μίγματα.....	24
Πίνακας 2: Συνθέσεις Σκυροδέματος.....	26
Πίνακας 3: Ιδιότητες Σκυροδέματος.....	26
Πίνακας 4: Συνθέσεις ΑΣΣ και αναλογίες των συστατικών τους.....	29
Πίνακας 5: Διαστάσεις και πλήθος δοκιμίων ανάλογα την δοκιμή.....	30
Πίνακας 6: Αποτελέσματα δοκιμών νεπού ΑΣΣ.....	30
Πίνακας 7: Ζυγίσεις δοκιμίων συνθέσεων ΑΣΣ BPD, MP.....	35
Πίνακας 8: Ενδεικτικές μετρήσεις πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού τριχοειδούς αναρρόφησης δοκιμίων σύνθεσης ΑΣΣ.....	35
Πίνακας 9: Βάρος δοκιμίων (g) στις διάφορες καταστάσεις του πειράματος.....	42
Πίνακας 10: Μέση τιμή ανοικτού πορώδους (%), ανά σύνθεση ΑΣΣ.....	43
Πίνακας 11: Μέση τιμή ρυθμού απορρόφησης νερού, i (mm).....	45
Πίνακας 12: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση συντελεστή απορρόφησης, S (mm/min ^{0.5}) νερού.....	47
Πίνακας 13: Συντελεστής διείδυσης χλωριόνων ανά δοκίμιο (Dnssm x 10-12 (m ² /s), μέση τιμή (μ), τυπική απόκλιση (σ) και συντελεστής διακύμανσης (σ/μ) %.....	49

**Αξιολόγηση της περατότητας και της απορροφητικότητας
αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με εναλλακτικά πληρωτικά υλικά**

Μανωλαράκης Κ.
(Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Ε.)

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει αξιολόγηση της συμπεριφοράς αλλά και της ανθεκτικότητας του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) στη διάβρωση, κάνοντας χρήση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών. Συγκεκριμένα θα γίνει ανάλυση της συμπεριφοράς διαφόρων δοκιμών από ΑΣΣ, με χρησιμοποίηση εναλλακτικών πληρωτικών υλικών, έναντι της απορρόφησης νερού, διείσδυσης χλωριόντων και τον κύκλο υγρού-ξηρού. Αρχικά στην απορρόφηση νερού και διείσδυση χλωριόντων μελετήθηκαν τέσσερις (4) συνθέσεις ΑΣΣ, με διαφοροποιήσεις στις μίξεις των πληρωτικών υλικών καθώς και την προσθήκη χημικών προσμίκτων αλλά και διαφορετικό τύπο αδρανών. Η πρώτη σύνθεση περιείχε αποκλειστικά μαρμαρόσκονη (MP) , στις υπόλοιπες τρεις συνθέσεις αντί για μαρμαρόσκονη έγινε αντικατάσταση του 50% κ.ο., με προσθήκη σκόνης αποκονίωσης περιστροφικής καμίνου (CKD), με σκόνη αποκονίωσης βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (BPD) και τέλος με σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη (EP). Πρώτα έγινε μέτρηση του ανοιχτού πορώδους των δοκιμών με την πρότυπη σύνθεση MP όπου έδωσε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η πρώτη δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης, την καλύτερη συμπεριφορά είχε η σύνθεση BPD με μικρή απορροφητικότητα. Επόμενη δοκιμή ήταν αυτή της διείσδυσης χλωριόντων όπου καλύτερη συμπεριφορά έδειξε η σύνθεση EP καθώς παρουσίασε υψηλή αντίσταση κατά την διείσδυση χλωριόντων, αντιθέτως η σύνθεση CKD παρουσίασε την υψηλότερη τιμή διείσδυσης. Τέλος ακολούθησε η δοκιμή του κύκλου υγρού-ξηρού με την σύνθεση MP να εμφανίζει σχεδόν μηδενική διαφοροποίηση της μάζας του κατά την διάρκεια της δοκιμής, ενώ την μεγαλύτερη διαφοροποίηση μάζας εμφάνισε η σύνθεση EP.

Λέξεις Κλειδιά: αυτοσυμπυκνούμενο σκυροδέμα, εναλλακτικά πληρωτικά υλικά, πορώδες, διείσδυση χλωριόντων, κύκλος υγρού-ξηρού.

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

DIPLOMA THESIS

ΕΟΣ ΔΕ 2024/02

Permeability and absorption of self compacted concrete with alternative fillers
Manolarakis K.
(supervised by Badogiannis E.)

Abstract

Due to the recent environmental crisis, the majority of the unused byproducts in many construction sites and the lack of expertise of workers that are occupied in many construction sites, triggers the need and fuels the motivation for civil engineers globally to put in use self-compacted concretes. The basis of this diploma thesis is to evaluate the durability and corrosion resistance of self-compacted concrete by the use of alternative fillers. A more specialized way to examine the behavior of SCC is by the experiment of chloride migration, sorptivity, open porosity and circles of wet and dry. Different fillers were used in order to compound four compositions of SCC, chemical admixtures and aggregates were also used. To be more specific there were two different groups, one of which had a so called ideal composition and the other was composed of three specimens. The first one had only marble dust as filler (MP), the second composition had 50% v/v of MP replaced by cement kiln dust (CKD), by-pass dust (BPD) and expanded perlite (EP), accordingly. Firstly the open porosity test had the Marble dust (MP) composition perform better than the others. When it comes to the sorptivity coefficient the BPD composition had the lowest count. Continuing to the chloride migration tests, we had the EP exhibited the higher resistance to chloride penetration. On the other hand, CKD appeared to have the highest penetration value. One main point was that throughout the entire experimental procedure, we cannot discrete any of them as they do not seem to surpass one another. Even though they appear to have many variation between them. Although main corrosion assistant mechanisms are chloride penetration and carbonation, the EP composition is expected to outperform the others. Last but not least the circle of wet and dry entitled the behavior of MP composition which had the most stable mass fluctuation, the composition of EP had the most fluctuations throughout the experiment.

Keywords: Self-compacting concrete, corrosion, carbonation, open porosity, alternative fillers, chloride migration.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής , θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην εκπόνηση της. Αρχικά να ευχαριστήσω τον κ. Ευστράτιο Μπαδογιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ για την καθοδήγησή και την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη την διάρκειά της. Η φυσική του παρουσία, το συνεχές ενδιαφέρον του σε συνδυασμό με την επιστημονική του κατάρτιση ήταν καθοριστικά για την άρτια ολοκλήρωση των πειραμάτων και αποτέλεσαν ουσιαστική βοήθεια για την εργασία. Θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υ.Δ. Ανδρέα Κουνάδη, για την άμεση ανταπόκρισή του κάθε φορά που χρειάστηκε η συμβολή του, την συνολική βοήθειά του και την άψογη συνεργασία. Στην διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών σημαντική αποτέλεσε και η παρουσία του Υ.Δ. Κωνσταντίνου Τσιβόλα, ο οποίος ήταν κάθε φορά παρών και με διάθεση να προσφέρει την βοήθεια του όπου και όποτε χρειαστεί, άλλα και της Υ.Δ. Μαρίας Στρατούρα που επίσης συνέβαλε συμπληρώνοντας με τις γνώσεις της όπου χρειαζόταν. Όπως επίσης ευχαριστώ θερμά το προσωπικό του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος, τους κκ. Δημήτρη Χατζηρούμπη και Πέτρο Μπιμπλιτζή. Ευχαριστούμε επίσης τους κκ. Εμμανουήλ Βουγιούκα, Επίκ. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και Μιχάλη Φραγκιαδάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για τη συμμετοχή τους στην εκπαιδευτική διαδικασία της εξέτασης. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

1 Θεωρητικό μέρος

1.1 Εισαγωγή

1.1.1 Σκυρόδεμα - Ιστορική Αναδρομή

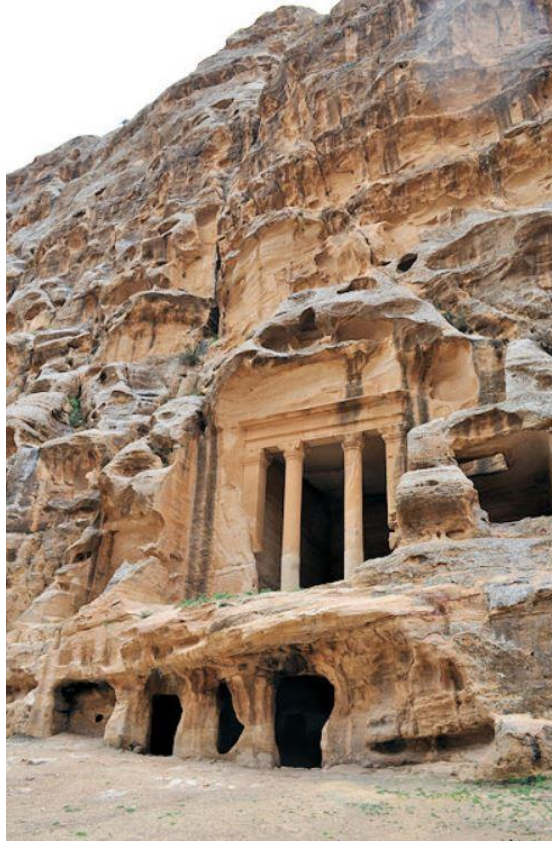
Τα υλικά τσιμέντο όπως και το σκυρόδεμα που στην ουσία αποτελούν δύο ξεχωριστά υλικά δεν διαφοροποιούνται στην συνείδηση του μέσου ανθρώπου καθώς δεν υπάρχει διαχωρισμός επομένως και η ιστορική τους αναδρομή είναι συνυφασμένη. Η ιστορία αυτού του στερεού τεχνητού υλικού θα προκύψει από ανάμειξη διαφόρων φυσικών υλικών ,συνδετικών κονιών καθώς και νερό δίνοντας σαν τελικό αποτέλεσμα ένα ενιαίο σώμα το γνωστό σε όλους μας σκυρόδεμα, το οποίο έχει μία ιστορική πορεία 9000 ετών.

Σύμφωνα με ιστορικές πηγές το αρχαιότερο που χρονολογείται είναι το 7000 π.Χ. στη νότιο Γαλιλαία Fifth El, Ισραήλ. Η ανακάλυψη του έγινε κατά την διάνοιξη ενός δρόμου το 1985 σχηματίζοντας κάποιου είδος δάπεδο, αποτελούμενο από ένα μίγμα ασβέστη, νερού, άμμο και πέτρες. Άλλο ένα εύρημα κατασκευών είναι στην περιοχή ανάμεσα στην νότια Συρία και την βόρεια Ιορδανία γύρω στο 6500 π.Χ ως μια μορφή υδραυλικού σκυροδέματος που είχε ως βάση τον ασβέστη, από μια φυλή Βεδουίνων, οι *Nabataea*. Έπειτα στις όχθες του ποταμού Δούναβη στο Lepenski Vir στην Γιουγκοσλαβία το 5600 π.Χ. που αποτελούσε το δάπεδο μιας καλύβας. Ακολουθούν αρχαίοι Αιγύπτιοι το 3000 π.Χ, όπου έκαναν χρήση κονιαμάτων γύψου και ασβέστη για την κατασκευή των πυραμίδων. Την ίδια εποχή υπάρχουν αναφορές πως στην αρχαία Κίνα γινόταν χρήση τσιμεντοειδών υλικών για την ανέγερση του μεγάλου Σινικού Τείχους.

Η Αρχαία Ελλάδα φαίνεται να υιοθέτησε αυτή την τέχνη όπου έγινε χρήση διαφόρων μιγμάτων ασβέστη όχι μόνο για χτίσιμο αλλά και για την επικάλυψη πλίνθων. Οι αρχαίοι Ρωμαίοι από το 300 π.Χ. , χρησιμοποίησαν για τα έργα και τις κατασκευές τους διάφορες τεχνικές με ασβεστοκονιάματα και ηφαιστειακής άμμου, όπου αντλούσαν προμήθειες από ένα χωριό Pozzuoli το οποίο βρίσκεται κοντά στον Βεζούβιο. Στο χωριό αυτό οφείλουν τα υλικά το όνομα “Ποζολάνη”.

Κατά τον μεσαίωνα δεν αναφέρεται καμία εξέλιξη, χαρακτηριστικό είναι πως κατά την Βυζαντινή Αυτοκρατορία το 540 π.Χ. που κατασκευάζονται μνημεία δεν γίνεται χρήση τόσο αυτών των υλικών, σε αντίθεση παρουσιάζεται φθίνουσα πορεία χρήσης σκυροδέματος με ποζολάνες.

Αναβίωση του σκυροδέματος έχουμε μετά από 900 χρόνια όταν μετά από την ανακάλυψη χειρογράφων του Vitruvius το 1414 μ.Χ. όπου αναφέρεται χρήση ποζολανικού κονιάματος στην θεμελίωση της προβλήτας της γέφυρας της Παναγίας των Παρισίων από τον *Fra Giocondo*.



Σχήμα 1: Φωτογραφία αρχαίου κτιρίου από την φυλή Nabataea [πηγή: news.wef.org]

Την αρχή της δημιουργίας του τσιμέντου με την σημερινή της μορφή την έδωσε ο Άγγλος μηχανικός *John Smeaton* το 1774, όπου ανακάλυψε την μέθοδο παραγωγής του κλίνκερ ασβεστόλιθου με πηλό και έπειτα την αλεσή του.

Το 1816 πραγματοποιήθηκε στο *Souillac* της Γαλλίας η πρώτη κατασκευή γέφυρας από άοπλο σκυρόδεμα. Το 1818 έγινε η προσθήκη ράβδων σφυρίλατου σιδήρου στο σκυρόδεμα από τον Βρετανό μηχανικό *Ralph Dodd*. το 1824 ο *Joseph Aspdin*, παρασκεύασε το πρώτο τσιμέντο *Portland*, με καμίνευση ασβεστόλιθου και αργίλου λεπτής άλεσης.

Το 1889 έγινε η κατασκευή της πρώτης γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα και ακολούθησε το 1894 η κατασκευή της εκκλησίας *St. Jean de Montmartre* από τον *Anatole de Baudot*, όπου αποτελεί ιδιαίτερη κατασκευή καθώς αποτελείται από θόλους και λεπτού πάχους υποστυλώματα σκυροδέματος τα οποία περιβάλλονται από τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 2: Φωτογραφία του Gillender Building στην Νέα Υόρκη της Αμερικής [πηγή: www.shorpy.com]

Περί το έτος 1902 ο August Rerrert πραγματοποίησε στο Παρίσι ανέγερση πολυκατοικίας με την χρήση, όπως αυτό ονομάστηκε, «συστήματος οπλισμένου σκυροδέματος». Πρόκειται για το πρώτο κτιρίου με φέροντα οργανισμό το οπλισμένο σκυρόδεμα με τα γνωστά μας στοιχεία τα οποία είναι οι δοκοί, τα υποστυλώματα καθώς και οι πλάκες χωρίς όμως να περιλαμβάνει φέρουσες τοιχοποιίες.

Σήμερα η παραγωγή τσιμέντου ξεπερνάει τους 1,5 δισεκατομμύρια τόνους με την συνολική ποσότητα σκυροδέματος που παράγονται από αυτό να ανέρχεται στους 10 δισεκατομμύρια τόνους. Γεγονός το οποίο λογικό είναι να κατατάσσει το τσιμέντο αλλά και το σκυρόδεμα στα πιο διαδεδομένα αλλά και ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά παγκοσμίως.

Το έτος 1917, στις ΗΠΑ το τότε Εθνικό Γραφείο Προτύπων ,πλέον γνωστό ως Εθνικό Γραφείο Προτύπων και Τεχνολογίας σε συνεργασία με την Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών των Υλικών (*ASTM*) καθόρισαν την πρότυπη σύνθεση για το τσιμέντο *Portland*. Λίγο αργότερα το 1927 έγινε η πρόταση αλλά και η πρώτη χρήση του προεντεταμένου σκυροδέματος από τον Γάλλο μηχανικό *Eugene Freyssinet*.

Στην Ιαπωνία και συγκεκριμένα στα τέλη του 1980 εισήλθε η έννοια του Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (*SCC*). Πρώτο μέλημα της δημιουργίας του ήταν η ανάγκη για ανθεκτικότερες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος αλλά και η μείωση συσχέτισης της διάστρωσης του σκυροδέματος με τις δεξιότητες των εργαζομένων. Πατέρας της ιδέας θεωρείται ο Δρ. *Hajime Okamura*. Το έτος 1988 παρουσιάστηκε το πρώτο πρότυπο ΑΣΣ και το 1944 η Ένωση Πολιτικών Μηχανικών της Ιαπωνίας εξέδωσε τις πρώτες οδηγίες χρήσης.

Το 2004 μία 12 μελή ομάδα ειδικών από τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης συνεργάστηκαν για την δημιουργία της «Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Ειδικών στην Δομική Χημεία και στα Συστήματα Σκυροδέτησης». Από την συγκεκριμένη ομάδα δόθηκαν και οι πρώτες κατευθυντήριες γραμμές για την παραγωγή και χρήση του ΑΣΣ στην Ευρώπη.

Στην Βόρεια Αμερική το ΑΣΣ είναι σε χρήση από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, όμως οι πρώτες κατευθυντήριες γραμμές δημοσιεύθηκαν το 2003 από το Ινστιτούτο Προκατασκευασμένου/Προεντεταμένου Σκυροδέματος (*PCI*) και το 2007 ακολούθησε μία έκδοση με πλήρη οδηγίες αυτή τη φορά από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (*aci*).

1.1.2 Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα - Βασικά στοιχεία

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ), αποτελεί το μείγμα από σκυρόδεμα όπου βάση της ρεολογικής του μορφής του επιτρέπει να πληρώσει όποιας μορφής ξυλότυπο και αν χρησιμοποιηθεί χωρίς την χρήση κάποιου έξτρα εξοπλισμού. Παράγεται όπως ακριβώς το συμβατικό σκυρόδεμα (ΣΣ) με βάση το τσιμέντο, διάφορα τσιμεντοειδή υλικά με πρόσμικτα ή πληρωτικά, τα αδρανή, χημικά πρόσθετα αλλά και νερο, με την διαφορά πως είναι σε άλλες αναλογίες και έχει πιο χαμηλή ανεκτικότητα στην διαβάθμιση των αδρανών, θερμοκρασιακές μεταβολές κυρίως στην υγρασία αλλά και το περιεχόμενο των λεπτόκοκκων υλικών. Βασικό λοιπόν κατά την φάση παραγωγής είναι να κρατήσουμε ομοιομορφία αλλά και σταθερό ρυθμό προμήθειας του μείγματος.

Το ΑΣΣ σε σύγκριση με το ΣΣ :

- Προσφέρει καλύτερη ρεολογική συμπεριφορά
- Η μηχανική συμπεριφορά του είναι ίσως καλύτερη ή ίδια με το ΣΣ
- Βελτιωμένη ανθεκτικότητα
- Ταχύτερη διάσθρωση
- Μειωμένο εξοπλισμό και λιγότερη απαιτούμενη εργασία
- Πολύ καλή τελική επιφάνεια χωρίς ατέλειες και λοιπά ελαττώματα
- Βελτίωση περιβάλλοντος εργασίας (μείωση θορύβου και λοιπών κινδύνων για το προσωπικό)
- Μειωμένη ανάγκη για επισκευές άρα καλύτερη βιωσιμότητα υλικού

Ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά σε γενικές γραμμές είναι παρόμοια. Το μέτρο ελαστικότητας είναι μικρότερο του ΑΣΣ από το αντίστοιχο συμβατικό σε σκυρόδεμα ίδιας αντοχής, όμως όσον αφορά στον εφελκυσμό και θλίψη εκεί παρουσιάζει μεγαλύτερες αντοχές το ΑΣΣ. Κατασκευές με ΑΣΣ και με ΣΣ δεν διαφέρουν ιδιαίτερα και δεν υπάρχουν ιδιαίτεροι περιορισμοί, τέτοιες μπορεί να είναι θεμέλια κτιρίων, τσιμεντένιοι τοίχοι, προβλήτες, καταστρώματα και δοκοί γεφυρών, επενδύσεις σηραγγών και πολλές άλλες χρήσεις.

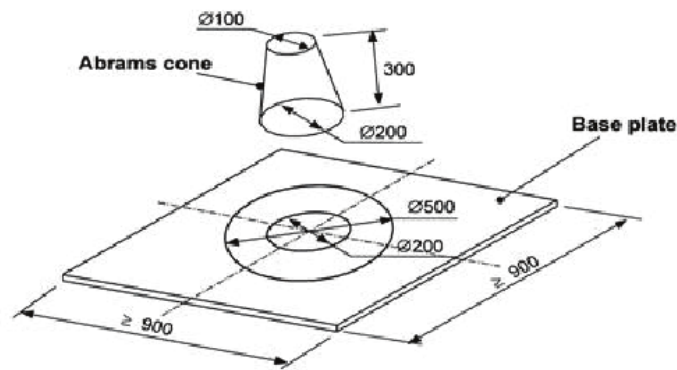
Επιτελεστικότητα & Δοκιμές

Όσον αφορά την επιτελεστικότητα του ΑΣΣ κάνουμε λόγο για την ικανότητα πλήρωσης του (ικανότητα ροής) σε (μη) εμποδιόμενες συνθήκες, το ιξώδες αλλά και την διεισσιμότητα διαμέσου στενών ανοιγμάτων αλλά και την αντίσταση του στην απόμιξη (ικανότητα να διατηρεί την ομοιογένεια κατά την διάσθρωση και πήξη/σκλήρυνση).

Προκειμένου να διασφαλιστεί το τελικό προϊόν που να διαθέτει τις απαιτούμενες ιδιότητες : ικανότητα πλήρωσης- διέλευσης και σταθερότητα, έχουν προκύψει πρότυπα από τους αμερικανικούς και ευρωπαϊκούς φορείς που όμως θα πρέπει να πραγματοποιείται ένας συνδυασμός από τις παρακάτω δοκιμές ώστε να προκύπτουν τα τελικά ασφαλή συμπεράσματα.

Οι δοκιμές είναι οι εξής:

- i. Δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης (slump flow): Η δοκιμή αυτή εξετάζει την ικανότητα της ανεμπόδιστης ροής ΑΣΣ σε συνθέσεις όπου περιέχουν χονδρόκοκκα αδρανή διαμέτρου μέγιστου κόκκου μικρότερη των 40 mm. Κάνουμε χρήση του εξοπλισμού της δοκιμής κάθισης για το σκυρόδεμα δηλαδή ένας μεταλλικού κώνου κώνου ύψους 300mm, η διάμετρος βάσης είναι στα 200mm και της κορυφής στα 100mm. Μόλις αυτός γεμίσει με σκυρόδεμα αφαιρείται και η μάζα του, λόγω του ίδιου βάρους του εξαπλώνεται σε σχήμα κύκλου στο δάπεδο. Η διαφορά με την δοκιμή κάθισης έγκειται στο γεγονός πως στο ΑΣΣ το μίγμα δεν δονείται και σε αντίθεση με το απλό σκυρόδεμα αντί να μετράτε η κάθιση της κορυφής της μάζας από το σκυρόδεμα σε σχέση με την κορυφή του μεταλλικού κώνου, μετράμε την ακτίνα διάμετρο του κύκλου εξάπλωσης του ΑΣΣ.

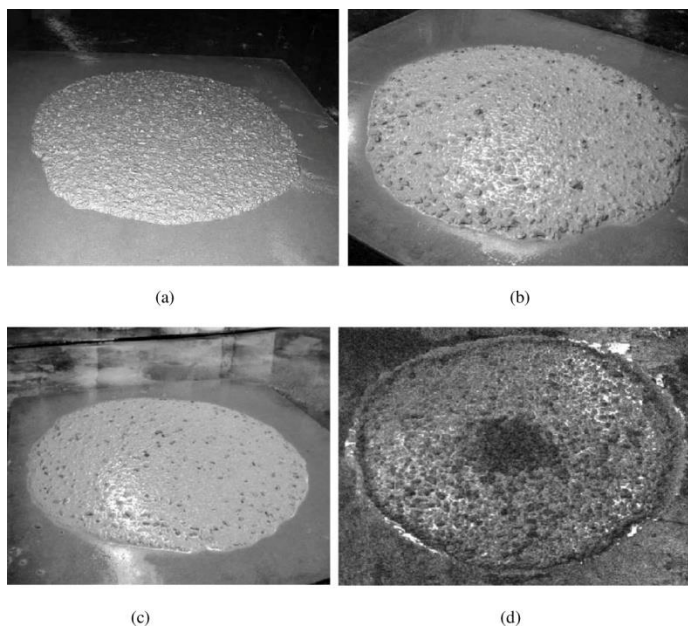


Σχήμα 3 : Απεικόνιση διαμέτρων δοκιμής χρόνου ανεμπόδιστης εξάπλωσης [πηγή: www.researchgate.net]

- ii. Χρόνος εξάπλωσης t_{500} : Αυτή η δοκιμή γίνεται την ίδια στιγμή με την δοκιμή της εξάπλωσης καθώς γίνεται στο ίδιο δείγμα. Δίνει την εκτίμηση ταχύτητας της ανεμπόδιστης ροής του μίγματος σκυροδέματος, η οποία μας δίνει το ιξώδες. Η διαδικασία είναι η μέτρηση του χρόνου που απαιτείται ώστε η διάμετρος του αποτυπώματος να φτάσει τα 500 mm, από την στιγμή ανασηκώματος του κώνου.
- iii. Οπτικός δείκτης σταθερότητας (Visual stability index): Αντίστοιχα με την προηγούμενη δοκιμή και αυτή μπορεί να υλοποιηθεί στο ίδιο δείγμα. Ένας έμπειρος παρατηρητής αναλαμβάνει να προσδιορίσει την σταθερότητα του μίγματος και να αξιολογήσει αυτό και άλλα μίγματα παρόμοιας σύνθεσης και τα κατατάσσει αντικειμενικά σε τέσσερις κατηγορίες.

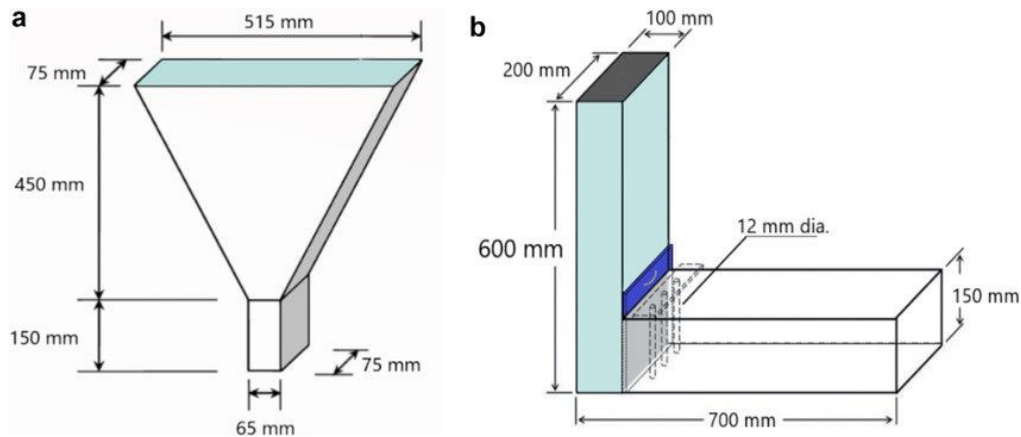


Σχήμα 4: Φωτογραφία δοκιμής οπτικού δείκτη σταθερότητας [πηγή: Πετράκης, 2021]



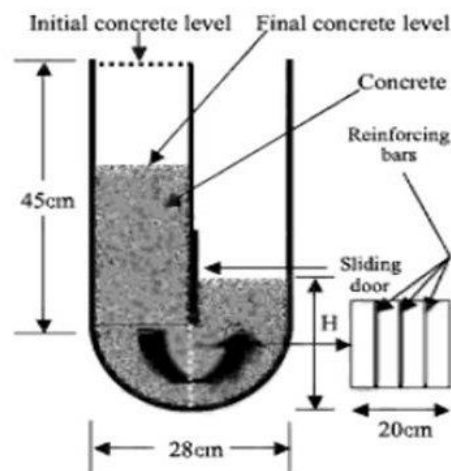
Σχήμα 5: Φωτογραφία δοκιμής οπτικού δείκτη σταθερότητας [πηγή: www.semanticscholar.org]

- iv. Δοκιμή χοάνης V (V-funnel): Αποτελεί μία μέθοδο εκτίμησης στην αντίσταση διαχωρισμού, με χρήση μίας χοάνης σχήματος V , με όγκο 12 λίτρα , όπου μετριέται ο χρόνος απορροής του μίγματος και αφορά την μέγιστη διάμετρο των χονδρόκοκκων αδρανών μικρότερης των 25 mm.
- v. Δοκιμή δοχείου L (L-box): Εδώ έχουμε την αποτίμηση της εμποδιζόμενης ροής-διελευσιμότητας του ΑΣΣ για περιπτώσεις όπου υπάρχει πυκνός σπλισμός ή μορφή στένωσης. Για την δοκιμή αυτή σε δοχείο ορθογωνικής διατομής σχήματος L (οριζόντιο και κατακόρυφο τμήμα) πληρώνεται το κατακόρυφο τμήμα με ΑΣΣ. Ανασηκώνουμε την θύρα που διαχωρίζει τα δύο τμήματα μεταξύ τους , και αφήνει το μίγμα να εκρεύσει στο οριζόντιο τμήμα, στο οποίο έχουν τοποθετηθεί ενισχυτικές ράβδοι. Έπειτα μετριέται το ποσοστιαίο ύψος από το σκυρόδεμα στο άκρο του οριζόντιου τμήματος ως προς το αντίστοιχο ύψος στο κατακόρυφο τμήμα και τελικά συγκρίνεται ο λόγος των υψών από το οποίο θα προκύψουν και τα κατάλληλα συμπεράσματα.



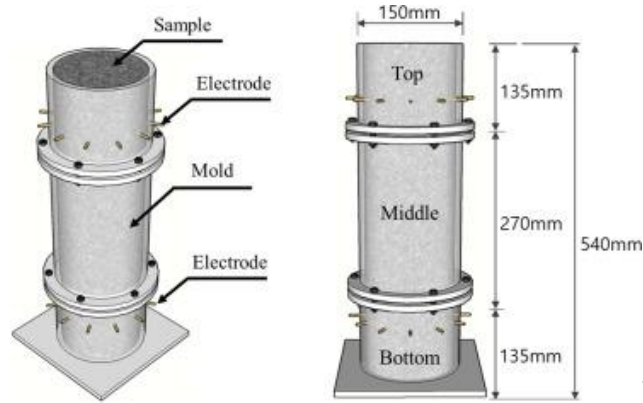
Σχήμα 6: Απεικόνιση δοκιμής χοάνης V και L-box [πηγή: www.researchgate.net]

- vi. Δοκιμή δοχείου U (U-box): Και εδώ έχουμε αποτίμηση της διειλεσιμότητας σε συνθήκες εμποδιζόμενης ροής, όπου εμφανίζεται μεγαλύτερος κίνδυνος να γίνει έμφραξη κατά την διέλευση μέσα από τους οπλισμούς. Η διαδικασία πειράματος είναι με ένα δοχείο διατομής σχήματος U (δεξί και αριστερό τμήμα) το γεμίζουμε με ΑΣΣ, ανασηκώνουμε την θύρα που διαχωρίζει τα δύο τμήματα και αφήνουμε το μίγμα να διέλθει από τους οπλισμούς που είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό. Έπειτα θα γίνει μέτρηση του ύψους στο οποίο θα έχουν ισορροπήσει τα δύο τμήματα και βάσει της υψομετρικής τους διαφοράς θα υπολογιστεί εάν υπάρχει απόμμιξη και σε τι βαθμό γίνεται η εμπόδιση της διέλευσης του ΑΣΣ.



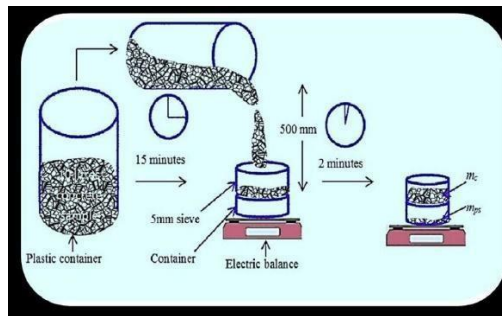
Σχήμα 7: Απεικόνιση δοκιμής δοχείου U [πηγή: dreamcivil.com]

- vii. Δοκιμή απόμμιξης στήλης σκυροδέματος (column segregation): Στην δοκιμή της απόμμιξης ελέγχεται και εκτιμάται η σταθερότητα των μιγμάτων του ΑΣΣ όπως και η ικανότητα αντίστασης σε απόμμιξη του σκυροδέματος. Τοποθετούμε σε έναν σωλήνα που είναι χωρισμένο σε αυτοτελή τμήματα, το ΑΣΣ. Τα τμήματα αυτά διαχωρίζονται με πλάκες, με τρόπο τέτοιο ώστε να ην επιτρέπει να χαθεί μέρος του δείγματος αλλά ούτε να αναμειχθεί το σκυρόδεμα. Οπότε γίνεται έλεγχος και εξετάζονται οι ιδιότητες του εκάστοτε τμήματος ξεχωριστά, απορρίπτοντας όμως το κάτω μέρος.



Σχήμα 8: Απεικόνιση δοκιμής απόμιξης στήλης σκυροδέματος [πηγή: www.sciencedirect.com]

- viii. Δοκιμή σταθερότητας μέσω κοσκίνισης (sieve segregation resistance ή sieve stability test): Και σε αυτή την δοκιμή γίνεται εκτίμηση της σταθερότητας των εκάστοτε μιγμάτων ΑΣΣ, όπως και η ικανότητα αντίστασης σε απόμιξη από το σκυρόδεμα. Σε αυτή την δοκιμή τοποθετούμε σε δοχείο το μίγμα και αφήνεται να ηρεμήσει αφού έχει πρώτα ζυγιστεί. Έπειτα το μίγμα θα διέλθει από κόσκινα και το προϊόν που θα περάσει θα ζυγιστεί εκ νέου. Επομένως με την τελευταία ζύγιση θα υπολογιστεί και η απόμιξη του ΑΣΣ.



Σχήμα 9: Απεικόνιση δοκιμής σταθερότητας μέσω κοσκίνισης [πηγή: **Harith Sabah Naji, 2018**]

- ix. Δοκιμή δακτυλίου J (J-ring): Η δοκιμή αυτή θυμίζει κάπως την δοκιμή διάστρωσης σε μικρή όμως κλίμακα. Γίνεται έλεγχος εάν το σκυρόδεμα παραμένει συνεκτικό και εάν διέρχεται από τοποθετημένους ράβδους πυκνού οπλισμού. Τοποθετούμε αρχικά το ΑΣΣ σε ένα πρότυπο κώνο, ο οποίος βρίσκεται εντός σακτυλίου J (δακτύλιος με περιμετρικές κατακόρυφες ράβδους). Ανασηκώνουμε έπειτα τον κώνο και μετριούνται οι τιμές εξάπλωσης διαμέσου του δακτυλίου J.



Σχήμα 10: Απεικόνιση δοκιμής δακτυλίου J [πηγή: www.atlanticsupply.com]

1.1.3.1. Ειδικά ΑΣΣ

Το ΑΣΣ αποτελεί μία ειδική κατηγορία σκυροδέματος, όμως υπάρχουν και άλλοι τύποι ΑΣΣ που χρησιμοποιούνται σε έργα μεγάλης σπουδαιότητας ή βρίσκονται στο στάδιο έρευνας ώστε να καλύψουν ανάγκες με (i) την βελτίωση της υπάρχουσας ρεολογίας (ii) την εφαρμογή σε έργα με μεγάλες απαιτήσεις, (iii) την ικανότητα να ανταπεξέρχεται σε προκλήσεις εφαρμογής και λειτουργίας.

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

Σχήμα 11: Διάφοροι τύποι αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος [www.researchgate.net]

Για τους περισσότερους ειδικούς τύπους ΑΣΣ κάνουμε λόγο για ειδικά μη-αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα. Τα χαρακτηριστικά της αυτοσυμπύκνωσης αλλά και της ρεολογικής συμπεριφοράς αναμένουμε να έχουν ευεργετικά αποτελέσματα και πλεονεκτήματα καθώς θα επιφέρουν μείωση στα κόστη όπως επίσης και στον χρόνο υλοποίησης των έργων. Επίσης στοχεύουν στην μείωση των υλικών, την ικανότητα πλήρωσης κενών

αλλά και την ικανότητα να καλής συμπεριφοράς με προτοποθετημένα αδρανή και βραχώδεις λίθους. Ένα άλλο κομμάτι που είναι υπό εξέταση είναι η μείωση του βάρους του εκάστοτε ΑΣΣ με χρήση ελαφρών αδρανών, την δυνατότητα πλήρωσης περίπλοκων διατομών, καθώς και τον περιορισμό των εργασιών φινιρίσματος και τελειωμάτων με την χρήση αυτοεπιπεδούμενο σκυρόδεμα αλλά και ειδικών κονιαμάτων.

1.1.4.1. Είδη και επίδραση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών στα χαρακτηριστικά του ΑΣΣ

Στο ΑΣΣ όπως και σε όλα τα σκυροδέματα χρησιμοποιούνται αδρανή υλικά, συγκεκριμένα τα λεπτόκοκκα υλικά τα οποία δίνουν καλύτερα ρεολογικά χαρακτηριστικά και μειώνουν τον κίνδυνο του σκυροδέματος για διαχωρισμό ή εξίδρωση. Πρέπει επομένως να γίνει προσεκτική επιλογή λεπτόκοκκου πληρωτικού υλικού ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες που θέλουμε να έχει το ΑΣΣ, όπου θα πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή του μεγέθους, του σχήματος αλλά και χημικής σύστασης. Όταν υπάρχει ανάγκη για εργασιμότητα του ΑΣΣ αλλά και μείωση της εκλυόμενης θερμότητας κατά την ενυδάτωση, θα γίνεται χρήση αδρανών αλλά και χρωστικών προσθέτων. Στην σύγχρονη εποχή όπου υπάρχει αύξηση της ανάγκης για πράσινες κατασκευές αλλά και την γενικευμένη προστασία του περιβάλλοντος γίνεται μία συλλογική προσπάθεια από την επιστημονική κοινότητα ώστε να κατευθυνθούν όλοι προς την χρήση λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών από βιομηχανικά παραπροϊόντα, τα οποία υπό άλλες συνθήκες θα αποτελούσαν ρύπους για το περιβάλλον.

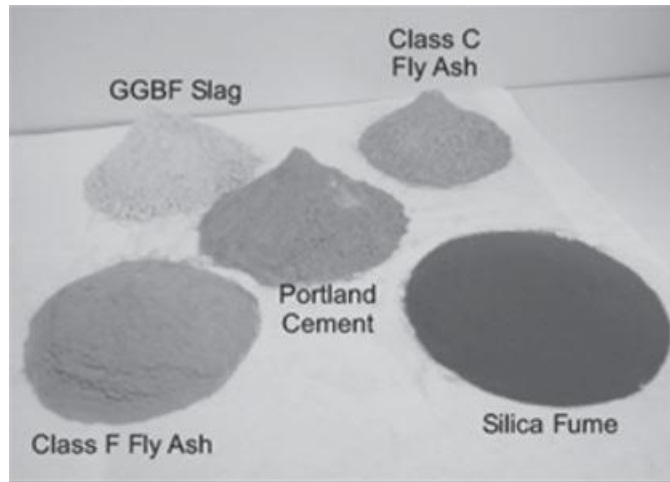
Γενικά έχουμε δύο τύπους αδρανών:

Τύπος I (ημί – αδρανή / semi-inert)

Όπου περιλαμβάνει ως πληρωτικά υλικά μερικά αδρανή όπως είναι η σκόνη ασβεστολίθου, γρανίτη ή δολομίτη σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου EN 12620 ή χρωστικές ουσίες σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου EN 12878.

Τύπος II (ποζολανικά ή δευτερεύοντα υδραυλικά) :

- **Ιπτάμενη Τέφρα** : το κύριο παραπροϊόν των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Η χρήση του στο ΑΣΣ μειώνει το διαθέσιμο νερό του μίγματος και για την επίδραση των σφαιρικών σωματιδίων της στο θιξοτροπικό χαρακτήρα του σκυροδέματος, όπως επίσης προσφέρει μείωση του διαχωρισμού των αδρανών στο κονίαμα.
- **Πυριτική Παιάλη**: αποτελεί παραπροϊόν από την βιομηχανία πυριτικών μετάλλων αλλά και από σιδηροπυριτικά κράματα. Κάνοντας χρήση του βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του, τις ρεολογικές καθώς επίσης αυξάνει και την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ. Επίσης λόγω της λεπτοτητάς του προσκολλάται επιφανειακά στα αδρανή προσφέροντας έτσι συνεκτικότητα στο μείγμα και αναβαθμίζει τις ιδιότητες του όσον αφορά τις μικρορηγματώσεις στη διεπιφάνεια των αδρανών-πάστας.
- **Σκωρία υψικαμίνου**: το παραπροϊόν υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων σε μορφή σκωρίας. Η προσθήκη του στο ΑΣΣ επιφέρει βελτίωση των ιδιοτήτων κατά την νωπή αλλά και σκληρυμένη φάση. Πρόκειται για μία λεπτόκοκκη, γενικά κοκκώδη, υδραυλικής δράσης κονία που με την χρήση της υπάρχει βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος που προστίθεται.



Σχήμα 12: Φωτογραφία τσιμέντου, ιπτάμενης τέφρας, πυριτικής παιπάλης και σκωρίας υψικαμίνου [www.nevadareadymix.com/concrete-tips/supplementary-cementitious-materials]

Τύπου II υλικά μπορούν να επιφέρουν βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων του ΑΣΣ καθώς και των μηχανικών ιδιοτήτων του, της ανθεκτικότητας του αλλά και της γενικότερης απόδοσης του σκυροδέματος. Αυτά τα οφέλη προκύπτουν από την πάστα που έχει πυκνότερη δομή καθώς και από την υδραυλική ή ποζολανική δραστηριότητα καθώς αυτά συμμετέχουν στις αντιδράσεις ενυδάτωσης. Για τους δύο αυτούς τύπους γίνεται χρήση λεπτόκοκκων υλικών στην σύνθεση του ΑΣΣ για την αποφυγή του φαινομένου απόμιξης αλλά και για την βελτίωση της μικροδομής και της συμπεριφοράς του σκυροδέματος.

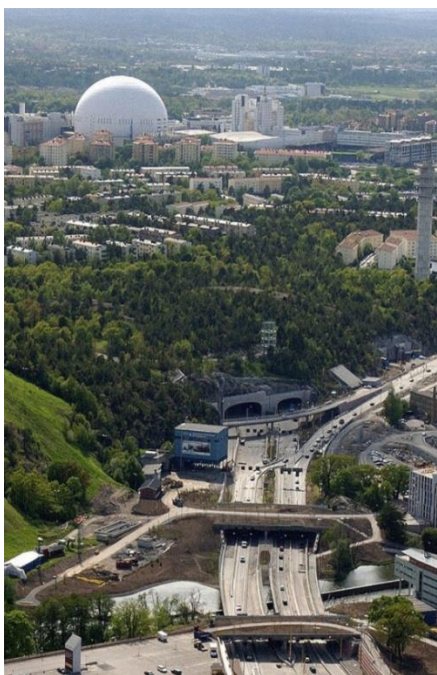
1.2 Εφαρμογές Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος

Όσον αφορά τις πρώτες εφαρμογές του ΑΣΣ, ξεκίνησαν να υλοποιούνται με πρωτεργάτη την Ιαπωνία, με την ανάπτυξη αυτού του τύπου σκυροδέματος, αρχικά ως βάση για την αγκύρωση της γέφυρας Akashi-Kaiyo με παράδοση του έργου το 1998, συνολικού ανοίγματος 1.991m. Στο συγκεκριμένο έργο επιτεύχθηκε μείωση του χρόνου κατασκευής κατά 20% με την χρήση του ΑΣΣ. Άλλο έργο που κατασκευάστηκε με χρήση προέντασης και ΑΣΣ είναι οι δεξαμενές αποθήκευσης του φυσικού αερίου υγρής μορφής (Liquid Natural Gas – LNG) στην Ιαπωνία και συγκεκριμένα στην πόλη Οσάκα. Χρήση του ΑΣΣ έγινε και σε αρκετά Ευρωπαϊκά έργα, ειδικά στην Γαλλία και είναι το Κέντρο Τέχνης της Meudon,



Σχήμα 13: Φωτογραφία του Αστεροσκοπείου του Meudon στην Γαλλία [<https://www.britannica.com/place/Meudon>]

,έπειτα στη Σουηδία όπου χρησιμοποιεί το ΑΣΣ για οδικά έργα , κατασκευή προκατασκευασμένων σηραγγών (σήραγγα στην περιοχή Grind). Το μεγαλύτερο υπό κατασκευή έργο που γίνεται στην εποχή μας είναι το Sodra Lanken Project στην Σουηδία, νότια της Στοκχόλμης και περιλαμβάνει 7 οδικούς άξονες, αποτελούμενοι από ένα δίκτυο γεφυρών και σηραγγών από ΑΣΣ, συνολικού μήκους του έργου αυτού στα 22.6 km με κόστος στα 800 εκατ. δολάρια. Υπολογίζεται πως για το έργο αυτό θα γίνει χρήση 225.000 m³ σκυροδέματος.



Σχήμα 14: Φωτογραφία του Sodra Lanken Project στην Σουηδία
[www.miljobarometern.stockholm.se]

Έργο επισκευής προβλήτας φόρτωσης πετρελαίου έχουμε στο Immingham της Μεγάλης Βρετανίας. Στην Ελλάδα δεν έχει ακόμα γίνει εκτεταμένη χρήση του ΑΣΣ πλην ελάχιστων τεχνικών έργων ιδιωτικά και έργων υποδομής. Συγκεκριμένα κάποιες σκυροδετήσεις και δοκιμαστικά αναμίγματα έγιναν στο εργοτάξιο Ρίου- Αντίρριου για να ελεγχθεί η πιθανότητα χρήσης στο τεχνικό αυτό έργο. Τελικά έγινε χρήση ενός στοιχείου 36m³ των μόνιμων τμημάτων του έργου με ΑΣΣ.



(α)



(β)

Σχήμα 15: Φωτογραφία (α) Κτίριο Burj Khalifa, Dubai / [<https://tasrealtymax.com/burj-khalifa/>] (β)
Δεξαμενή Αερίου LNG στην Οσάκα, Ιαπωνία
[<https://www.toyokanetsu.co.jp/global/product/plant/introduction/>]

1.3 Ανθεκτικότητα ΑΣΣ

Κάνοντας λόγο για την ανθεκτικότητα εννοούμε την αντίστασή του έναντι δράσεων από εξωτερικούς παράγοντες και την διατήρηση των ιδιοτήτων του πάνω από κάποιες τιμές αναφοράς. Έχει ήδη αναφερθεί πως μέσα στα πλεονεκτήματα του ΑΣΣ είναι η πληρέστερη συμπύκνωση μείγματος αλλά και η αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, τα οποία αναμένεται να δώσουν βελτίωση της ποιότητας των έργων οπλισμένου σκυροδέματος αλλά και αύξηση της διάρκειας ζωής τους.

Είναι σκόπιμο σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε την σημαντική επιρροή που έχει το πορώδες α (%) στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Όπου ορίζεται ως το ποσοστό όγκου ενός στερεού που καταλαμβάνει ο αέρας και το νερό, δηλαδή το ποσοστό των κενών που υπάρχουν μέσα στο στερεό σώμα. Ορίζεται από τον φαινόμενο (ολικό) όγκο του (VT) ο οποίος συνίσταται από τον όγκο του στερεού (Vs) καθώς και τον όγκο των κενών (πόρων) του στερεού (Vp). Το πορώδες (α) δίνεται μέσω της σχέσης :

$$\alpha = Vp / VT .$$

Χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες:

1. Ολικό πορώδες (total porosity): Η κατηγορία αυτή κάνει λόγο για πάσης φύσεως κενά ανεξαρτήτως της μορφής και της διασυνδεσιμότητάς τους
2. Ενεργό πορώδες (effective porosity): Το οποίο αντιστοιχεί σε πόρους που επικοινωνούν (συνδέονται). Ουσιαστικά είναι η δυνατότητα του στερεού να αποθηκεύει ρευστά.
3. Υπολειμματικό πορώδες (residual porosity): Πρόκειται για εκείνο που αντιστοιχεί στο ποσοστό των πόρων (κενών) οι οποίοι μεταξύ τους θα έχουν απόσταση και θα είναι απομονωμένοι.

Έχει παρατηρηθεί πως υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στο συμβατικό σκυρόδεμα και το ΑΣΣ στην μικροδομή λόγω της χρήσης πρόσθετων, ρευστοποιητών αλλά και από την απουσία δόνησης. Επομένως το ΑΣΣ έχει την τάση για μειωμένο πορώδες αλλά και συνδεσιμότητα μεταξύ των κενών.

Υδατοαπορροφητικότητα: είναι η ικανότητα του σκυροδέματος να απορροφάει νερό όταν τα δύο αυτά στοιχεία έρχονται σε επαφή. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

1. η αναλογία του μίγματος-σκυροδέματος
2. τα προστιθέμενα χημικά πρόσμικτα και πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά
3. το πορώδες, δηλαδή η περιεκτικότητα σε αέρα
4. η παρουσία μικρορωγμών
5. η παρουσία στεγνωτικών στην επιφάνεια σκυροδέματος
6. η υγρασία του δοκιμίου κατά τη στιγμή της κάθε δοκιμής
7. η σύνθεση καθώς και τα φυσικά χαρακτηριστικά του τσιμέντου - αδρανών
8. ο χρόνος και οι συνθήκες ωρίμανσης
9. η μέθοδος χύτευσης και συμπύκνωσης
10. ο βαθμός ενυδάτωσης ή η ηλικία

Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε πως το ΑΣΣ εμφανίζει κατά 30% λιγότερη υδατοαπορροφητικότητα από ότι το συμβατό σκυρόδεμα, γεγονός που οφείλεται στην συνεκτικότερη δομή του αλλά και την βελτιωμένη επιφάνεια του, όπου από αυτό συνεπάγεται μικρότερο ενεργό πορώδες αλλά και μεγαλύτερο χρόνο διείσδυσης του νερού. Οι Zhu και Bartos πραγματοποίησαν μία σειρά πειραμάτων και απέδειξαν πως με την μείωση της ποιότητας του σκυροδέματος θα έχουμε μεγαλύτερη διαφορά στην υδατοαπορροφητικότητα των ΑΣΣ και ΣΣ ενώ όσο αυξάνεται η ποιότητα παρουσιάζει μία εξομάλυνση των δύο τιμών αυτών.

Η διάβρωση μέσω χλωριόντων αποτελεί ένα βασικό παράγοντα διάβρωσης του σκυροδέματος καθώς προσβάλλει τον οπλισμό αλλά και συνολικά στην μείωση της ποιότητας της κατασκευής. Η διείσδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα προσβάλλει τον οπλισμό και προκαλεί το φαινόμενο της βελονοειδής διάβρωσης.

Το φαινόμενο της διάβρωσης επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τον οπλισμό του σκυροδέματος και αποτελεί από τις βασικές αιτίες φθοράς των κατασκευών. Για τον λόγο αυτό ο οπλισμός διαθέτει μία επικάλυψη που είναι ένα είδους αμυντικός μηχανισμός έναντι στο φαινόμενο αυτό. Η επίδραση των χλωριόντων επιφέρει μείωση του pH των πόρων του σκυροδέματος με αποτέλεσμα αλκαλικές τιμές του εύρους 9 – 12.5 να γίνεται όξινο με τιμές κάτω από 7.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Ανθεκτικότητα ΑΣΣ με εναλλακτικά λεπτόκοκκα πληρωτικά

Την σύγχρονη εποχή επικρατεί η φιλοσοφία της ανακύκλωσης υλικών, της πράσινης ανάπτυξης, απ' όπου δεν θα μπορούσε να μην συμπεριληφθεί στην λίστα και το σκυρόδεμα όπου δημιουργεί μία συνολική παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) 5-8% των συνολικών παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών. Δύο είναι οι κύριες πηγές παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα, η πρώτη αφορά την ενέργεια που απαιτείται για την καύση του κλίνκερ και η δεύτερη συνδέεται με την φυσική απελευθέρωση του CO₂ που σχετίζεται με την απανθρακοποίηση του ασβεστόλιθου σε υψηλές θερμοκρασίες (πύρωση).

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές μελέτες όσον αφορά το ΑΣΣ και το ΣΣ με σκοπό την ανακύκλωση των υλικών του με εναλλακτικά υλικά πλήρωσης στο μείγμα. Συγκεκριμένα στο ΑΣΣ έχει χρησιμοποιηθεί η σκόνη ασβεστολίθου, ως πληρωτικό υλικό. Επίσης πληρωτικό ποζολανικό υλικό έχει χρησιμοποιηθεί ο περλίτης και σε πιο μικρές αναλογίες ο μετακαολίνης (MK).

Ο περλίτης γενικά είναι ένα υαλώδες ηφαιστειακό πέτρωμα. Θεωρείται ως ποζολανικό υλικό καθώς έχει υψηλή περιεκτικότητα σε SiO₂ και Al₂O₃ (Rashad, 2016). Στην Ελλάδα έχουμε παραγωγή που φτάνει τους 700.000,00 τόνους περλίτη ανά έτος, πράγμα το οποίο καλύπτει το 25% της παγκόσμιας παραγωγής. Το 10% του περλίτη που επεξεργάζεται αποβάλλεται σαν βιομηχανικό παραπροϊόν και παραμένει αχρησιμοποίητο. Στον κατασκευαστικό τομέα μόνο ένα μικρό ποσοστό του αναξιοποίητου περλίτη ανακυκλώνεται και χρησιμοποιείται, γεγονός που αφήνει μεγάλα περιθώρια για περαιτέρω έρευνα και δημιουργία ευκαιριών για αξιοποίηση ανακυκλώσιμων υλικών ώστε να περιοριστούν τα περιβαλλοντικά απόβλητα.

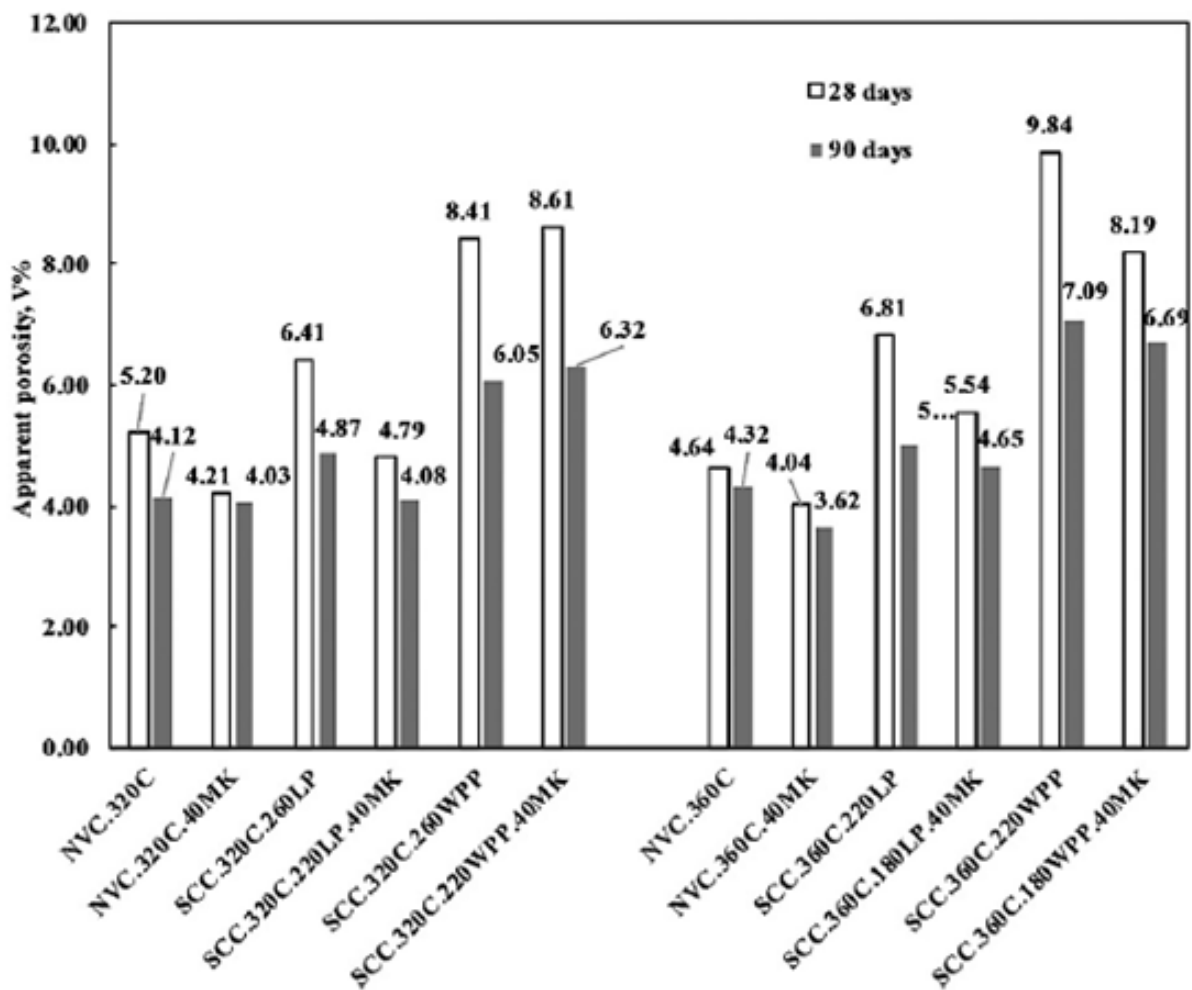
Παράλληλα εξετάζονται και η χρησιμοποίηση άλλων βιομηχανικών παραπροϊόντων όπως της σκόνης αποκονίωσης της περιστροφικής καμίνου (CKD) και της σκόνης αποκονίωσης βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (BPD) ως πληρωτικών υλικών που θα γίνει χρήση τους για την τελική παραγωγή του ΑΣΣ. Μία δυνατότητα αξιοποίησης τους είναι η ανακύκλωσή της στην παραγωγή κλίνκερ, όμως αυτή αποφεύγεται λόγω των προδιαγραφών για περιεκτικότητα σε αλκάλια μικρότερη από 0,6% για αποφυγή της πιθανότητας αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης. Ο Sri Ravindrarajah είχε εξερευνήσει δυνατότητες του CKD στο σκυρόδεμα αναφέροντας ακόμα και μερική αντικατάσταση του τσιμέντου. Αναφέροντας πως το CKD αποτελεί ένα τσιμεντοειδές υλικό που καθυστερεί την πήξη του τσιμέντου, όμως αυξάνει την απαίτηση σε νερό για σταθερή συνοχή ενώ παράλληλα μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος.

Λαμβάνοντας υπόψη μας και προηγούμενα αποτελέσματα μελετών όπου σε μία από αυτές είχαμε την παρασκευή οχτώ συνολικά μειγμάτων από σκυρόδεμα εκ των οποίων τα τέσσερα από αυτά χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Ι με 0%, 5%, 10% και

15% CKD ως αντικατάσταση τσιμέντου. Στα απομείναντα τέσσερα έχουμε την χρησιμοποίηση τσιμέντου τύπου V με τις αναλογίες του CKD να παραμένουν παρόμοιες με αυτές του τσιμέντου τύπου I. Σε αυτά που έγινε αντικατάσταση τσιμέντου με την αύξηση του CKD είχαμε αύξηση της διαπερατότητας χλωριόντων, το οποίο πιθανώς να οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης χλωριόντων από την προσθήκη του CKD. Ένα φαινόμενο κατά το οποίο η αύξηση της ποσότητας χλωριόντων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης του σκυροδέματος όπου δίνει με την σειρά του μία μεγαλύτερη διαπερατότητα των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Επομένως όσο αυξάνει η CKD σαν ποσοστό τόσο μεγαλύτερη διαπερατότητα χλωριόντων εμφανίζεται. Επίσης στα δείγματα με χρήση τσιμέντου τύπου V έχουμε μεγαλύτερη διαπερατότητα όπου μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλότερη δέσμευση του σε χλωριόντα σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα με χρήση τσιμέντου τύπου I.

Ακόμα μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε είναι από τους Erdem et al. (2007) όπου εξετάστηκε η χρήση περλίτη ως αντικατάσταση του κλίνκερ σε ποσοστό έως 30% και τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση της αντοχής του τσιμέντου. Επιπροσθέτως ο Ramezaniapour et al. (2014) με την χρήση αυτή την φορά ακατέργαστου περλίτη κατόπιν έψησης, επέδειξε ενίσχυση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Σε συνέχεια των ερευνών για τον ακατέργαστο και διογκωμένο περλίτη αυτή την φορά οι Bektas et al. (2005) έδειξαν πως μπορούν με τις ιδιότητες τους να καταστείλουν την αλκαλιοπυριτική αντίδραση.

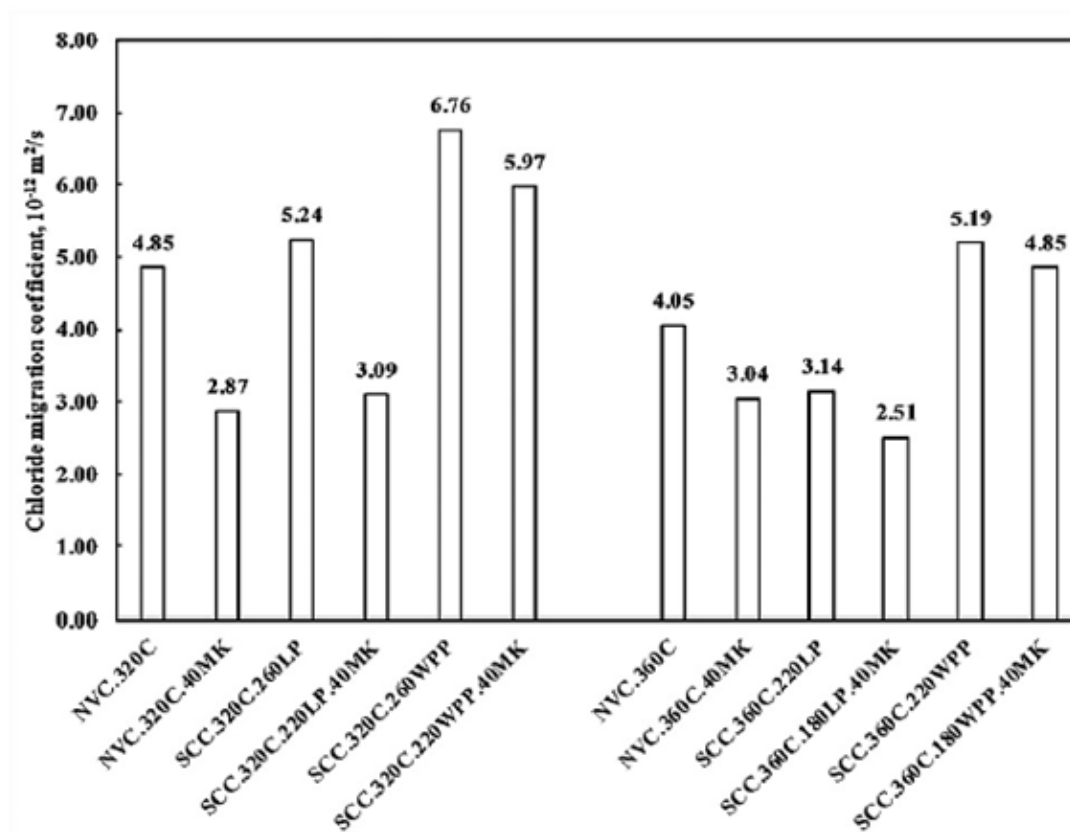
Όσον αφορά την επίδραση ενός συνδετικού υλικού και την επίδραση που αυτό έχει στον βαθμό απορρόφησης νερού, αποτελέσματα ερευνών από (Da Silva and De Brito, 2015; Dinakar et al., 2013) το απέδειξαν. Όπου υπάρχει σύνδεση της σχέσης πορώδους του σκυροδέματος με την αναλογία νερού προς τσιμέντο, με υψηλότερες αναλογίες νερού προς τσιμέντο να δίνουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο όγκο πόρων, αυξάνοντας δηλαδή τον όγκο των προσβάσιμων πόρων. Στο παρακάτω σχήμα ... έχουμε εικόνα για δείγματα από ΑΣΣ που περιλαμβάνουν σκόνη του παραπροϊόντος περλίτη (WPP) ως πληρωτικό υλικό στα μείγματα και αυτό που παρατηρούμε είναι οι υψηλότερες τιμές απορρόφησης σε σχέση με τα άλλα δείγματα. Έγινε επίσης δοκιμή ταχείας διείσδυσης χλωριόντων για δύο κυλινδρικά δείγματα (φ100x50 mm) σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου NT Build 492 Standard (Nordtest, 1999) και για ηλικίες 28 αλλά και 90 ημερών.



Σχήμα 16: Μέση τιμή φαινόμενου πορώδους των μιγμάτων σε ηλικία 28 και 90 ημερών.

Από τους Törkmen και Kantarci (2007) έχουμε το συμπέρασμα πως με την χρήση διογκωμένου περλίτη ως υποκατάστατο της φυσικής άμμου κατ' όγκο μας δίνει αύξηση στο φυσικό πορώδες. Ακόμα μία έρευνα έλαβε χώρα από τον Dawood (2015) όπου με μείωση της ποσότητας φυσικής άμμου σε σκυροδέματα και αντικατάστασής της με 60% (μέγιστο μέγεθος 0,15 mm), από διογκωμένο περλίτη έχουμε και πάλι αύξηση στην απαίτηση νερού έως και 24%. Όμως στις 90 ημέρες στα δείγματα με περλίτη έχουμε την μείωση στο πορώδες λόγω της ποζολανικής του δράσης, μέσω μετατροπής $Ca(OH)_2$ σε επιπλέον ένυδρο πυριτικό ασβέστιο, πράγμα που βελτιώνει την μικροδομή της σκληρυμένης πάστας τσιμέντου. Με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ του βάθους αλλά και του χρόνου διείσδυσης χλωρίου, μας δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων σε μη σταθερή κατάσταση (D_{nssm}). Σαν αποτέλεσμα προκύπτει πως χαμηλότερη περιεκτικότητα σε συνδετικά υλικά μας δίνει μεγαλύτερο συντελεστή διείσδυσης. Στο παρακάτω σχήμα για μείγματα στις 90 ημέρες μας δείχνει τους μετρούμενους μέσους συντελεστές μετανάστευσης χλωριόντων. Από το κριτήριο των Heirman et al. (2006) μας δίνει σαν αποτέλεσμα πως σχεδόν όλες οι

λαμβανόμενες τιμές D_{nssm} εμπίπτουν στην κατηγορία «καλή αντίσταση έναντι διείσδυσης χλωριόντων». Ακόμα ένα συμπέρασμα είναι πως με την προσθήκη περλίτη στο ΑΣΣ υπάρχει σημαντικά αυξημένη ικανότητα μετανάστευσης χλωριόντων απ' ότι τα δείγματα ΑΣΣ με σκόνη ασβεστολίθου ή κανονικά δονούμενου σκυροδέματος.



Σχήμα 17: Μέση τιμή συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων διαφόρων συνθέσεων σκυροδέματος σε ηλικία 90 ημερών.

Συμπερασματικά για την σκόνη περλίτη (ΣΠΠ) εμφανίζει αρκετά αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά σαν πληρωτικό αλλά και ποζολανικό υλικό, προσδίδοντας στο ΑΣΣ εξαιρετικές ιδιότητες σε νωπή αλλά ταυτόχρονα και στην σκληρυμένη κατάστασή του. Παρόλο που έγινε χρήση υψηλών όγκων από ΣΠΠ στο ΑΣΣ έχουμε ικανοποίηση των απαιτήσεων του EFNARC για ρευστότητα και ιξώδες. Με την προσθήκη του ΣΠΠ έχουμε βελτίωση των ιδιοτήτων του σκληρυμένου ΑΣΣ λόγω του filler effect αλλά και της ποζολανικής τους ικανότητας, γεγονός που οδήγησε σε μία γενική ενίσχυση της μικροδομής του σκυροδέματος.

Όσον αφορά την χρήση σκόνης ασβεστολίθου ως πληρωτικού υλικού έχουμε την έρευνα των Οι Bonavetti et al. Με αναλογίες τσιμέντου νερού στο 0.30 με 0.34 . Με την χρήση του υλικού αυτού έχουμε την αύξηση της θλιπτικής του αντοχής, γεγονός που μπορεί να οφείλεται πως το πληρωτικό αυτό υλικό είναι αδρανές και λειτουργεί απλά σαν πληρωτικό. Η θλιπτική αντοχή που μας έδινε για λόγο νερού προς τσιμέντο 0.30 ήταν μεταξύ 43 και 58 MPa. Επίσης ένα βασικό αποτέλεσμα που εξήχθη από αυτή την μελέτη αφορά τον συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης του σκυροδέματος, όπου έχει μειωθεί με την αύξηση της περιεκτικότητας του υλικού πλήρωσης και πλέον οι τιμές που κυμαίνεται είναι στο 200 kg/m³ έναντι 50 kg/m³ που ήταν πριν. Επίσης να

αναφερθεί πως οι τιμές του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης εξαρτώνται από το πορώδες. Για δείγματα με ΑΣΣ και χρήση πληρωτικού υλικού μαρμαρόσκονη (MD) με περιεκτικότητα πληρωτικού με τιμές μικρότερες από 200 kg/m³, έχουμε πλήρωση των κενών και η τριχοειδή ικανότητα του σκυροδέματος μειώθηκε λόγω της υψηλής εργασιμότητας. Ένας ακόμα ερευνητής ο Tasdemir έκανε λόγο για τον συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης του σκυροδέματος πως παρατήρησε μία μικρή μείωση με την ταυτόχρονη αύξηση της αντοχής του σε θλίψη. Συνοψίζοντας για την μαρμαρόσκονη και τις θετικές επιδράσεις της στο νωπό αλλά και σκληρυμένου ΑΣΣ, έχουμε την ανάπτυξη μίας νέας μεθόδου χρήσης της. Αντίστοιχα η MD με περιεκτικότητα μικρότερη από 200 kg/m³, σαν υλικό πλήρωσης, παρέχει ευεργετικές ιδιότητες και στις δύο καταστάσεις του ΑΣΣ. Για τον λόγο αυτό μπορούμε να κάνουμε εκτεταμένη χρήση της MD με αποτέλεσμα να μειωθεί η περιβαλλοντική ρύπανση από αυτό το παραπροϊόν.

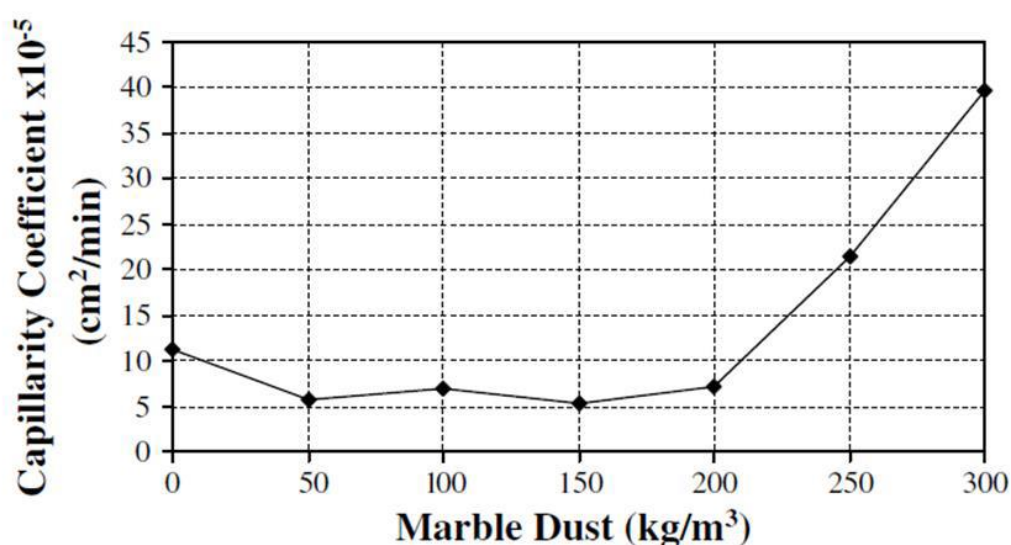
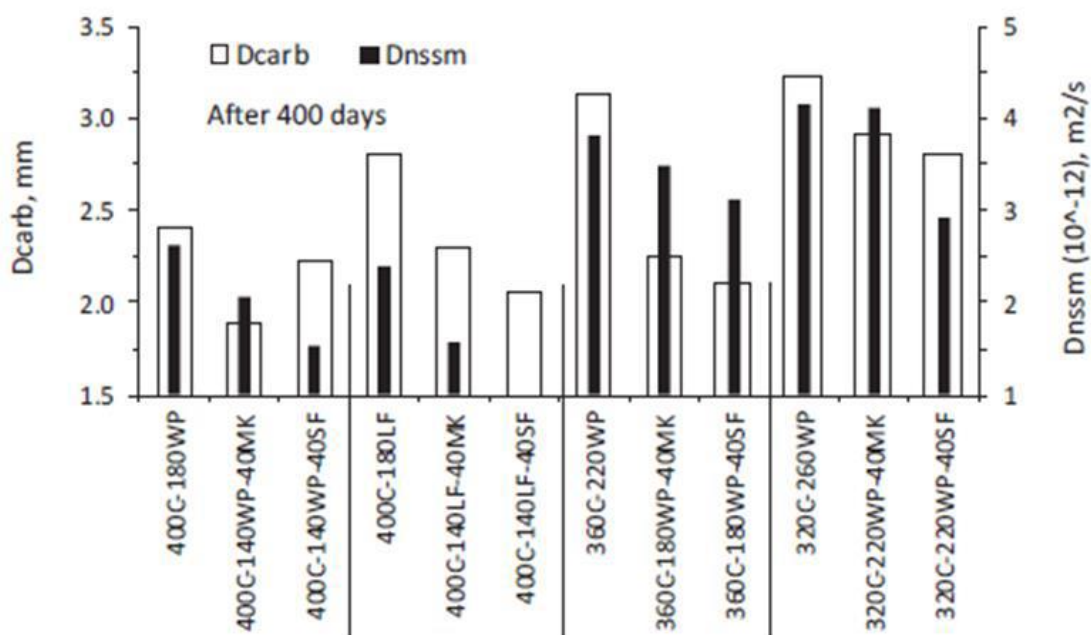


Fig. 11. Variation of capillarity coefficients related to filler content

Σχήμα 18: Διακύμανση των συντελεστών τριχοειδούς σε σχέση με την περιεκτικότητα σε filler(1)

Ακολουθεί η μελέτη των Wu et al. όπου έδειξαν μειωμένο πορώδες στις ζώνες μετάβασης διεπιφάνειας για τριμερή συνδετικά που όμως θα περιέχουν ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά (LF limestone filler). Επόμενο παραπροϊόν που θα αναλυθεί είναι η μετακαολίνη (MK) όπου προσέδωσε στα δείγματα από ΑΣΣ ποζολανικές αντιδράσεις και βελτίωση των τριχοειδών πόρων καθώς και με την προσθήκη πυριτικής παιπάλης μείωσε σε μεγάλο βαθμό τα ποσοστά σε νερό 1,84% και 1,74% για τα μείγματα 400C-140LF-40MK και 400C-140LF-40SF αντίστοιχα. Αποτελέσματα για δοκίμια που περιείχαν υψηλότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (χαμηλότερη συγκέντρωση σκόνη περλίτη), ανεξάρτητα της ηλικίας των δοκιμίων, εξετάστηκαν και έδειξαν μειωμένα βάθη ενανθράκωσης αλλά και συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων. Για παράδειγμα μετά από 400 ημέρες το βάθος ενανθράκωσης εμφανίστηκε μειωμένο από 3,24 σε 3,14 mm για τα μείγματα 320C-260WP, 360C-220WP και 400C-180WP, αντίστοιχα. Μειώθηκε το βάθος διείσδυσης χλωριόντων (D_{nssm}) από 4,15 σε 3,81 και 2,63x10⁻¹² m²/s, αντίστοιχα. Γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο χαμηλότερο λόγο w/c (δηλαδή από

0,56 έως 0,5 και 0,45, αντίστοιχα), όπως και από την μειωμένη περιεκτικότητα σε σκόνη παραπροϊόντος του περλίτη. Όπως αναφέραμε προηγουμένως με την προσθήκη μετακαολίτη ή πυριτικής παιπάλης έχουμε θετική επίδραση για την μείωση του βάθους ενανθράκωσης αλλά και του βάθους διείσδυσης χλωριόντων (D_{nssm}), από τις ποζολανικές αντιδράσεις και των συνεργιστικών επιδράσεων που προσφέρουν βελτίωση της μικροδομής του σκυροδέματος αλλά και τις ζώνες μετάβασης μεταξύ των επιφανειών. Το μίγμα 400C-180LF κατά κύριο λόγο εμφανίζει μεγαλύτερο βάθος ενανθράκωσης και διείσδυσης χλωριόντων (D_{nssm}) σε αντίθεση με το ισοδύναμο 400C-180WP το οποίο όμως περιέχει σκόνη περλίτη σαν πληρωτικό υλικό. Υποδηλώνεται έτσι πως η επίδραση της πλήρωσης με ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά είναι σε μεγάλο βαθμό ανεπαρκής για την μείωση των συντελεστών μάζας. Από μελέτες που διεκπεραιώθηκαν εξάγεται το συμπέρασμα πως η ικανότητα διείσδυσης των χλωριόντων δεν είναι μονοδιάστατο φαινόμενο αλλά μία διαδικασία όπου εξαρτάται από το πορώδες της μήτρας, αλλά συμπεριλαμβάνει παράγοντες όπως την περιεκτικότητα σε χλωριόντα (CH), η διάχυση, η τριχοειδής αναρρόφηση και η μετανάστευση στο ηλεκτρικό πεδίο. Όταν όμως υπάρξει προσθήκη στο μείγμα ασβεστολιθικών πληρωτικών μαζί με μετακαολίνη (MK) ή πυριτική παιπάλη (SF) παρατηρείτε σημαντική μείωση στην μεταφορά μάζας. Στο βάθος διείσδυσης χλωριόντων (D_{nssm}) μετά 28 ημερών μειώθηκε από $5,52 \times 10^{-12}$ m²/s για το μείγμα 400C-180LF σε $3,71$ και $2,52 \times 10^{-12}$ m²/s για τα μείγματα 400C-140LF-40MK και 400C-140LF-40SF.



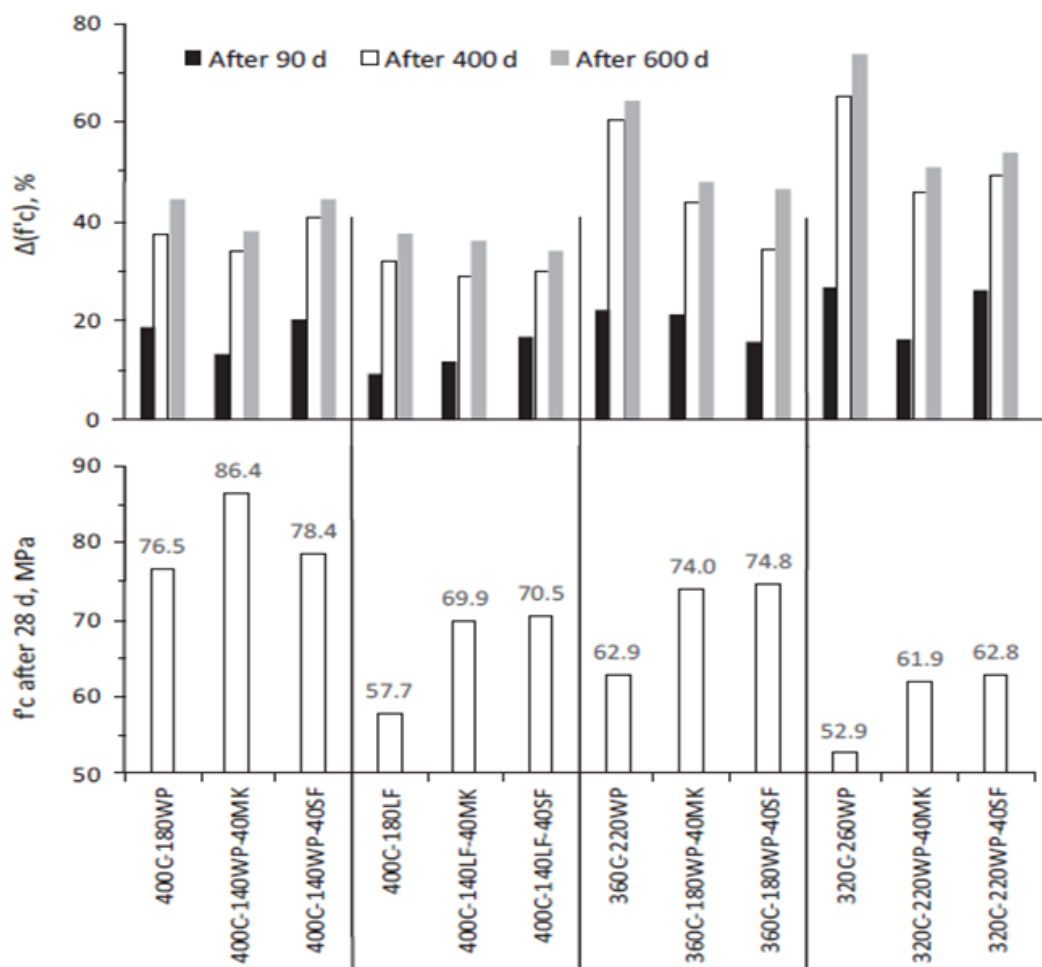
Σχήμα 19: Απεικόνιση μιγμάτων σε βάθος ενανθράκωσης και βάθος διείσδυσης χλωριόντων (D_{nssm}) μετρούμενο μετά από 400 μέρες.

Πίνακας 1: Βάθος ενανθράκωσης και βάθος διείσδυσης χλωριόνων (D_{nssm}) μετρούμενο μετά από 400 μέρες σε διαφορετικά μίγματα.

	D_{carb} , mm				$D_{nssm} \times 10^{-12}$, m ² /s		
	28 d*	90 d	400 d	600 d	28 d	90 d	460 d
400C-180WP	0.4	0.91	2.41	5.05	5.25	3.01	2.63
400C-140WP-40MK	0.4	0.54	1.9	4.1	4.31	3.09	2.06
400C-140WP-40SF	0.4	0.6	2.23	3.91	4.94	2.49	1.54
400C-180LF	0.55	0.72	2.81	5.2	5.52	2.98	2.41
400C-140LF-40MK	0.35	0.66	2.3	4.61	3.71	2.5	1.57
400C-140LF-40SF	0.4	0.62	2.05	3.93	2.52	1.25	n/a
360C-220WP	0.65	0.81	3.14	5.92	6.8	5.16	3.81
360C-180WP-40MK	0.6	0.72	2.26	4.82	5.43	4.85	3.49
360C-180WP-40SF	0.55	0.63	2.1	4.6	5.66	4.49	3.12
320C-260WP	0.7	1.04	3.24	6.31	11.01	6.76	4.15
320C-220WP-40MK	0.65	0.91	2.92	5.75	7.53	5.97	4.12
320C-220WP-40SF	0.65	1.05	2.81	5.53	5.99	4.51	2.94

* D_{carb} values at 28 days were rounded to the nearest 0.05 mm.

Γενικά το ΑΣΣ με την προσθήκη περλίτη προσέφερε υψηλές τιμές θλιπτικής αντοχής f_c από τα αντίστοιχα μίγματα με ασβεστολιθικά πληρωτικά, που όμως αποδίδετε σε διαφορετική σκόνη, τις φυσικοχημικές συνθέσεις και ιδιότητες. Ο περλίτης αποτελεί μία σκόνη πλούσια σε πυρίτιο και αργίλιο τα οποία αντιδρούν με τον πορτλαντίτη στην φάση ενυδάτωσης του τσιμέντου, αντίθετα το ασβεστολιθικό πληρωτικό αποτελεί ένα γενικά αδρανές χημικά πληρωτικό.



Σχήμα 20: Επίδραση του πληρωτικού υλικού στην θλιπτική αντοχή σε ηλικία 28 ημερών και η διακύμανση της αντοχής σε μεγαλύτερη ηλικία

Σχετικά με μείγματα που κατά την παρασκευή τους προστίθεται αυξημένη περιεκτικότητα τσιμέντου, χαμηλότερος λόγος w/c και που περιέχουν συγκέντρωση περλίτη εμφάνισαν μειωμένη διαπερατότητα νερού (τόσο ποσοστό όσο και βάθος νερού) αλλά και μεταφορικές ιδιότητες που αναφέρεται στο βάθος ενανθράκωσης, διείδυσης χλωριόντων D_{nssm}). Τέλος η αντικατάσταση των 40 kg/m³ περλίτη από μετακαολίνη ή πυριτική παιπάλη οδήγησε σε αποτελέσματα με μειωμένη διείδυση ιόντων χλωρίου και νερού, που είναι το αποτέλεσμα των ποζολανικών αντιδράσεων όσον αφορά τον καθαρισμό των ζωνών μετάβασης της διεπιφάνειας του αδρανούς πάστας.

2.1.2 Κύκλος Υγρού Ξηρού

Προηγούμενες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν με το πείραμα του κύκλου υγρού ξηρού αφορούσαν την αυτοίαση του σκυροδέματος μετά από κύκλους υγρού ξηρού και την δυνατότητα του σκυροδέματος να μπορεί να σφραγίσει ρωγμές από την επιφάνειά του και να ανακτήσει χαμένες μηχανικές ιδιότητες που λόγω των ρωγμών μπορεί να είχαν μειωθεί οι τιμές τους. Συγκεκριμένα στην έρευνα που πραγματοποίησε ο Κ. Ασπιώτης (2022) εξέτασε την ανθεκτικότητα σε κονιάματα και σκυροδέματα, εμβαπτίζοντας στο νερό τα δείγματα μέχρι κορεσμού, ακολούθως ζυγίζοντας και μετρώντας την τελική μάζα ως μάζα αναφοράς. Η συνολική διαδικασία διήρκεσε 40 κύκλους των 4 ωρών κάθε ένας από αυτούς. Η διαδικασία ήταν ως εξής:

Αρχικά βυθίζονται τα δοκίμια σε νερό όπου η θερμοκρασία είναι $25 \pm 2^\circ\text{C}$ συνολικά για 4 ώρες και εν συνεχεία ακολουθεί η ξήρανσή τους στους $80 \pm 5^\circ\text{C}$, ακολουθεί η τοποθέτηση σε πυραντήριο για 4 ώρες. Συνολικά διεκπεραιώνεται μέτρηση της μάζας των δειγμάτων ανά 5 κύκλων την ημέρα. Για την περίπτωση των σκυροδεμάτων έγινε χρήση 8 ιασμένων δοκιμίων (δύο ανά σύνθεση) αλλά και ακόμα 4 ως δειγμάτων αναφοράς (κάθε ένα ανά σύνθεση).

Για την χύτευση των δοκιμίων σκυροδεμάτων πραγματοποιήθηκε χρήση από τρεις διαφορετικές κλάσεις αδρανών (άμμος: 0-4 mm, ριζάκι: 4-8 mm, γαρμπίλι: 8-16 mm).

Οι συνθέσεις που χρησιμοποίησε παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 2: Συνθέσεις Σκυροδέματος

Μείγμα	B	Αδρανή			W ^a	SP ^b	Ίνες
		0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm			
C1	350	950	570	380	184	2.50	2.00
C4	350	950	570	380	184	2.71	2.00
C5	350	950	570	380	184	3.54	2.00
C6	350	950	570	380	184	4.49	2.00

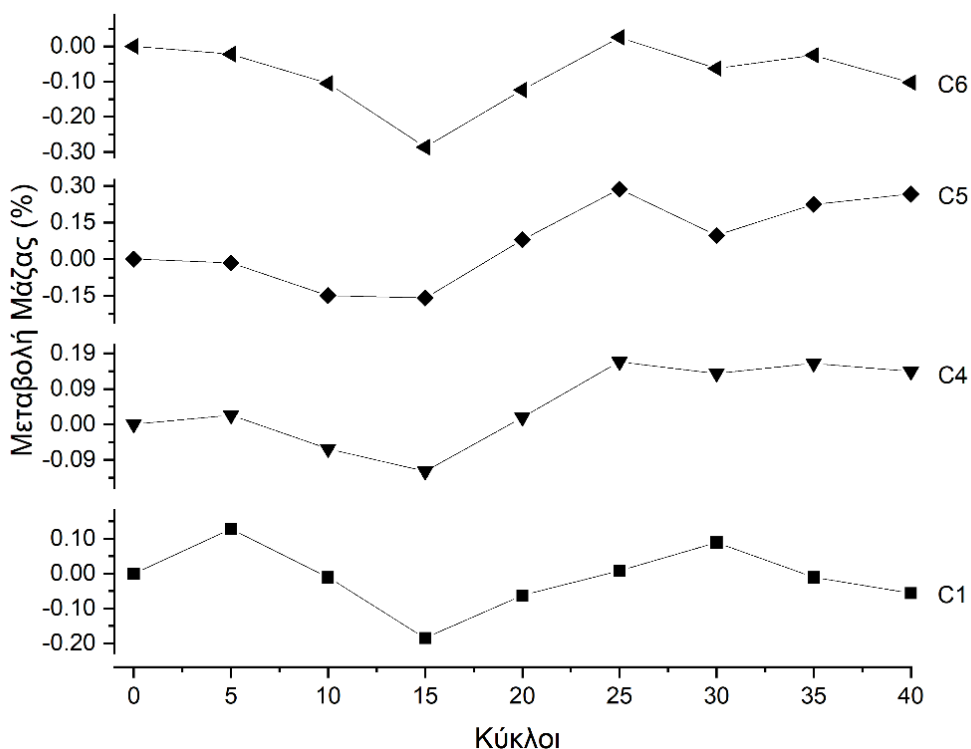
*Συνολική περιεκτικότητα σε νερό $W=184 \text{ kg/m}^3$ όπου γίνεται απορρόφηση από τα αδρανή 27 kg/m^3 , ενεργού νερού: 157 kg/m^3 ($W/B = 0.45 - \text{EN 206-1}$)

*Υπερρευστοποιητής: Sika Viscocrete

Πίνακας 3: Ιδιότητες Σκυροδέματος

Μείγμα	Κάθιση (mm)	Πυκνότητα (kg/m^3)	Περιεκτικότητα σε Αέρα (%)	Μονοαξονική θλίψη (MPa)		
				7 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες
C1	80	2350	3.1	57.2	58.6	64.5
C4	85	2330	3.2	52.3	59.6	65.1
C5	50	2371	2.0	51.1	58.4	66.5
C6	80	2351	3.0	58.8	63.5	79.4

Για την δοκιμή κύκλου υγρού ξηρού χρησιμοποιήθηκε για κάθε σύνθεση ενός δοκιμίου από σκυροδέμα. Συγκεντρωτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο παρακάτω γράφημα



Σχήμα 21 : Ποσοστιαίες μεταβολές των μαζών δοκιμίων σκυροδέματος συνολικής διάρκειας 40 κύκλων, από την δοκιμή υγρού - ξηρού. [<https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/51034>]

Προκύπτει σαν αποτέλεσμα πως η μάζα των δειγμάτων φέρουν διαφοροποιήσεις (αυξήσεις και μειώσεις) σε σχέση με την αρχική τους μάζα κατά την διάρκεια του πειράματος. Χωρίς όμως να εμφανίζονται μεγάλες διακυμάνσεις ώστε πρακτικά να θεωρούνται σταθερές. Ενδεχομένως να μην δόθηκε αρκετός χρόνος για την παραμονή της υγρασίας εντός των τριχοειδών της μήτρας των σκυροδεμάτων, επομένως να μην εμφανίζεται η διακύμανση της μετρούμενης μάζας.

Αν εξεταστούν τα διαγράμματα με πιο λεπτομερή οπτικό έλεγχο, προκύπτει πως τα δοκίμια τα οποία περιέχουν χημικά πρόσθετα παρουσιάζουν μία γενική τάση για την αύξηση της μάζας τους. Σας εξαγόμενο αποτέλεσμα και από την δοκιμή με τα κονιάματα που επίσης πραγματοποιήθηκε προκύπτει πως με την εναλλαγή εμβάπτισης μέσα στο νερό και την έκθεση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες δημιουργούνται οι καλές προϋποθέσεις για το φαινόμενο που είναι γνωστό ως ίαση. Βέβαια ο βέλτιστος κύκλος είναι από 24 με 48 ώρες και στο συγκεκριμένο πείραμα ο κύκλος διαρκεί 4 ώρες. Ένα ακόμα συμπέρασμα είναι πως οι απώλειες μάζας στα σκυροδέματα είναι μεγαλύτερες από ότι των κονιαμάτων όμως μετά τον δέκατο πέμπτο κύκλο ανακτήθηκαν. Καλύτερη σύνθεση σε αυτό το πείραμα εμφανίζεται η σύνθεση CS για τα δοκίμια σκυροδέματος.

3 Πειραματικό μέρος

3.1 Υλικά και συνθέσεις ΑΣΣ

Σε συνέχεια των διπλωματικών εργασιών (Δ. Πετράκη \[2021/03]) και των (Ι. Δημητσάνου – Ο. Μαρίνη \[2021/07]) αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα οι συνθέσεις του ΑΣΣ που χρησιμοποιήθηκαν και γίνεται μία λεπτομερή αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και οι αναλογίες σύστασής τους. Συγκεκριμένα η σύνθεση ΜΡ αποτελείται από ασβεστολιθικό φίλερ (filler) μαρμαρόσκονη υψηλής καθαρότητας. Όσον αφορά την σύνθεση CKD πρόκειται για μία σύνθεση ΑΣΣ με φίλερ από σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων , το οποίο είναι ένα παραπροϊόν που προκύπτει από την παραγωγή τσιμέντου αποτελούμενο κατά κύριο λόγο από ασβεστίτη, άλλα στοιχεία που εμπεριέχει η σύνθεση είναι χαλαζία, δολομίτη, αλβίτη, καολινίτη και ιλίτη. Σχετικά με την σύνθεση BPD είναι μία σύνθεση ΑΣΣ με φίλερ της σκόνης αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου, παραπροϊόν από την παραγωγή τσιμέντου με κύρια την περιεκτικότητα σε άσβεστο. Η σύνθεση εμπεριέχει και ανυδρίτη, σανίδινου και χλωριούχου καλίου (KCl), και επιπροσθέτως από την περιεκτικότητα σε SO_4^{2-} , αλκάλια και Cl^- . Στην σύνθεση ΕΡ κάνουμε λόγο για σύνθεση ΑΣΣ με φίλερ (filler) , όπου σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη αποτελούν άμορφο πυριτικό υλικό.

Αξίζει να αναφερθούμε στις συνθέσεις σχετικά με την επίδραση του λόγου N/T όπου και επηρεάζουν τις ιδιότητες του κάθε μείγματος. Η σύνθεση ΜΡ, BPD, CKD και ΕΡ αποτελούνται από λόγο N/T (0.6) το οποίο αποτελεί βελτιστοποιημένες συνθέσεις ως προς τις αναλογίες των αδρανών υλικών αλλά και τις περιεκτικότητες σε λεπτόκοκκα υλικά, που έχουν αυξημένο N/T με μειωμένο τσιμέντο και σκοπός είναι να αναδείξουν την θετική επίδραση της προσθήκης λεπτόκοκκων συστατικών στις ιδιότητες και χαρακτηριστικά του ΑΣΣ. Στην βάση ΜΡ πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση ίσου όγκου ασβεστολιθικού φίλερ με εναλλακτικά λεπτόκοκκα υλικά και έπειτα προέκυψαν οι συνθέσεις BPD, CKD, ΕΡ.

Πίνακας 4: Συνθέσεις ΑΣΣ και αναλογίες των συστατικών τους

Κωδικός	MP	BPD	CKD	EP
Νερό	198	198	198	198
w/c	0.66	0.66	0.66	0.66
Τσιμέντο	300	300	300	300
Ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό	250	100	100	100
Εναλλακτικό πληρωτικό υλικό	0	150	150	83
Άμμος	900	900	900	900
Ριζάκι 4-8	525	525	525	525
Γαρμπίλι 8-16	225	225	225	225
Υπερρευστοποιητής	4.95	9.36	7.26	4.8

Συμπληρωματικά συστατικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι χημικά πρόσμικτα κατά την διαδικασία σύνθεσης του κάθε μίγματος ΑΣΣ οι υπερρευστοποιητές – superplasticizers (SP) και οι ρυθμιστές ιξώδους – viscosity modifying agents (VMA). Ρυθμιστής ιξώδους (VMA) έγινε προσθήκη μόνο στα μίγματα που εμφάνισαν τάση απόμειξης. Προστέθηκε δόση VMA κατά ποσοστό 0.3% ήταν το μείγμα BPD. Στην οποία απαιτήθηκε υψηλότερο ποσοστό SP (3.12%) για να γίνει επίτευξη τελικά της επιθυμητής εξάπλωσης. Στις συνθέσεις EP και MP προέκυψε χαμηλότερες απαιτήσεις σε SP για ποσοστό 1.60% και 1.65% αντίστοιχα.

Ακολουθεί Πίνακας όπου αναλύονται τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές διαδικασίες.

Πίνακας 5: Διαστάσεις και πλήθος δοκιμίων ανάλογα την δοκιμή

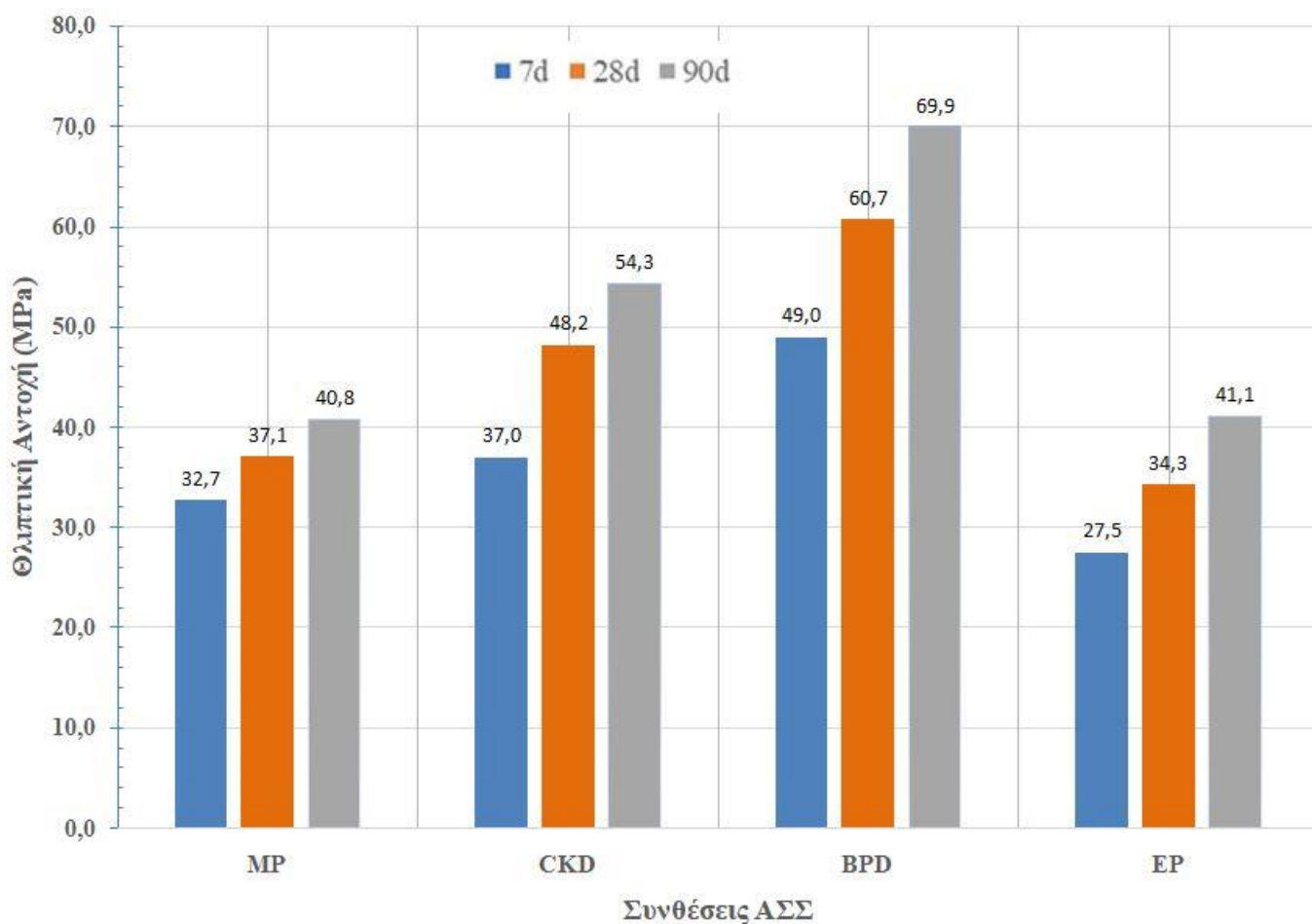
Δοκιμή	Δοκίμια	Πλήθος
Διείσδυση Χλωριόντων	κυλινδρικά D=10 cm, t=5 cm	12
Πορώδες-Τριχοειδής Απορρόφηση	κυλινδρικά D=10 cm, t=5 cm	12
Κύκλος Υγρού-Ξηρού	κυλινδρικά D=10 cm, t=5 cm	26

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές νωπού ΑΣΣ και συγκεκριμένα η δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης όπου όλες οι συνθέσεις ανήκουν στην κατηγορία SF2. Υπήρξε βελτίωση των συνθέσεων ώστε η τιμή της ανεμπόδιστης εξάπλωσης να είναι σε ένα εύρος τιμών από 690-710 mm, ώστε να είναι κατάλληλα για χρήση σε όλα τα δομικά στοιχεία. Όσον αφορά την χρήση υπερευστοποιητή θα πρέπει να γίνεται με φειδώ καθώς ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά την ρεολογική συμπεριφορά των μιγμάτων αλλά και την επίδραση των λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών στην τάση διαρροής του ΑΣΣ.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού ΑΣΣ

	MP	BPD	CKD	EP
Μοναδιαίο Βάρος (kg/m³)	2256	2358	2264	2251
Εξάπλωση – SF (mm)	690	700	695	700
T₅₀₀ (sec)	1.59	2.82	1.07	0.63
Χρόνος εκκένωσης – VF (sec)	5.1	15.3	3.6	2.05
U-Box	0.93	0.78	0.89	0.99
L-Box	0.88	0.71	0.9	0.94
Sieve Segregation (%)	7.5	2.2	8	5.3
Περιεχόμενος αέρας (%)	2.9	1.5	3.3	1.6

Στο **Σχήμα 22**: παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των αντοχών θλίψης των συνθέσεων για 7, 28 και 90 ημερών. Η μεγαλύτερη αντοχή που αναπτύχθηκε σε όλες τις ηλικίες ανήκει στην σύνθεση BPD, ακολουθεί η CKD και η EP ενώ την μικρότερη αντοχή έχει η σύνθεση MP. Οι συνθέσεις συνεχίζουν να αναπτύσσουν αντοχή σε σημαντικό βαθμό και μετά τις 28 ημέρες. Η μεγαλύτερη αύξηση για το διάστημα από 7 έως 28 ημέρες παρουσιάστηκε για τις συνθέσεις CKD, EP και BPD με αύξηση της τάξης των 30,3% , 24,7% και 23,9% αντίστοιχα.



Σχήμα 22: Θλιπτική αντοχή για ηλικία (7, 28 και 90 ημερών) ανά την κάθε σύνθεση

3.2 Μέθοδοι και διαδικασίες πειραματικής μελέτης

3.2.1 Ανοικτό πορώδες

Στη μέθοδο του ανοιχτού πορώδους, (open porosity) OP(%), για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές διαδικασίες δοκίμια ηλικίας 5 μηνών και διαστάσεων $h= 50 \text{ mm}$ και $d= 100\text{mm}$. Αρχικά η κατάστασή τους ήταν σε υγρό θάλαμο κορεσμένα σε νερό. Η διαδικασία είναι σύμφωνα με τα αμερικάνικα πρότυπα ASTM C 642 (1997). Ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός του πειράματος είναι ο εξής:

- Φούρνος ξήρανσης
- Ζυγός ακριβείας
- Δοχείο με νερό και γάντζο για ζύγιση υπό αιώρηση
- Πετσέτα για επιφανειακό στέγνωμα δοκιμίων
- Silica gel



(α)



(β)

Σχήμα 23: Πειραματικός εξοπλισμός προσδιορισμού ανοιχτού πορώδους (α) Ζύγιση υπό αιώρηση
(β) Φούρνος ξήρανσης

Τα δοκίμια αρχικά ζυγίστηκαν στην υπό αιώρηση κατάσταση τους. Πρώτα μέσα στο νερό και εν συνεχεία το δοκίμιο σκουπιζόταν επιφανειακά και μας έδινε την κορεσμένη-επιφανειακά στεγνή κατάσταση σε αέρα. Έπειτα ακολούθησε η ξήρανσή τους στον φούρνο ξήρανσης στους 105 °C μέχρι την σταθεροποίηση του βάρους τους (περίπου 2 εβδομάδες). Εξετάστηκε η σταθεροποίηση του βάρους έπειτα από καθημερινές μετρήσεις ώστε η απόκλιση δύο διαδοχικών μετρήσεων να είναι μικρότερη από 0,1%. Αφού ξηράνθηκαν τα δοκίμια ζυγίστηκαν στον αέρα ξανά όπου λήφθηκε η μάζα ξηρού δοκιμίου. Από τις 3 μάζες συνολικά κάθε δοκιμίου και των τεσσάρων ακόλουθων εξισώσεων υπολογίστηκε το ανοιχτό πορώδες του κάθε δοκιμίου OP %.

Όπου ρ το σύμβολο του ειδικού βάρους νερού θερμοκρασίας (18 °C), όπου ελήφθη ίσο με 1000 kg/m³.

$$\text{Απορρόφηση μετά την εμβάπτιση και επί ξηρό \%} = (B-A)/A \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Πυκνότητα επί ξηρό} = A/(B-D) \times \rho = g1 \quad (2)$$

$$\text{Φαινόμενη πυκνότητα} = A/(A-D) \times \rho = g2 \quad (3)$$

$$\text{Ανοιχτό πορώδες OP \%} = (g2-g1)/g2 \times 100 \quad (4)$$

Όπου,

A : μάζα δοκιμίου (g), «επί ξηρό»

B : μάζα δοκιμίου (g), σε κατάσταση «πλήρες κορεσμένο και επιφανειακά στεγνό»,

D : φαινόμενη μάζα (g) του δοκιμίου υπό άνωση

g1 : πυκνότητα του δοκιμίου επί ξηρό (Mg/m³)

g2 : φαινόμενη πυκνότητα (Mg/m³)

ρ : πυκνότητα νερού (Mg/m³)

3.2.2 Τριχοειδής αναρρόφηση

Για τον υπολογισμό της τριχοειδούς αναρρόφησης μελετήθηκε η σταδιακή απορρόφηση του νερού από τα δοκίμια ,μιας και από αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το πορώδες αλλά και την συνδεσιμότητα των πόρων αλλά και για τον ρυθμό διείσδυσης του νερού από τους τριχοειδείς πόρους. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο έχουν διαστάσεις $h = 50 \text{ mm}$ και διαμέτρου $d = 100 \text{ mm}$ βάσει της οδηγίας RILEM TC 116 [38] και το πρότυπο ASTM C1585 [39].

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός εξοπλισμός που αποτελείται από:

- Ζυγός Ακριβείας
- Ταινία τεφλόν για μόνωση των δοκιμίων
- Χάρακας
- Λεκάνη με νερό
- Μεταλλική Σχάρα για την τοποθέτηση και στερέωση των δοκιμίων
- Κανάτα για συμπλήρωση νερού στην λεκάνη
- Ξηραντήρες
- Silica gel
- Χρονόμετρο
- Πετσέτα για το επιφανειακό στέγνωμα των δοκιμίων



(α)



(β)

Σχήμα 24: Εξοπλισμός πειράματος τριχοειδούς αναρρόφησης (α) ξηραντήρες (β) δεξαμενή με μεταλλική σχάρα

Σε πρώτο στάδιο βγαίνουν τα δοκίμια από τον φούρνο όπου έχουν παραμείνει για περίπου δύο εβδομάδες και τοποθετούνται ανά 6 στους ξηραντήρες. Θα παραμείνουν για 48 ώρες ώστε να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία τους. Ζυγίσεις έγιναν μόλις βγήκαν από τον φούρνο αλλά και μόλις βγήκαν από τους ξηραντήρες. Έπειτα τοποθετήθηκε μονωτική ταινία περιμετρικά από την κάτω πλευρά τους στο άκρο της πλευράς χύτευσης. Εν συνεχεία τοποθετείται η μεταλλική σχάρα μέσα στην λεκάνη και θα γεμίσει με νερό ώστε να καλύπτει περίπου 4 mm των δοκιμίων. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται πως η διείσδυση του νερού θα πραγματοποιηθεί μόνο από την επιφάνεια χύτευσης και θα μονωθεί ως ένα βαθμό οι πλαϊνές πλευρές των δοκιμίων. Η δοκιμή περιλαμβάνει σε συγκεκριμένο χρόνο τοποθέτηση του κάθε δοκιμίου στο νερό

και την εξαγωγή τους για μέτρηση της απορρόφησης νερού ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σύμφωνα με τις οδηγίες λαμβάνεται το δοκίμιο που πρέπει το θα σκουπιστεί επιφανειακά και τοποθετείται στον ζυγό ακριβείας και αμέσως το επανατοποθετείται στο νερό, ακολουθεί η ίδια διαδικασία για όλα τα υπόλοιπα δοκίμια. Η συνολική διάρκεια του πειράματος είναι 3 ώρες και 47 λεπτά και τα δοκίμια έμειναν στην λεκάνη για ακριβώς 24 ώρες από την πρώτη τοποθέτηση του δοκιμίου στο νερό, έπειτα τα δοκίμια σκουπίστηκαν επιφανειακά και ζυγίστηκαν. Το πείραμα συνεχίστηκε με ακριβώς ίδια διαδικασία για τα επόμενα 6 δοκίμια.

Πίνακας 7: Ζυγίσεις δοκιμίων συνθέσεων ΑΣΣ BPD, MP

Δοκίμιο	BPD A	BPD B	BPD C	MP A	MP B	MP C
Ζύγιση Χωρίς Ταινία (g)	858,82	836,33	845,20	791,88	798,28	843,32
Ζύγιση με Ταινία (g)	861,34	837,60	846,44	794,32	800,66	845,76

Πίνακας 8: Ενδεικτικές μετρήσεις πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού τριχοειδούς αναρρόφησης δοκιμίων σύνθεσης ΑΣΣ

	T (h)	W (g)			
A	0:00:00		A	1:21:00	870,37
B	0:00:20		B	1:21:20	846,19
Γ	0:00:40		Γ	1:21:40	854,68
A	0:01:00	862,55	Δ	1:23:00	809,92
B	0:01:20	839,02	E	1:23:20	817,23
Γ	0:01:40	847,75	ΣΤ	1:23:40	861,45
Δ	0:02:00		A	1:40:00	871,22
E	0:02:20		B	1:40:20	846,86
ΣΤ	0:02:40		Γ	1:40:40	855,36
Δ	0:03:00	795,47	Δ	1:42:00	811,75
E	0:03:20	801,94	E	1:42:20	819,18
ΣΤ	0:03:40	846,93	ΣΤ	1:42:40	863,33
A	0:04:00	863,77	A	2:01:00	871,96
B	0:04:20	840,18	B	2:01:20	847,56
Γ	0:04:40	848,99	Γ	2:01:40	856,03
Δ	0:06:00	797,00	Δ	2:03:00	813,58
E	0:06:20	803,55	E	2:03:20	821,12
ΣΤ	0:06:40	848,47	ΣΤ	2:03:40	865,21
A	0:09:00	864,9	A	2:24:00	872,7
B	0:09:20	841,31	B	2:24:20	848,2
Γ	0:09:40	850,02	Γ	2:24:40	856,65
Δ	0:11:00	798,66	Δ	2:26:00	815,4
E	0:11:20	805,45	E	2:26:20	823,08
ΣΤ	0:11:40	850,22	ΣΤ	2:26:40	867,09
A	0:16:00	865,92	A	2:49:00	873,42
B	0:16:20	842,24	B	2:49:20	848,85
Γ	0:16:40	850,93	Γ	2:49:40	857,25
Δ	0:18:00	800,5	Δ	2:51:00	817,22
E	0:18:20	807,33	E	2:51:20	825,01
ΣΤ	0:18:40	852,08	ΣΤ	2:51:40	868,97
A	0:25:00	866,92	A	3:16:00	874,09

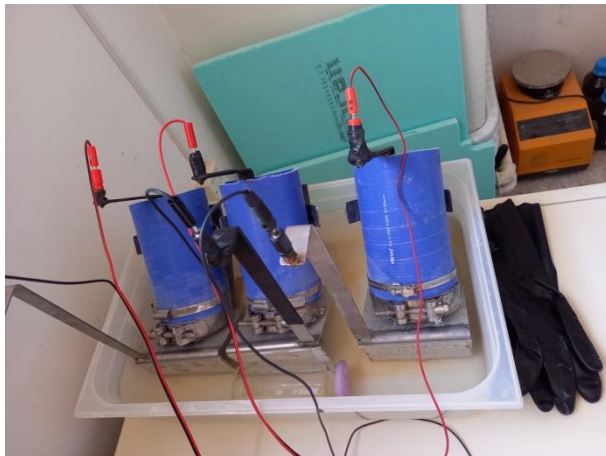
B	0:25:20	843,13	B	3:16:20	849,45
Γ	0:25:40	851,8	Γ	3:16:40	857,85
Δ	0:27:00	802,39	Δ	3:18:00	818,98
E	0:27:20	809,29	E	3:18:20	826,96
ΣΤ	0:27:40	853,94	ΣΤ	3:18:40	870,82
A	0:36:00	867,82	A	3:45:00	874,75
B	0:36:20	843,97	B	3:45:20	850,03
Γ	0:36:40	852,59	Γ	3:45:40	858,46
Δ	0:38:00	804,31	Δ	3:47:00	820,77
E	0:38:20	811,3	E	3:47:20	828,99
ΣΤ	0:38:40	855,81	ΣΤ	3:47:40	872,67
A	0:49:00	868,68			
B	0:49:20	844,71	A	24:00:00 .	885,79
Γ	0:49:40	853,27	B	24:00:00 .	862,40
Δ	0:51:00	806,2	Γ	24:00:00 .	870,00
E	0:51:20	813,27	Δ	24:00:00 .	848,20
ΣΤ	0:51:40	857,71	E	24:00:00 .	857,01
A	1:04:00	869,57	ΣΤ	24:00:00 .	903,90
B	1:04:20	845,51			
Γ	1:04:40	854,02			
Δ	1:06:00	808,07			
E	1:06:20	815,26			
ΣΤ	1:06:40	859,57			

3.2.3 Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων

Σε αυτό το πείραμα εξετάζεται ο ρυθμός διείσδυσης χλωριόντων ο οποίος επηρεάζεται από το πορώδες του υλικού αλλά και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στοιχεία για την εκτέλεση του μας δίνει το πρότυπο DRAFT prEN 12390-18. Τα δοκίμια τοποθετούνται μεταξύ δύο συνθηκών, η μία είναι το αλκαλικό διάλυμα και από την άλλη πλευρά διάλυμα χλωριόντων όπου με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης από δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια έχουμε την σταδιακή διείσδυση χλωριόντων στο εσωτερικό του δοκιμίου.

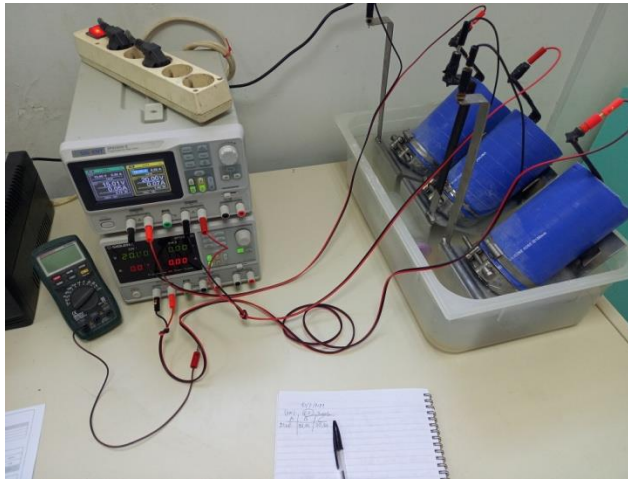
Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε:

- Ζυγός ακριβείας
- Παχύμετρο
- Χάρακας
- Απιονισμένο νερό
- Κανάτα με διαγράμμιση για mL
- Ταινία τεφλόν
- Μεταλλικοί κύλινδροι για περίσφιξη δοκιμίων
- Κατσαβίδι
- Γαλλικό κλειδί
- Κύλινδροι από καουτσούκ
- Δοχείο με διάλυμα αλατόνευρο
- Μεταλλικές βάσεις στηρίγματα
- Θερμόμετρο
- Δοχείο με διάλυμα υδροξειδίου
- Βολτόμετρο- Αμπερόμετρο
- Ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα
- Συσκευή ρύθμισης τάσης
- Διάλυμα AgNO_3
- Θερμοκρασία δωματίου στους 23°C
- ΜΑΠ (γάντια, μάσκα)
- Πετσέτα



(α)

(β)



(γ)

Σχήμα 25: (α), (β), (γ) Εξοπλισμός και διαδικασία πειράματος

Για την διεξαγωγή του πειράματος χρειάστηκε αρχικά να γίνει μία προετοιμασία των δοκιμίων αλλά και των διαλυμάτων που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και ρύθμιση της συσκευής βολτομέτρου - αμπερομέτρου. Πρώτα παρασκευάζεται το διάλυμα ανόδου το οποίο αποτελούνταν από 1200 ml απιονισμένο νερό και 14.4 gr υδροξειδίου του νατρίου (NaOH). Έπειτα παρασκευάσαμε το διάλυμα καθόδου το οποίο αποτελούνταν από 12lt νερό βρύσης και 1333,33 gr μαγειρικό αλάτι (NaCl). Στην συνέχεια προετοιμάζονται τα δοκίμια τα οποία βρίσκονταν για 48 ώρες σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), σκουπίζονται επιφανειακά και αφού μετρήθηκαν με το παχύμετρο σε τρία διαφορετικά σημεία περιμετρικά, μονώνεται η κάτω και πάνω άκρη τους με μονωτική ταινία (Teflon). Επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση του πλαστικού σωλήνα με αντίθετη φορά από την επιφάνεια χύτευσης και η τοποθέτηση των μεταλλικών σφικτήρων ώστε να διασφαλίσουν την μόνωση και να μην αναμειχθούν τα δύο διαλύματα από τυχόν διαρροές. Εντός του σωλήνα τοποθετήθηκε μεταλλική βάση όπου εξυπηρετεί την δημιουργία ανοιχτού κυκλώματος. Έπειτα τοποθετήθηκαν οι σωλήνες με τα δοκίμια σε μεταλλικές βάσεις στήριξης εντός του διαλύματος καθόδου και εισχωρείται το διάλυμα ανόδου προσεκτικά εντός του σωλήνα. Επόμενο βήμα είναι η συνδεσμολογία με τα ηλεκτρόδια στο πάνω μέρος της ανόδου σε ειδικές θήρες που περιλαμβάνονται στην μεταλλική βάση που έχει τοποθετηθεί μέσα στον σωλήνα, αλλά και με ηλεκτρόδια στην μεταλλική βάση στήριξης με τους αντίστοιχους πόλους των δύο τροφοδοτικών.

Τα στοιχεία του πειράματος καταγράφηκαν σε ειδικό έντυπο όπως ο μοναδικός κωδικός της σύνθεσης, η ημερομηνία, η ώρα έναρξης, η θερμοκρασία δωματίου, η διάρκεια του ελέγχου σύμφωνα με το πρότυπο και έπειτα μετρήθηκε η αρχική ένταση του ρεύματος (A), η επιλεγόμενη αρχική τάση (V) και με ειδικό θερμόμετρο η αρχική θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου ($^{\circ}\text{C}$). Μετά από 24 ώρες (ακριβώς) το πείραμα ολοκληρώθηκε για αυτά τα δοκίμια όπου και αποσυνδέθηκαν τα καλώδια από τα τροφοδοτικά, συμπληρώθηκε το έντυπο σχετικά με την ώρα ολοκλήρωσης του πειράματος, την ημερομηνία, την τελική ένταση ρεύματος (A), την τελική τάση (V) αλλά και την τελική θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου ($^{\circ}\text{C}$). Επομένως έγινε αφαίρεση των μεταλλικών σφικτήρων και των πλαστικών σωλήνων αφαιρέθηκε η μονωτική ταινία (Teflon) , σε νιπτήρα περιχύθηκε προσεκτικά το διάλυμα ανόδου και ξεπλύθηκαν τα δοκίμια αλλά και ο εξοπλισμός με άφθονο νερό.

Ακολούθησε η δοκιμή διάρρηξης όπου τα δοκίμια έσκασαν σε θλίψη και καταγράφηκε το φορτίο θραύσης. Σε ειδική επιφάνεια ψεκάστηκε το δοκίμιο 10 φορές με διάλυμα νιτρικού αργύρου (AgNO_3) 0.1 M υπό γωνία περίπου 45° χωρίς να στάξει το διάλυμα. Άρχισε να φαίνεται η διείσδυση των χλωριόντων με τον λευκό χρωματισμό στα δοκίμια μας όπου και καταγράφηκε με το παχύμετρο η κάθε διείσδυση σε επτά σημεία και σε απόσταση ανά 1 cm από το κέντρο του κάθε δοκιμίου.



(α)



(β)

Σχήμα 26: Δοκίμια που ψεκάστηκαν με διάλυμα νιτρικού αργύρου και μέτρηση της εισχώρησης χλωριόντων

3.2.4 Κύκλος Υγρού – Ξηρού

Το πείραμα αυτό αφορά την συνεχόμενη εναλλαγή των δοκιμίων αρχικά με την εμβάπτιση στο νερό μέχρι κορεσμού και την λήψη μέτρησης του βάρους των δοκιμίων και ακολούθως ομοίως με την τοποθέτησή τους σε φούρνο ξήρανσης. Η διαδικασία των μετρήσεων περατώθηκε με την συμπλήρωση συνολικά 16 κύκλων, όπου κάθε κύκλος ορίστηκε ως η βύθιση των δοκιμίων στο νερό (σε λεκάνη με νερό σε θερμοκρασία περίπου 25° C), και έπειτα η ξήρανση τους (σε φούρνο ξήρανσης στους 90° C). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Ζυγός ακριβείας
- Πανί για επιφανειακό στέγνωμα των δοκιμίων
- Θερμόμετρο
- Δύο λεκάνες με νερό για την εμβάπτιση των δοκιμίων
- Θερμοκρασία εργαστηρίου περίπου 25°C
- ΜΑΠ, όπως γάντια προστασίας
- Φούρνος ξήρανσης περίπου 90°C
- Μεταλλικός κάδος για μεταφορά των δοκιμίων



Σχήμα 27: Εξοπλισμός πειράματος κύκλου υγρού-ξηρού

Τα αποτελέσματα προκύπτουν ύστερα από καθημερινές μετρήσεις του βάρους των δοκιμίων και εντοπίζοντας τυχόν διαφοροποιήσεις της μάζας τους από την συνεχή εναλλαγή της κατάστασής τους λόγω διάβρωσης με το πέρασμα του χρόνου.

Μετά το πέρας των 16 κύκλων τα δοκίμια μεταφέρθηκαν σε υγρό θάλαμο για την διατήρησή τους και επαναχρησιμοποίηση σε επόμενα προγραμματισμένα πειράματα.



Σχήμα 28: Φωτογραφία από τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια



Σχήμα 29: Υγρός θάλαμος όπου τοποθετήθηκαν τα δοκίμια μετά το πέρας του πειράματος

4 Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

4.1 Ανθεκτικότητας

4.1.1 Ανοικτό πορώδες

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφηκαν όλες οι μετρήσεις των ζυγίσεων από τα δοκίμια, κατά την αιώρηση μέσα στο νερό όπως και στην κορεσμένη επιφανειακά στεγνή κατάσταση (ΚΕΣ). Τέλος για την ξηρή κατάσταση έμειναν τα δοκίμια για 7 συνεχόμενες ημέρες στον φούρνο και λήφθηκαν διαδοχικές μετρήσεις ώστε να διαπιστωθεί η τελική σταθεροποίηση του βάρους τους.

Πίνακας 9: Βάρος δοκιμίων (g) στις διάφορες καταστάσεις του πειράματος

Ζυγίσεις			
<u>Δοκίμιο</u>	<u>Υπό Αιώρηση (g)</u>	<u>ΚΕΣ (g)</u>	<u>7 days oven (g)</u>
BPD A	542,85	928,54	858,43
BPD B	528,61	908,47	835,93
BPD C	534,07	912,87	844,79
MP A	482,73	854,20	791,49
MP B	487,90	862,39	797,88
MP C	515,99	910,97	842,89
CKD A	487,75	861,67	794,69
CKD B	496,77	878,50	809,58
CKD C	503,44	889,21	819,19
EP A	482,15	855,41	774,79
EP B	482,60	856,16	775,29
EP C	498,11	886,30	800,52

Πίνακας 10: Μέση τιμή ανοικτού πορώδους (%), ανά σύνθεση ΑΣΣ

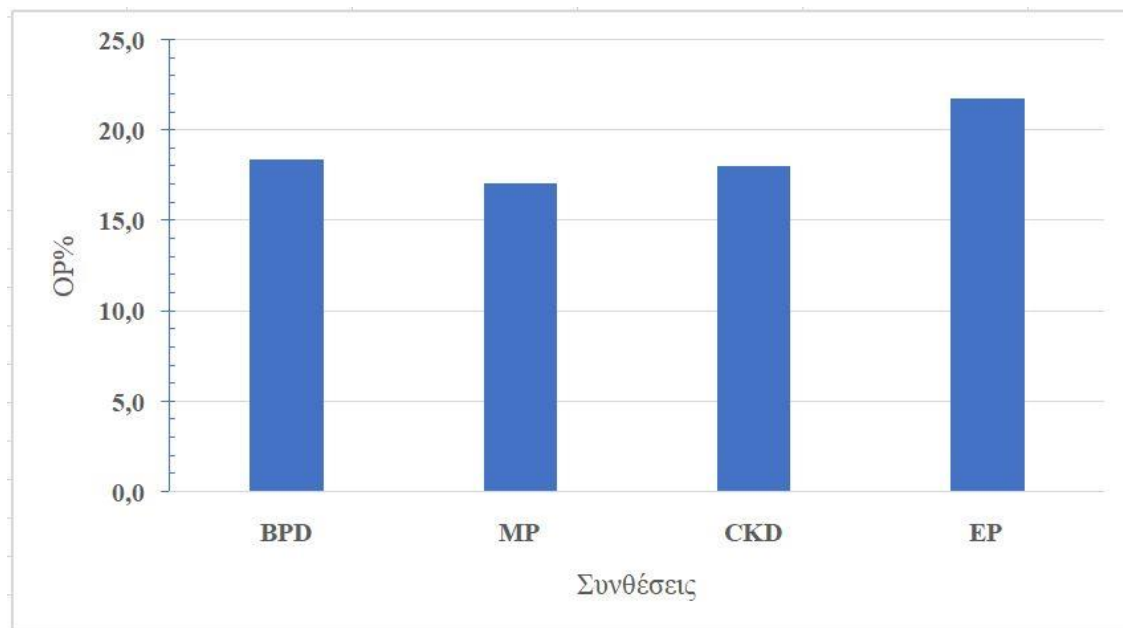
ΣΥΝΘΕΣΗ	OP%	τυπική απόκλιση (σ) (%)
BPD	18,4	0,5
MP	17,1	0,2
CKD	18,0	0,1
EP	21,8	0,2

Υπενθυμίζεται για τις συνθέσεις πως:

- Η σύνθεση EP αποτελεί σύνθεση ΑΣΣ με φίλερ (filler) σφαιρίδια διογκωμένου περλίτη τα οποία αποτελούν άμορφο πυριτικό υλικό)
- Η σύνθεση MP περιέχει λόγο N/T (0.60) και σαν σκοπό έχει την ανάδειξη της θετικής επίδρασης της προσθήκης των λεπτόκοκκων συστατικών στα χαρακτηριστικά του ΑΣΣ παρά το μειωμένο τσιμέντο,
- Η σύνθεση BPD αποτελεί σύνθεση ΑΣΣ με φίλερ (filler) την σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου
- Η σύνθεση CKD αποτελεί σύνθεση ΑΣΣ με φίλερ (filler) την σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων.

Οι συνθέσεις BPD και CKD αποτελούν παραλλαγές της βελτιστοποιημένης σύνθεσης MP όπου υπήρξε αντικατάσταση ίσου όγκου ασβεστοποιημένου φίλερ με εναλλακτικά λεπτόκοκκα υλικά, οι οποίες κατά τα άλλα περιέχουν ίδια συστατικά και αναλογίες.

Σαν πρώτη εικόνα που λαμβάνεται από τα αποτελέσματα είναι πως οι διαφορετικές συνθέσεις επιδρούν στο ανοιχτό πορώδες. Πιο αναλυτικά η σύνθεση EP εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή ανοιχτού πορώδους. Αντίστοιχα την μικρότερη τιμή του ανοιχτού πορώδους την εμφανίζει η σύνθεση MP όπου ο μεγάλος λόγος N/T δείχνει να επηρεάζει θετικά με την προσθήκη λεπτόκοκκων συστατικών στα χαρακτηριστικά του ΑΣΣ. Η σύνθεση BPD και CKD εμφανίζουν παρόμοιες τιμές μεταξύ τους. Εμφανίζεται λοιπόν στις άλλες συνθέσεις με εναλλακτικά πληρωτικά υλικά μεταξύ τους αλλά και με την σύνθεση MP πως επιβαρύνεται το ποσοστό (%) των ανοιχτών πόρων κατά την αντικατάσταση του ασβεστολιθικού φίλερ. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται και πιο αναλυτικά στο παρακάτω διάγραμμα όπου φαίνεται η σύνθεση EP να εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή αλλά και την σύνθεση MP να έχει την μικρότερη τιμή χωρίς να έχει αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις από τις υπόλοιπες συνθέσεις.



Σχήμα 30: Ανοικτό πορώδες (OP %) ανά σύνθεση ΑΣΣ

4.1.2 Τριχοειδής αναρρόφηση

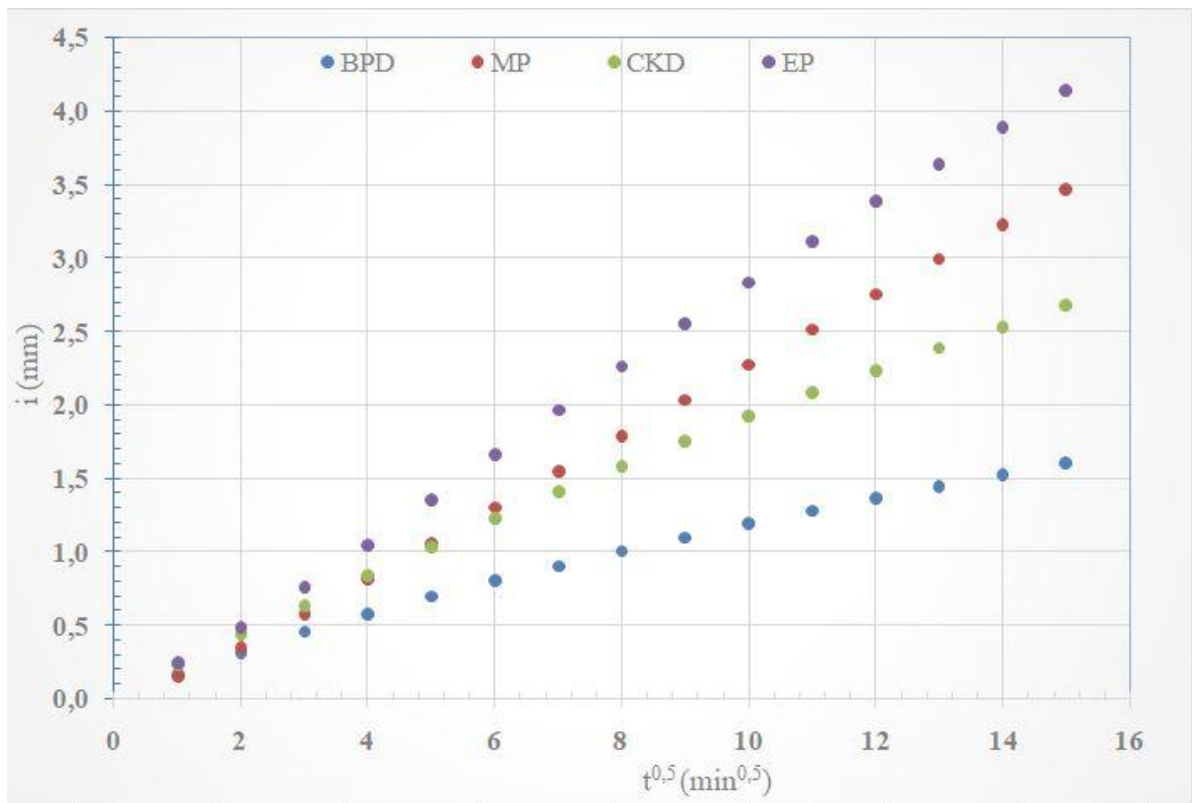
Στον παρακάτω Πίνακα έχουμε την παρουσίαση των μέσων τιμών του ρυθμού απορρόφησης νερού (i , mm) κάθε δοκιμίου για την διάρκεια του χρόνου που προβλέπει η δοκιμή.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζεται η μέση τιμή του ρυθμού απορρόφησης νερού (i , mm) κάθε μίγματος κατά την διάρκεια των χρόνων που προβλέπει η δοκιμή.

Πίνακας 11: Μέση τιμή ρυθμού απορρόφησης νερού, i (mm)

$t^{0.5}$	BPD	MP	CKD	EP
1	0,167	0,153	0,231	0,238
2	0,321	0,352	0,438	0,483
3	0,461	0,577	0,637	0,756
4	0,582	0,814	0,837	1,045
5	0,699	1,056	1,034	1,352
6	0,807	1,303	1,226	1,658
7	0,904	1,547	1,406	1,962
8	1,007	1,790	1,583	2,260
9	1,098	2,032	1,754	2,554
10	1,192	2,273	1,923	2,834
11	1,281	2,513	2,081	3,115
12	1,366	2,753	2,232	3,385
13	1,450	2,992	2,389	3,640
14	1,529	3,228	2,531	3,896
15	1,608	3,469	2,681	4,146

Στο **Σχήμα 31** απεικονίζεται η μέση απορρόφηση νερού κάθε χρονική στιγμή (i , mm) των δοκιμών εξαιτίας της τριχοειδούς αναρρόφησης.



Σχήμα 31: Μέση απορρόφηση νερού κάθε χρονική στιγμή (i , mm) σε σχέση με τον χρόνο ($t^{0.5}$), για όλες τις συνθέσεις ΑΣΣ

Θα γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων λαμβάνοντας υπόψη μας την τιμή του συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης, R^2 για τον οποίο πρέπει $R^2 > 0.99$. Η συγκεκριμένη τιμή μας προσδιορίζεται από ευθύγραμμη σχέση μεταξύ του ρυθμού απορρόφησης νερού και της ρίζας του χρόνου.

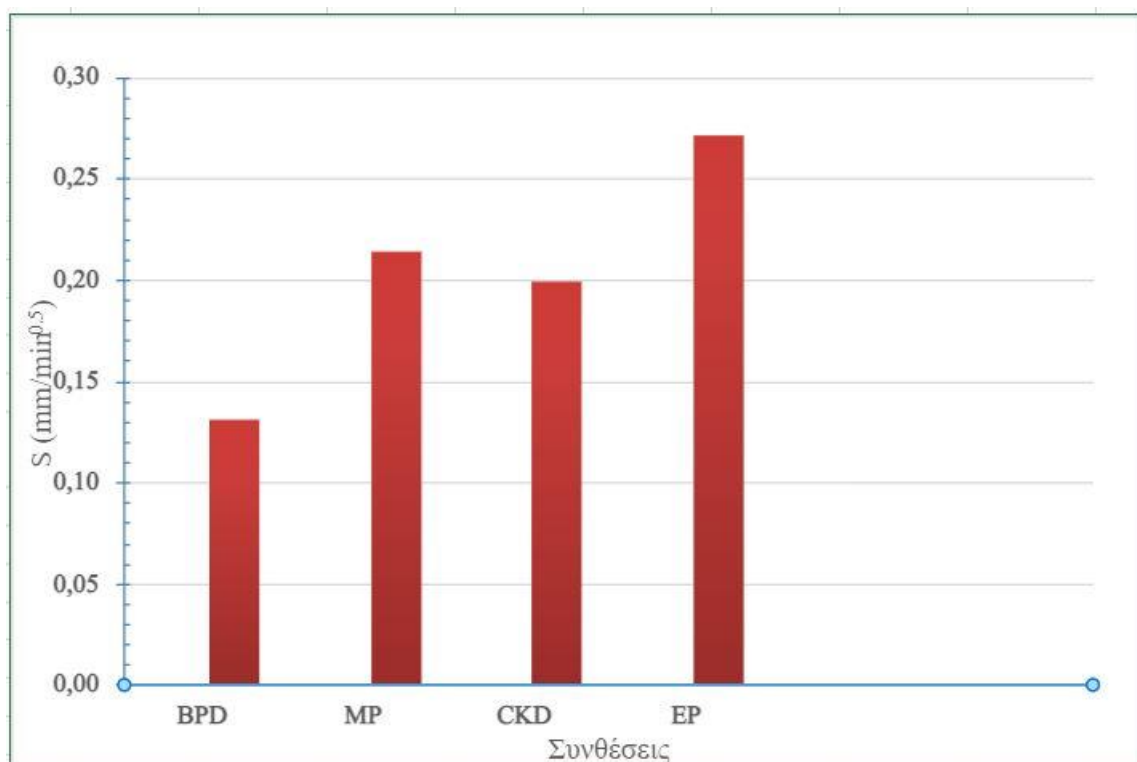
Όπως παρατηρούμε από τις τιμές στο **Σχήμα 31** παρατηρούμε πως η σύνθεση BPD έχει την μικρότερη κλίση επομένως αναμένουμε μικρότερη τιμή συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, παρά το γεγονός πως δεν είναι η σύνθεση με το μικρότερο πορώδες. Την μεγαλύτερη κλίση έχει η σύνθεση EP που μας δηλώνει πως έχει την χειρότερη συμπεριφορά από όλες τις άλλες συνθέσεις.

Στον **Πίνακα 12** έχουμε δεδομένα για τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης (S) που αφορά τις τιμές των δοκιμών 1 A, 2 A, 3 A για κάθε σύνθεση, όπως επίσης και την μέση τιμή, τυπική απόκλιση αλλά και τον συντελεστή διακύμανσης (%). Ιδανικά επιθυμούμε οι τιμές της τυπικής απόκλισης αλλά και του συντελεστή διακύμανσης να είναι μικρές. Η σύνθεση EP εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή γεγονός που δεν μας ξαφνιάζει καθώς γενικά δεν εμφανίζει τις πιο χαμηλές τιμές. Η CKD εμφανίζει την χαμηλότερη τιμή συντελεστή διακύμανσης με τις συνθέσεις MP και BPD να ακολουθούν με μέσες τιμές περίπου διπλάσιες από την σύνθεση CKD.

Πίνακας 12: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση συντελεστή απορρόφησης, S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) νερού

ΣΥΝΘΕΣΗ	(S)			ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μ)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (σ)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (%)
	A	B	C			
BPD	0,133	0,132	0,127	0,130	0,003	2,138
MP	0,208	0,222	0,210	0,213	0,006	3,001
CKD	0,196	0,199	0,203	0,199	0,003	1,475
EP	0,259	0,257	0,298	0,271	0,019	6,918

Με τον **Πίνακα 12** μπορούμε να εξάγουμε τα συμπεράσματα πως οι συνθέσεις CKD και BPD εμφανίζουν καλύτερες τιμές λόγω των εναλλακτικών πληρωτικών υλικών ως μερική αντικατάσταση της μαρμαρόσκονης που επιδρά πολύ θετικά μειώνοντας τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης κατά 50,8% στην σύνθεση CKD σε σχέση με την MP και κατά 43,1% στην σύνθεση BPD σε σχέση με την MP. Η εν λόγω βελτίωση λόγω των υδραυλικών παραπροϊόντων προκύπτει από την υδραυλική (BPD) και ποζολανικής (CKD & BPD) τους δράσης από τα οποία τους συνεισφέρει στην παραγωγή C-S-H και τελικά δημιουργώντας μία πάστα πυκνότερης δομής πορώδους αλλά και μεγαλύτερης αντοχής.



Σχήμα 32: Μέσος συντελεστής τριχοειδούς αναρρόφησης για τις συνθέσεις ΑΣΣ

Σχετικά με τον ρυθμό απορρόφησης νερού αποτελεί μία σημαντική ένδειξη για την ανθεκτικότητα της κάθε σύνθεσης. Πρέπει να σημειωθεί πως η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας δεν είναι μεγάλης ευαισθησίας και τα δοκίμια δεν βρίσκονται στην φυσική τους κατάσταση αλλά είναι ξηρά αρχικά. Επομένως λαμβάνουμε μία σχετική ένδειξη ανθεκτικότητας και όχι μέτρο κατηγοριοποίησης των δοκιμίων και των συνθέσεων. Μία κατασκευή στην φύση θα απορροφήσει νερό και με τους δύο τρόπους δηλαδή την απορρόφηση αλλά και την τριχοειδή αναρρόφηση, ανάλογα πάντα με την έκθεση της κατασκευής στο νερό.

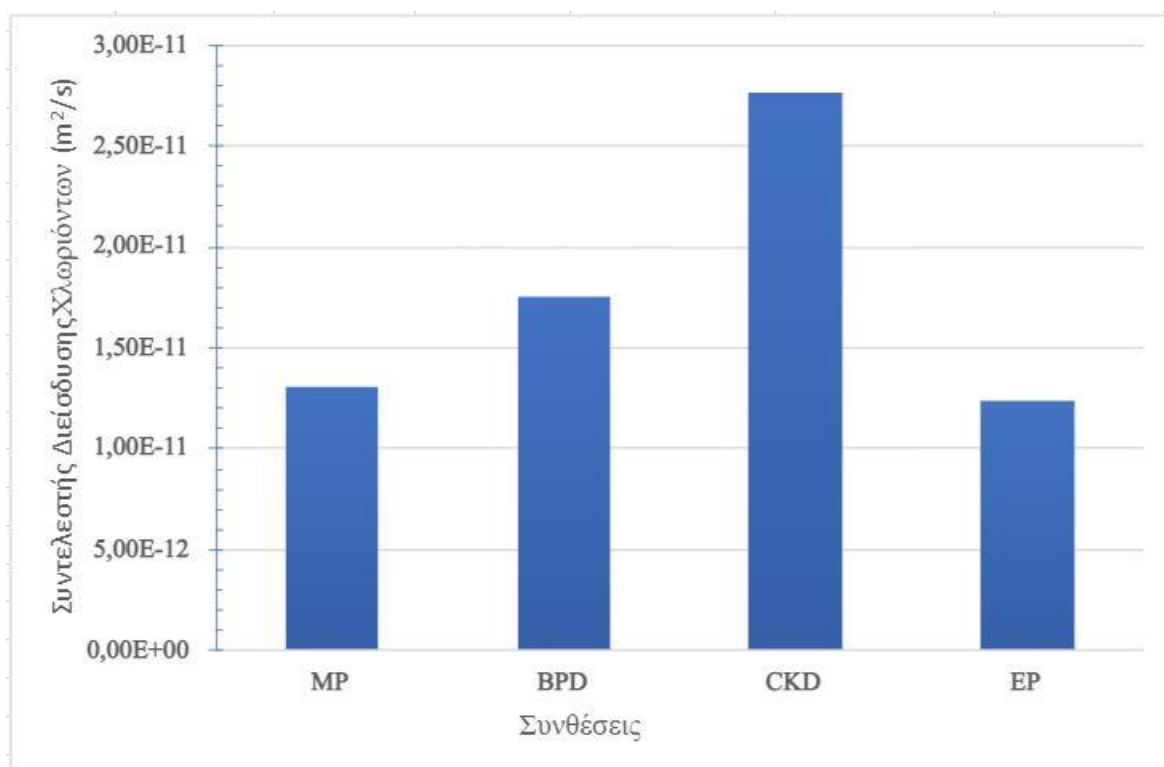
4.1.3 Διείσδυση CI

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το συγκεκριμένο πείραμα είναι συγκεντρωμένα στον παρακάτω **Πίνακα 13**, όπου δίνονται οι τιμές για τον συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων ανά δοκίμιο, την μέση τιμή τους, την τυπική απόκλιση αλλά και τον συντελεστή διακύμανσης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι σύμφωνα με το πρότυπο [NordTest Build 492 (1999)]. Ο συντελεστής διακύμανσης υποδηλώνει πως τα δοκίμια για τις συνθέσεις BPD και MP είχαν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους.

Από το **Σχήμα 33**, όπου δείχνει την μέση τιμή του συντελεστή διείσδυσης, μπορούν να εξαχθούν τα συμπεράσματα πως οι συνθέσεις EP και MP έχουν καλύτερη αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων. Αντίστοιχα καθώς έχει προστεθεί στις συνθέσεις BPD και CKD αναμένουμε να υπάρχει μια αύξηση στα περιεχόμενα CI- για τις δύο αυτές συνθέσεις και αυτό οφείλεται στην χημική τους σύσταση κάτι που μας το δηλώνει ο **Πίνακας 13**. Στην σύνθεση MP σε σχέση με την BPD και CKD παρατηρούμε πως η βελτιωμένη σύνθεση μας έχει καλύτερη αντίσταση στην διείσδυση. Όσον αφορά τις συνθέσεις BPD και CKD παρατηρούμε μία αύξηση στα περιεχόμενα CI- όπως αναφέραμε προηγουμένως είναι λογική αυτή η αύξηση στις τιμές τους. Το BPD εμφανίζει μία βελτιωμένη εικόνα έναντι του CKD και αυτό οφείλεται στην ενεργότητα του BPD που δημιουργεί μία πάστα πυκνότερης δομής επομένως και καλύτερη αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων κατά 57,87% έναντι της CKD σύνθεσης και χειρότερη αντίσταση με ποσοστό 33,71% έναντι της βελτιστοποιημένης σύνθεσης MP. Όσον αφορά τις συνθέσεις MP και EP τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε είναι πολύ ικανοποιητικά, πράγμα που εν μέρη οφείλεται στην πλήρωση κενών λόγω του filler effect, καθώς και στην απουσία περιεχόμενων χλωριόντων στη σύσταση του περλίτη που όπως μας δείχνουν και τα αποτελέσματα συντέλεσαν στην σημαντική μείωση του βάθους διείσδυσης χλωριόντων σε ποσοστό θετικότερο κατά 5,52% για την σύνθεση EP.

Πίνακας 13: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων ανά δοκίμιο ($D_{nssm} \times 10^{-12}$ (m²/s), μέση τιμή (μ), τυπική απόκλιση (σ) και συντελεστής διακύμανσης (σ/μ) %)

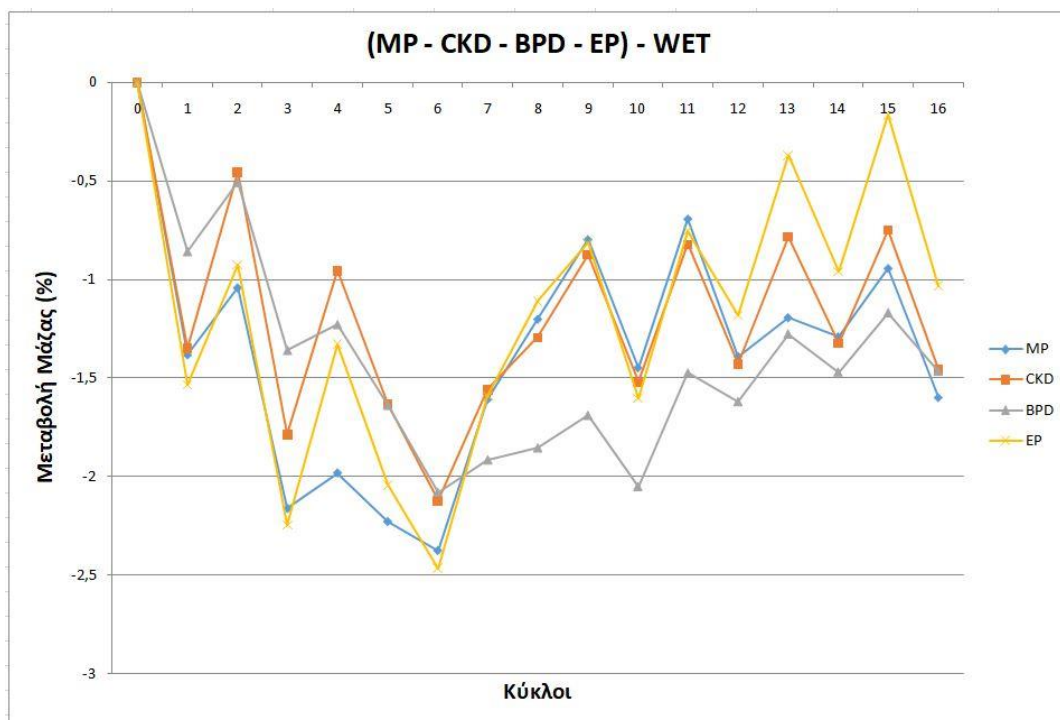
ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	Συντελεστής Διείσδυσης Χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12}$ (m ² /s)			$\mu \times 10^{-12}$ (m ² /s)	$\sigma \times 10^{-12}$ (m ² /s)	(σ/μ) %
MP	15,92	12,59	10,64	13,05	2,18	16,70
BPD	17,09	13,93	21,32	17,45	3,03	17,35
CKD	25,97	28,68	28,00	27,55	1,15	4,18
EP	11,70	12,08	13,21	12,33	0,64	5,20



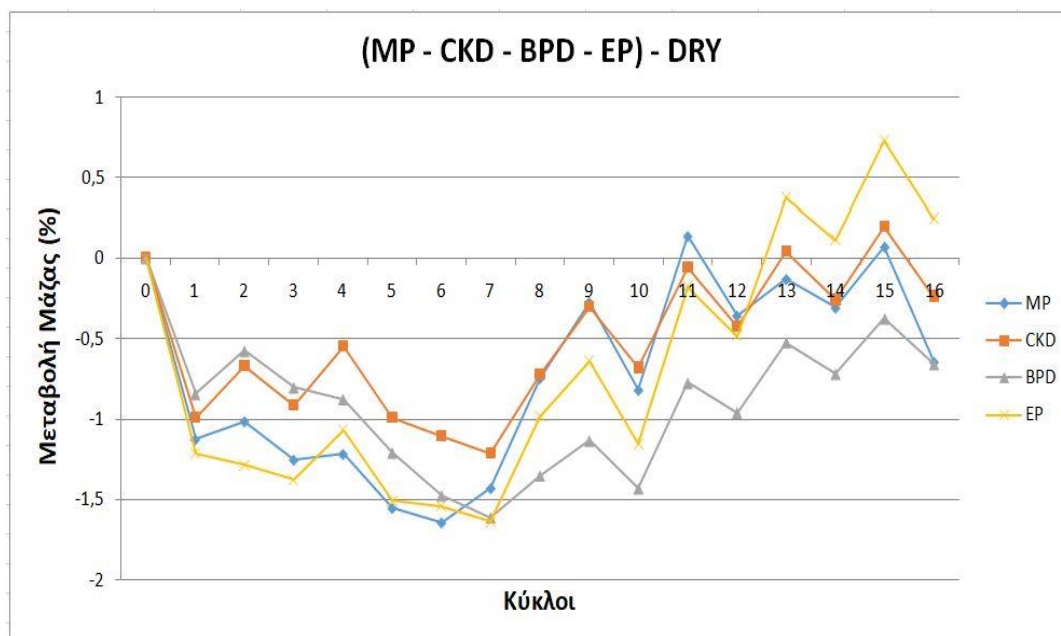
Σχήμα 33: Μέση τιμή συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων D_{snm}

4.1.4 Κύκλος Υγρού-Ξηρού

Στην δοκιμή του κύκλου υγρού – ξηρού χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σκυροδέματος και συγκεκριμένα τρία (3) από κάθε σύνθεση που είχε φτιαχτεί. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 34** η μάζα του δείγματος κάθε σύνθεσης εμφανίζει μεταβολές (αυξήσεις – μειώσεις) σχετικά με την αρχική τους μάζα κατά την διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 34: Ποσοστιαία μεταβολή της μάζας κάθε δοκίμιου σκυροδέματος (wet κατάσταση) διάρκειας 16 κύκλων, στην δοκιμή υγρού - ξηρού.



Σχήμα 35: Ποσοστιαία μεταβολή της μάζας κάθε δοκίμιου σκυροδέματος (dry κατάσταση) διάρκειας 16 κύκλων, στην δοκιμή υγρού - ξηρού.

Με πιο λεπτομερή οπτικό έλεγχο στις τιμές της δοκιμής παρουσιάζεται πως τα δοκίμιά μας παρουσίαζαν απώλειες μάζας για τους αρχικούς κύκλους που όμως χαρακτηριστικά σε όλα τα διαγράμματα θα δούμε πως μετά τον έκτο κύκλο ανακτήθηκαν σε μεγάλο ποσοστό. Παρατηρήθηκε κατά την διάρκεια της δοκιμής πως η σύνθεση EP με διογκωμένο περλίτη είχε τις μεγαλύτερες διαφορές μάζας όσων αφορά την υγρή και ξηρή κατάστασή του εμφανίζοντας τις μεγαλύτερες απώλειες ανάμεσα στις δύο καταστάσεις. Η πρότυπη σύνθεσή μας MP είχε τις μικρότερες διαφορές ανάμεσα στις δύο φάσεις που αποδίδεται στην πρότυπη σύνθεσή της, ενώ οι συνθέσεις CKD (η σκόνη αποκονίωσης της περιστροφικής καμίνου) και BPD (η σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου) εμφάνισαν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τις δύο καταστάσεις τους. Εξετάζοντας το **Σχήμα 34** και το **Σχήμα 35** αν λάβουμε υπόψη μας την κάθε κατάσταση ξεχωριστά θα διαπιστώσουμε πως η πιο σταθερή ως προς το ποσοστό μεταβολής της μάζας με σταθερές διακυμάνσεις αλλά και επαναφορά της μάζας της σχεδόν και στα αρχικά της επίπεδα με ακόμα και μηδενική απώλεια στο ποσοστό μάζας εμφανίζει η σύνθεση EP. Η σύνθεση που είχε σταθερή μεταβολή της μάζας της ως προς την ομοιογένεια των δοκιμίων της είναι η σύνθεση CKD όπου τα 3 δοκίμια έχουν σχεδόν πανομοιότυπα διαγράμματα και σχεδόν συμπίπτουν το ένα με το άλλο. Ανομοιογένεια εμφανίζουν τα διαγράμματα των δοκιμίων για την σύνθεση MP με μαρμαρόσκονη και ακολουθεί η σύνθεση BPD.

Όσον αφορά τα δοκίμια στην στεγνή τους κατάσταση και πάλι η σύνθεση EP εμφανίζει την μεγαλύτερη και πιο άμεση ανάκαμψη στο ποσοστό μάζας του ακόμα και με θετικές τιμές από τον κύκλο 11 και μετά. Παρομοίως και στα υπόλοιπα δείγματα παρατηρείται από τον κύκλο 11 να έχουν ανακτήσει το χαμένο ποσοστό μάζας και να είναι σε θετικές τιμές σχετικά με την αρχική τους μάζα. Η σύνθεση MP όπως αναφέραμε προηγουμένως ανακτά από τον κύκλο 6 και μετά το ποσοστό απώλειας μάζας του και στον 11 κύκλο έχει θετικές τιμές μάζας.

Οι συνθέσεις CKD και BPD όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε έχουν τις πιο ομαλές – μικρές μεταβολές από τις συνθέσεις MP και EP όπου παρουσιάζουν κάποιες απότομες αυξομειώσεις, οι οποίες ενδεχομένως να οφείλονται στην χρήση εναλλακτικών πληρωτικών υλικών ως μερική αντικατάσταση της μαρμαρόσκονης το οποίο επιδρά αρκετά θετικά στις μεταβολές της μάζας των δύο συνθέσεων. Η εν λόγω βελτίωση λόγω των υδραυλικών παραπροϊόντων προκύπτει από την υδραυλική (BPD) και ποζολανικής (CKD & BPD) τους δράσης από τα οποία τους συνεισφέρει ώστε να γίνει παραγωγή από ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (C-S-H, calcium silicate hydrates) και τελικά δημιουργώντας μία πάστα πυκνότερης δομής πορώδους αλλά και μεγαλύτερης αντοχής το οποίο και εμφανίζεται ως η ομοιομορφία των διαγραμμάτων με την σύνθεση BPD να εμφανίζει την μεγαλύτερη αντίσταση στις μεταβολές λόγω της ποζολανικής του δράσης αλλά και του filler effect έναντι της CKD που έχει μόνο filler effect.

5 Συμπεράσματα

Με τα πειράματα που επιτελέσαμε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα για την ανθεκτικότητα αλλά και την αντίσταση σε διάβρωση του ΑΣΣ με εναλλακτικά λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά που χρησιμοποιήσαμε σε κάθε σύνθεση. Πιο συγκεκριμένα:

- Από όλες τις συνθέσεις η πρότυπη σύνθεση με μαρμαρόσκονη (MP) εμφανίζει γενικά βελτιωμένη ανθεκτικότητα με την μείωση w/c και δίνουν αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε κάθε τύπο δοκιμής. Δίνοντας μία σταθερά καλή σύνθεση για κάθε τύπο δοκιμής.
- Σε σχέση με τις συνθέσεις με εναλλακτικά πληρωτικά υλικά :
 - Η σύνθεση CKD (η σκόνη αποκονίωσης της περιστροφικής καμίνου) είχε μεγαλύτερο πορώδες από την σύνθεση BPD και μεγαλύτερο συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων απ' όλες τις συνθέσεις και επομένως αρνητικές συνέπειες και στην ενανθράκωση του σκυροδέματος, όμως εμφάνισε μικρές μεταβολές μάζας στην δοκιμή κύκλων υγρού – ξηρού με την πιο σταθερή μεταβολή απ' όλες τις συνθέσεις και ομοιογένεια.
 - Η σύνθεση EP με διογκωμένο περλίτη εμφάνισε την μεγαλύτερη τιμή ανοιχτού πορώδους με αρνητικές συνέπειες για την απόδοση του σκυροδέματος, όμως στην δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων παρείχε την καλύτερη συμπεριφορά με τον μικρότερο συντελεστή με μικρή διαφορά από την πρότυπη μας σύνθεση MP και μεγάλες σχετικά με τις υπόλοιπες συνθέσεις μας CKD και BPD.
 - Η σύνθεση BPD σε όλα τα πειράματα εμφάνισε πολύ αξιόλογες επιδόσεις , εμφανίζοντας τον μικρότερο μέσο συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης και στην διείσδυση χλωριόντων. Από τις δύο συνθέσεις με βιομηχανικά παραπροϊόντα είχε την καλύτερη γενικά συμπεριφορά. Επίσης στον κύκλο υγρού ξηρού είχε από τις μικρότερες μεταβολές μετά την πρότυπη μας σύνθεση MP.
- Από τους κύριους μηχανισμούς διάβρωσης είναι η ενανθράκωση και η διείσδυση χλωριόντων επομένως αναμένεται από τις συνθέσεις EP και MP να έχουν βελτιωμένη συμπεριφορά, όσων αφορά την διάβρωση με τους παραπάνω τρόπους λόγω των υψηλών αποδόσεων τους στην δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων.

Βιβλιογραφία

1. Τεχνική Οδηγία 5 - Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (2005)
2. Δ. Πετράκης (2021), Ρεολογικές Ιδιότητες, Μηχανικά Χαρακτηριστικά και Θερμική Αντίσταση Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος με Εναλλακτικά Πληρωτικά Υλικά, Διπλωματική Εργασία σχολής Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
3. H. Okamura, M. Ouchi, Self-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.1, April 2003, 1 (2003) 5–15.
4. ACI Committee 237, Self-consolidating Concrete, *ACI Comm. 237 R-02 Self Compacting Concrete* (2007) 5–20.
5. Ν. Ρέτσα (2021), Συγκριτική Αξιολόγηση Πληρωτικών Υλικών Κατά την Εφαρμογή τους σε Αυτοσυμπυκνούμενα Κονιάματα, Διπλωματική Εργασία σχολής Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
6. N. Gromicko, K. Shepard, The history of concrete, *International Association of Certified Home Inspectors*, natchi.org
7. C. Goodier, Development of self-compacting concrete, *Structure & Buildings* 156 IssueSB4, November 2003
8. Ν.Σ. Αναγνωστόπουλος (2009), Μηχανικά Χαρακτηριστικά και Ανθεκτικότητα Αυτοσυμπυκνούμενων Σκυροδεμάτων (ΑΣΣ) Παρασκευασμένα με Ελληνικά Υλικά, Διδακτορική Διατριβή σχολής Πολιτικών Μηχανικών Πολυτεχνικής Σχολής Ξάνθης στο Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
9. P. Bamforth, Enhancing reinforced concrete durability: Guidance on selecting measures for minimising the risk of corrosion of reinforcement in concrete. *Concrete Society Technical Report No. 61*, Camberley, United Kingdom, 2004.
10. Japan Society of Civil Engineers, Standard specifications for concrete structures: design, *JSCE Guidelines for Concrete No. 15*, 2007.
11. Ε. Γ. Μπαδογιάννης (2020), Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνικά Υλικά Ι», σχολή Πολιτικών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
12. Sri Ravindrarajah R. Usage of cement kiln dust in concrete. *Int J Cem Compos Lightweight Concr* 1982;4(2):95–102.
13. Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.103>
14. Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03165>
15. M. Maslehuddin et al, Properties of cement kiln dust concrete,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.002>
16. Ramezani pour, A.A., Karein, S.M.M., Vosoughi, P., Pilvar, A., Isapour, S., Moodi, F., 2014. Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete. *Constr. Build. Mater.* 66, 222e228.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.086>.
17. Da Silva, P.R., De Brito, J., 2015. Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *Constr. Build. Mater.* 86, 101e112.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.110>.
18. Bektas, F., Turanli, L., Monteiro, P.J.M., 2005. Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.* 35, 2014e2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.029>.
 19. Türkmen, I., Kantarcı, A., 2007. Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Build. Environ.* 42, 2378e2383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.002>.
 20. Heirman, G., Vandewalle, L., Boel, V., Audenaert, K., De Schutter, G., D'Hemricourt, J., Desmet, B., Vantomme, J., 2006. Chloride penetration and carbonation in self-compacting concrete. In: Kovler, K., Sato, R. (Eds.), *ConcreteLife'06-International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning*.
 21. Effect of waste marble dust concrete as filler on properties of self-compacting concrete
 22. Bonavetti V, Donza H, Mene'ndez G, Cabrera O, Irassar EF. Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy. *Cem Concr Res* 2003;33(6):865–71.
 23. Tasdemir C. Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cem Concr Res* 2003;33(10):1637–42.
 24. K. Wu, H. Shi, L. Xu, G. Ye, G. De Schutter, Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties, *Constr. Build. Mater.* 79 (2016) 243–256.
 25. Rakesh Choudhary et al, Permeation, corrosion, and drying shrinkage assessment of self-compacting high strength concrete comprising waste marble slurry and fly ash, with silica fume, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.008>
 26. Smrati J ,Bulu P, Fresh, mechanical, and corrosion performance of self-compacting concrete in the presence of chloride ions, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118517>
 27. RILEM TC 116: “Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability”
 28. ASTM C1585: “Measurement Of Rate Of Absorption Of Water By Hydraulic-Cement Concretes”
 29. DRAFT prEN 12390-18: “ Determination of the chloride migration coefficient”
 30. Yang, Y., M.D. Lepech, E.-H. Yang, and V.C. Li, *Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles*. *Cement and Concrete Research*, 2009. **39**(5): p. 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.013>
 31. Hong, G., C. Song, and S. Choi, *Autogenous Healing of Early-Age Cracks in Cementitious Materials by Superabsorbent Polymers*. *Materials*, 2020. **13**(3). <https://doi.org/10.3390/ma13030690>
 32. Liu, H., H. Huang, X. Wu, H. Peng, Z. Li, J. Hu, and Q. Yu, *Effects of external multi-ions and wet-dry cycles in a marine environment on autogenous self-healing of cracks in cement paste*. *Cement and Concrete Research*, 2019. **120**: p. 198-206. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.014>
 33. <http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/history/>
 34. Ioannis P. Sfikas, *Αυτοσυμπκνούμενο Σκυρόδεμα: Ιστορική Αναδρομή, Στατιστικά Παραγωγής & Σύγχρονες Ερευνητικές Τάσεις - Self-Compacting Concrete: Historical Review, Production Statistics & Current Research Trends*, https://www.researchgate.net/publication/324363855_Autosympyknooumeno_Skyrodema_Istoriike_Anadrome_Statistika_Paragoges_Synchrones_Ereunetikes_Taseis_-_Self-Compacting_Concrete_Historical_Review_Production_Statistics_Current_Research_Trends
 35. Ανδρέας Καλεντζώτης, *Αυτοσυμπκνούμενο Σκυρόδεμα*, <http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/ergasies%202007/.pdf>
 36. Mary Bufe, WEF Highlights, *Ancient Nabataeans Used Sophisticated Water Technologies To Create a Thriving Desert City*, <https://news.wef.org/ancient-nabataeans-used-sophisticated-water-technologies-to-create-a-thriving-dessert-city/>

37. Gillender Building: 1900,<https://www.shorpy.com/node/13079>
38. Ammar Elhassan, The effects of Visual Stability Index (VSI) on fresh segregation of self consolidating concrete (SCC) using fly ash class C and F,
[https://www.semanticscholar.org/paper/The-effects-of-Visual-Stability-Index-\(VSI\)-on-of-C-Elhassan/7f04903e704db73d0563937bbd03b1707aeb39b7](https://www.semanticscholar.org/paper/The-effects-of-Visual-Stability-Index-(VSI)-on-of-C-Elhassan/7f04903e704db73d0563937bbd03b1707aeb39b7)
39. NBM&CW January 2019, Recent Advances in - Self-Compacting Concrete,
<https://www.nbmcw.com/product-technology/construction-chemicals-waterproofing/concrete-admixtures/recent-advances-in-self-compacting-concrete.html>
40. <https://www.google.com/search?q=slump+flow>
41. https://www.researchgate.net/figure/Apparatus-of-V-funnel-and-L-box_fig1_341127200
42. U Box test on Fresh Concrete | Apparatus, Procedure & Result, <https://dreamcivil.com/u-box-test-on-fresh-concrete/>
43. Hong Jae Yim, Young Hwan Bae, Jae Hong Kim, Method for evaluating segregation in self-consolidating concrete using electrical resistivity measurements,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819327357>
44. <https://www.atlanticsupply.com/product/j-ring-test-set-for-self-consolidating-concrete-scc/>
45. National Ready Mixed Concrete Association, Supplementary Cementitious Materials — What, why, & how?, <https://www.nevadareadymix.com/concrete-tips/supplementary-cementitious-materials/>
46. Meudon, Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Meudon>
47. Nico Saieh, Sodra Lanken / Rotstein Arkitekter, https://www.archdaily.com/24252/sodra-lanken-rotstein-arkitekter/2082431484_r2a-re-sodra-lanken-10-01

Παράρτημα Α. Τίτλος 1ου παραρτήματος

Ανοικτό πορώδες

Δοκίμιο	Υπό Αιώρηση (g)	ΚΕΣ (g)	7 days oven (g)
BPD A	542,85	928,54	858,43
BPD B	528,61	908,47	835,93
BPD C	534,07	912,87	844,79
MP A	482,73	854,20	791,49
MP B	487,90	862,39	797,88
MP C	515,99	910,97	842,89
CKD A	487,75	861,67	794,69
CKD B	496,77	878,50	809,58
CKD C	503,44	889,21	819,19
EP A	482,15	855,41	774,79
EP B	482,60	856,16	775,29
EP C	498,11	886,30	800,52

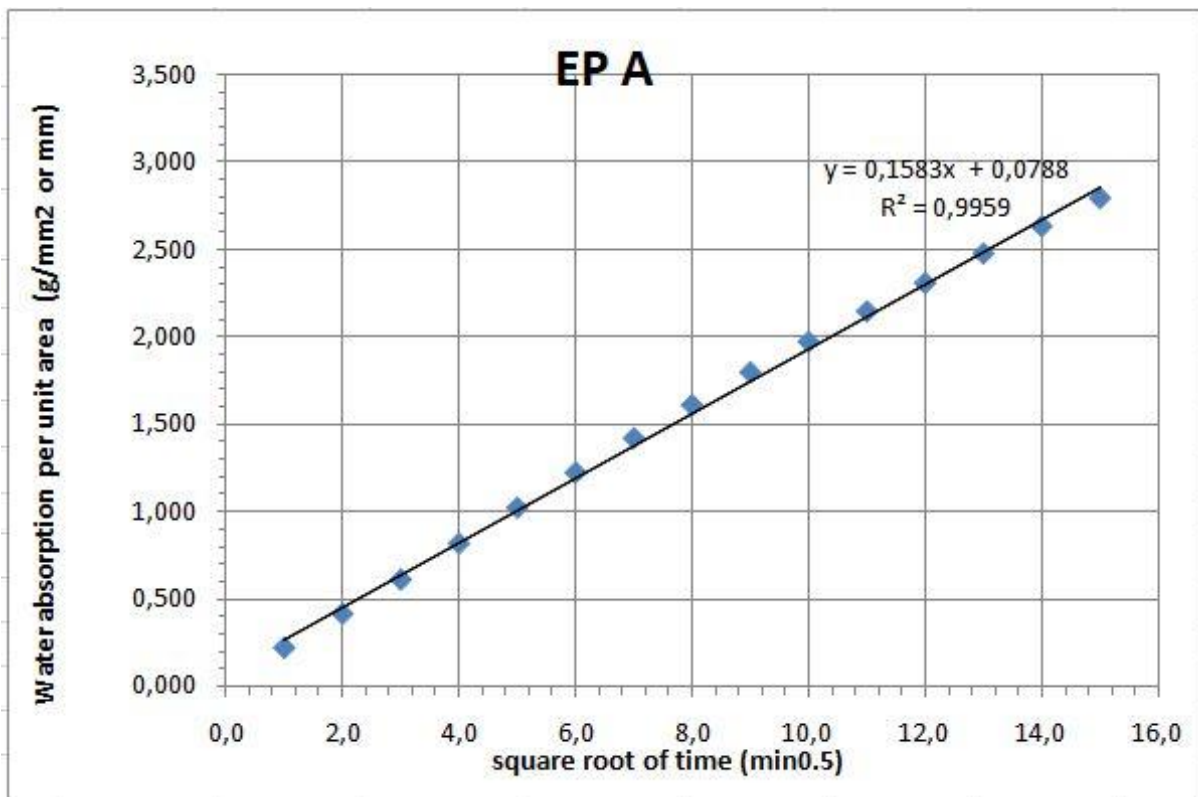




Τριχοειδής αναρρόφηση

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Σύνθεση :		EP					
Ημερομηνία :		12/Jul/22					
W _o (g) :		776,46					
A/A	T(h)	T(min)	t ^{0.5}	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min ^{0.5})
1	0:01:00	1	1	778,30	1,84	0,23439	0,2344
2	0:04:00	4	2	780,05	3,59	0,45732	0,2287
3	0:09:00	9	3	782,03	5,57	0,70955	0,2365
4	0:16:00	16	4	784,17	7,71	0,98217	0,2455
5	0:25:00	25	5	786,42	9,96	1,26879	0,2538
6	0:36:00	36	6	788,71	12,25	1,56051	0,2601
7	0:49:00	49	7	791,01	14,55	1,8535	0,2648
8	1:04:00	64	8	793,30	16,84	2,14522	0,2682
9	1:21:00	81	9	795,58	19,12	2,43567	0,2706
10	1:40:00	100	10	797,77	21,31	2,71465	0,2715
11	2:01:00	121	11	799,97	23,51	2,9949	0,2723
12	2:24:00	144	12	802,08	25,62	3,26369	0,2720
13	2:49:00	169	13	804,17	27,71	3,52994	0,2715
14	3:16:00	196	14	806,21	29,75	3,78981	0,2707
15	3:45:00	225	15	808,26	31,80	4,05096	0,2701
16	4:16:00	256	16		-776,46	-98,9121	-6,1820

Regression analysis	
R square :	0,9996
S (mm/min ^{0.5}) :	0,2786
S (mm/min ^{0.5}) _{avg} :	0,2594





Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων

ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	EP A
ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Ca(OH) ₂
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	19/7/2022
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	
ΗΛΙΚΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ημέρες)	
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (ώρες)	24

ΚΩΔΙΚΟΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	TAX.EP .Ca(OH) ₂ .
ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ/ΕΣ	ΜΑΝΩΛΑΡΑΚΗΣ ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ Ε

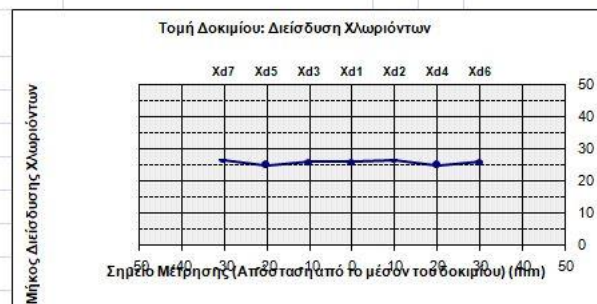
ΔΙΑΛΥΜΑ ΚΑΘΟΔΟΥ	
ΝΕΡΟ ΔΙΚΤΥΟΥ (g)	12000,00
ΧΛΩΡΙΟΥΧΟ ΝΑΤΡΙΟ NaCl (g)	1333,33
ΠΟΣΟΣΤΟ NaCl ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ (%)	10,00%

ΔΙΑΛΥΜΑ ΑΝΟΔΟΥ	
ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ (g)	360,00
ΥΔΡΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ NaOH (g)	4,3
ΠΟΣΟΣΤΟ NaOH ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ (%)	1,20%

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30,00
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0,049
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	19/7/2022
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	11:40
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30,00
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0,049
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	23,1

ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	20/7/2022
ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	11:50
ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30,00
ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0,056
ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	22,7

ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ			
ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	100,00		
ΠΛΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗΣ (mm)	48,04	48,37	48,37
ΜΕΣΟ ΠΛΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	48,26		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (kN)	27,66		
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ (MPa)			
Xd1 (mm)	26,00	27,00	26,50
Xd2 (mm)	25,00	25,00	25,00
Xd3 (mm)	26,00	26,00	26,00
Xd4 (mm)	26,00	26,00	26,00
Xd5 (mm)	26,00	27,00	26,50
Xd6 (mm)	25,00	25,00	25,00
Xd7 (mm)	26,00	26,00	26,00



ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ (h)	24,17
ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	22,90
ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (mm)	25,86
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (m ² /s)	11,70E-12

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:



