



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ



ΓΚΑΜΑΡΑΖΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, ΜΑΡΤΙΟΣ 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τομέα Δομοστατικών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Ολοκληρώνοντάς την, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία και τη συνολική καθοδήγησή της από την αρχή έως το πέρας αυτής.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Μαρία Στρατουρά με την οποία συνεργάστηκα άψογα, τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών όσο και κατά τη συγγραφή του κειμένου. Η συνεισφορά της ήταν καθοριστική για την εργασία αυτή, λόγω της παρουσίας και βοήθειας στο χώρο του Εργαστηρίου.

Επιπλέον, καθοριστική ήταν και η συμβολή του προσωπικού και των επιστημονικών συνεργατών του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος της σχολής Πολιτικών Μηχανών ΕΜΠ. Για την προθυμία και την υπομονή που έδειχναν κάθε φορά που χρειάστηκα τη βοήθειά τους, ευχαριστώ ιδιαίτερως τον κ. Παναγιώτη Κορνέζο και τον κ. Δημήτρη Χατζηρούμπη.

Ευχαριστίες ακόμα στον Αναπληρωτή κύριο Νικόλαο Λαγαρό και στον Λέκτορα κύριο Εμμανουήλ Βουγιούκα, για τη συμμετοχή τους στην εκπαιδευτική διαδικασία της εξέτασης.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου και την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	3
1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	5
1.1. Εισαγωγή.....	5
1.2. Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	6
1.3. Το νερό ως παράγοντας φθοράς.....	7
1.4. Συνδεδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα.....	10
1.5. Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	12
1.6. Διείσδυση χλωριόντων.....	13
1.6.1. Σπουδαιότητα χλωριόντων.....	13
1.6.2. Πηγές και ενώσεις χλωριόντων.....	15
1.7. Ενανθράκωση Σκυροδέματος.....	17
1.8. Διάβρωση Οπλισμού.....	19
1.9. Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων.....	25
1.9.1. Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity).....	25
1.9.2. Υδατοπερατότητα (Water permeability).....	26
1.9.3. Μηχανισμός διείσδυσης (permeation).....	29
1.9.4. Μηχανισμός διάχυσης (diffusion).....	30
1.10. Τρόποι Προστασίας Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	31
2. ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	33
2.1. Εισαγωγή.....	33
2.2. Ιπτάμενη Τέφρα.....	35
2.3. Πυριτική Παιπάλη.....	36
2.4. Σκωρία Υψικαμίνου.....	38
2.5. Μετακαολίνης.....	40
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	43

3.1.	Εισαγωγή	43
3.2.	Τρέχουσα Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	43
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	49
4.1.	Εισαγωγή	49
4.2.	Υλικά / Συνθέσεις δοκιμίων.....	49
4.3.	Μέτρηση Θλιπτικής αντοχής.....	53
4.4.	Ανοιχτό Πορώδες (OP) / Υδατοαπορροφητικότητα.....	55
4.5.	Συντελεστής Τριχοειδούς απορρόφησης.....	57
4.6.	Συντελεστής διείσδυσης Cl μη σταθερής κατάστασης (NT BUILD 492)	59
5.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	68
5.1.	Θλιπτική αντοχή	68
5.2.	Ανοιχτό πορώδες.....	70
5.3.	Τριχοειδής απορρόφηση	71
5.4.	NT BUILD 492	75
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	80
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82
8.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	85
8.1	Τριχοειδής απορρόφηση.....	85
8.2	Διείσδυση Χλωριόντων.....	86

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	7
Εικόνα 1.2: Σχηματική παράσταση τομής σκληρυμένου σκυροδέματος . Πάνω αριστερά, τομή όπως φαίνεται με γυμνό οφθαλμό. Πάνω δεξιά, ασθενείς περιοχές λόγω συγκέντρωσης νερού και προϋπάρχουσες μικρορωγμές σε περιοχές της διεπιφάνειας μεγάλων αδρανών τσιμεντοπολτού. Κάτω, φαινόμενο εξίδρωσης (Κόλιας 2011-12).....	9
Εικόνα 1.3: Επίδραση του λόγου N/T στη δημιουργία τριχοειδών κενών	10
Εικόνα 1.4: Φθορά θαλάσσιας κατασκευής η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό (Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιζιγάκη, Αθήνα 1993).....	16
Εικόνα 1.5: Διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) στον σπλισμό σκυροδέματος.....	17
Εικόνα 1.6: Εκτίμηση βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος μετά από ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνη	18
Εικόνα 1.7: Ο μηχανισμός της διάβρωσης του χάλυβα στο σκυρόδεμα.....	21
Εικόνα 1.8: Οι σχετικοί όγκοι του σιδήρου και των προϊόντων της διάβρωσης	22
Εικόνα 1.9: Εξέλιξη διάβρωσης σπλισμού από χλωριόντα.....	22
Εικόνα 1.10: Σχέση υδατοδιαπερατότητας, λόγου N/T και τριχοειδών πόρων	26
Εικόνα 1.11: Σκαρίφημα απεικόνισης υδατοπερατότητας πρισματικού δοκιμίου	28
Εικόνα 1.12: Σχέση θλιπτικής αντοχής, υδατοδιαπερατότητας και λόγου στερεών προς κενά .	29
Εικόνα 1.13: Μηχανισμοί μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα	31
Εικόνα 2.1: Ιπτάμενη Τέφρα	35
Εικόνα 2.2: Πυριτική Παιτάλη	37
Εικόνα 2.3: Σκωρία υψικαμίνου.....	39
Εικόνα 2.4: Μετακαολίνης	40
Εικόνα 3.1: Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής με τον χρόνο σε ημέρες	44
Εικόνα 3.2: Τρισδιάστατο ραβδόμορφο διάγραμμα επιφανειακής διείσδυσης νερού των πρώτων 10 λεπτών σε σχέση με τον χρόνο και το είδος της σύνθεσης.....	47
Εικόνα 3.3: Τρισδιάστατο ραβδόμορφο διάγραμμα υδατοαπορροφητικότητας σε σχέση με τον χρόνο και το είδος της σύνθεσης.....	47
Εικόνα 3.4: Τρισδιάστατο ραβδόμορφο διάγραμμα τριχοειδούς απορρόφησης σε σχέση με τον χρόνο και το είδος της σύνθεσης.....	48
Εικόνα 4.1: Παρασκευή κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών διαστάσεων 1000x100x100 mm και 200x100 mm αντίστοιχα	52
Εικόνα 4.2: Συντήρηση κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών σε νερό	52
Εικόνα 4.3: Μέτρηση βάρους κυβικού δοκιμίου	53
Εικόνα 4.4: Διάταξη δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής f_c	54
Εικόνα 4.5: Θραύση δοκιμίων μετά τη δοκιμή	55
Εικόνα 4.6: Μέτρηση μάζας επιφανειακώς στεγνού δοκιμίου.....	57
Εικόνα 4.7: Διαδικασία μέτρησης ανοικτού πορώδους: μέτρηση μάζας υπό άνωση (Mimm) ...	57

<i>Εικόνα 4.8: Διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 4.9: Δοκίμια κατά την διάρκεια του πειράματος της τριχοειδούς απορρόφησης</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 4.10: Ηλεκτρική διάταξη δοκιμής NordTest Build 492</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 4.11: Η διάταξη της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 4.12: Η διάταξη με το ηλεκτρικό κύκλωμα σε λειτουργία</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 4.13: Διάρρηξη του δοκιμίου.....</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 4.14: Δοκίμια μετά τη διάρρηξη</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 4.15: Δοκίμια μετά τη διάρρηξη και τον ψεκασμό με AgNO₃.</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 4.16: Μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων</i>	<i>65</i>
<i>Σχήμα 5.1: Μέση θλιπτική αντοχή (MPa), για κάθε σύνθεση</i>	<i>69</i>
<i>Σχήμα 5.2: Ανοικτό πορώδες OP (%), για κάθε σύνθεση.....</i>	<i>71</i>
<i>Σχήμα 5.3: Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, για τη σύνθεση 17A2B.</i>	<i>73</i>
<i>Σχήμα 5.4: Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{0.5}), ανά είδος σύνθεσης.....</i>	<i>75</i>
<i>Σχήμα 5.5: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων Dnssm (m²/s), για κάθε σύνθεση.</i>	<i>78</i>

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Ελάχιστη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος, ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, μέγιστος λόγος Ν/Τ κατά EN 206	14
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά και ποσότητες υλικών ανά σύνθεση και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.....	50
Πίνακας 4.2: Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: NordTest Build 492 (1999)]	61
Πίνακας 4.3: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διείσδυσης [πηγή: Tang (1996)].....	66
Πίνακας 4.4: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή: Nilsson et all (1998)]	67
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) αντοχής θλίψης 28 και 90 ημερών, κυβικών δοκιμίων.	68
Πίνακας 5.2: Μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμής ανοικτού πορώδους.....	70
Πίνακας 5.3: Πειραματικές μετρήσεις δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης για κάθε σύνθεση...	72
Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης	74
Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής χλωριόντων για 28 ημέρες, για κάθε δοκίμιο.....	76
Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής χλωριόντων για 90 ημέρες, για κάθε δοκίμιο.....	76
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων 28 και 90 ημερών, για κάθε σύνθεση	77

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος καθώς και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται από πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά αποτελεί το αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, η έρευνα επικεντρώθηκε στην προσθήκη μετακαολίνη (MK), μια τεχνητή ποζολάνη με αξιόλογη ποζολανική δράση και στην πυριτική παιπάλη (SF), η οποία θεωρείται ως το αποτελεσματικότερο πρόσθετο σκυροδέματος σε έργα υψηλών προδιαγραφών από άποψη ανθεκτικότητας.

Συνολικά σχεδιάστηκαν και παρασκευάστηκαν εννέα (9) συνθέσεις σκυροδέματος, με σταθερό ποσοστό κ.β. περιεχόμενων τσιμεντοειδών (10%), ενώ ο λόγος νερού προς τσιμέντο N/T έλαβε τις τιμές 0.55, 0.50, 0.45. Οι τρεις πρώτες συνθέσεις αποτέλεσαν συνθέσεις σκυροδέματος με σύνθετο τσιμέντο Portland. Ακολούθησαν τρεις συνθέσεις με προσθήκη μετακαολίνη και τρεις με πυριτική παιπάλη .

Όλες οι συνθέσεις υποβλήθηκαν σε μια σειρά από δοκιμές με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της σύνθεσης στους παράγοντες ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Έτσι μέσω κατάλληλων δοκιμών, προσδιορίστηκε η αντοχή σε θλίψη πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του ανοιχτού πορώδους, καθώς και ο ρυθμός διείσδυσης νερού μέσω της τριχοειδούς απορρόφησης. Τέλος, προσδιορίστηκε το βάθος διείσδυσης χλωριόντων σύμφωνα με το πρότυπο NT Build 492. Οι παραπάνω πειραματικές διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν για χρόνους ωρίμανσης του σκυροδέματος 28 και 90 ημέρες, ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη η μελέτη μέχρι και την ηλικία των 180 ημέρων.

Μετά το πέρας των πειραματικών δοκιμών, πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για όλες τις συνθέσεις, σε σχέση με τις αντίστοιχες αναφοράς, για αντίστοιχο λόγο N/T και χρόνο ενυδάτωσης του σκυροδέματος. Παρατηρήθηκε γενικά, ότι οι συνθέσεις με τσιμεντοειδές υλικό και μικρό συντελεστή N/T εμφάνισαν καλύτερα αποτελέσματα ως προς τις αντίστοιχες δοκιμές ανθεκτικότητας. Συγκεκριμένα, η αντοχή θλίψης σημείωσε υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες αμιγούς σύνθεσης, ενώ το ανοικτό πορώδες (OP) καθώς και ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης (S) μειώθηκαν σημαντικά. Η ίδια φθίνουσα τάση σημειώθηκε και για τον συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων.

Λέξεις κλειδιά: ανθεκτικότητα, σκυρόδεμα, τσιμεντοειδή πρόσθετα, θλιπτική αντοχή, συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων, δοκιμή NT Build 492, τριχοειδής απορρόφηση, ανοικτό πορώδες.

ABSTRACT

The durability of concrete and the way it is affected by cementitious materials addition is the subject of this thesis. In particular, the research was focused on the addition of metakaolin (MK), an artificial pozzolan with a remarkable pozzolanic properties, and silica fume (SF), which is considered to be the most effective additive for concrete in high performance projects, in terms of durability.

A total of nine (9) concrete mixtures were designed and produced, with a constant percentage of supplementary cementitious material content (10% per weight), while the ratio of water to cement (W/C) was set as 0.55, 0.50, 0.45. The first three mixtures were the reference mixtures, of conventional concrete made of cement Portland Type I (OPC). The following three mixtures were produced with the addition of metakaolin (MK) and the rest three mixtures were produced with the addition of silica fume (SF).

Subsequently, these mixtures were subjected to a series of tests for further research on the effect of the factors associated with the concrete durability. Thus, through appropriate tests, the compressive strength was determined and the open porosity, as well as the water rate permeation through sorptivity, were calculated. Finally, the chloride permeation depth was determined according to the NT Build 492 standard. The above experimental procedures were performed for concrete maturation time of 28 and 90 days, while ongoing research will consider the result at the maturation time of 180 days.

At the end of the experimental tests, the results obtained from the composite mixtures were analysed and compared to the corresponding reference mixtures, with respective W/C ratio and concrete hydration time. It was generally observed that mixtures containing cementitious material of a low W/C ratio, exhibited better results to the respective durability tests. In particular, in the compressive strength test, they presented higher values compared to the corresponding reference mixtures, whereas the open porosity (OP) as well as the sorptivity coefficient (S) decreased significantly. The same decreasing trend was also noted during the chloride permeation test.

Key words: durability, concrete, supplementary cementitious materials, compressive strength, chloride permeation coefficient, NT Build 492 test, sorptivity, open porosity.

1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

1.1. Εισαγωγή

Ανθεκτικότητα σε διάρκεια ονομάζουμε τον ελάχιστο χρόνο μέσα στον οποίο η κατασκευή έχει την ικανότητα να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις χωρίς να χάνει τις ιδιότητες αντοχής και λειτουργικότητάς της κάτω από ένα αποδεκτό όριο. Όπως όλα τα σύνθετα υλικά, έτσι και το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής πέραν του οποίου κρίνεται λειτουργικά ανεπαρκές. Άλλωστε, κανένα υλικό δεν είναι από τη φύση του απολύτως ανθεκτικό. Ως αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών αλληλεπιδράσεων, η μικροδομή και συνεπώς οι ιδιότητες αλλάζουν με το χρόνο. Ένα υλικό θεωρείται ότι έχει ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του όταν οι ιδιότητές του, κάτω από δεδομένες συνθήκες λειτουργίας, έχουν απομειωθεί μέχρι ένα σημείο που η περαιτέρω χρήση του θεωρείται είτε επισφαλής είτε αντιοικονομική. Επιπλέον, μία ανθεκτική κατασκευή ευνοεί τη διατήρηση των περιβαλλοντικών πόρων και τη μείωση των αποβλήτων, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιδράσεις λόγω επισκευής και αντικατάστασης.

Το σκυρόδεμα πρέπει να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις, στη χημική προσβολή και στη φθορά, ενώ ταυτόχρονα επιβάλλεται να διατηρεί τις επιθυμητές μηχανικές του ιδιότητες. Το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με το ότι τα έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν κατασκευαστεί πριν από αρκετές δεκαετίες, καθιστά το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια το υπ' αριθμόν ένα επιστημονικό και πρακτικό πρόβλημα του σκυροδέματος.

Οι κατασκευές ανάλογα με τη χρήση και τη λειτουργία τους απαιτούν διαφορετικό βαθμό ανθεκτικότητας που εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης του περιβάλλοντος και τις επιθυμητές ιδιότητες. Τα συστατικά του σκυροδέματος, η αναλογία τους και η αλληλεπίδραση αυτών, ο τρόπος ανάμιξης και συντήρησης και οι συνθήκες περιβάλλοντος καθορίζουν τελικά την ανθεκτικότητα και τη ζωή του σκυροδέματος.

Στις μέρες μας, υπάρχει μια γενική επίγνωση ότι κατά το σχεδιασμό των κατασκευών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να αξιολογούνται τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας των δομικών υλικών τόσο σχολαστικά όσο και άλλα θέματα, όπως τα μηχανικά χαρακτηριστικά και το αρχικό κόστος. Άλλωστε, τα έξοδα της επισκευής και αντικατάστασης των κατασκευών που προκύπτουν από την αστοχία των υλικών πρέπει να αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι του συνολικού προϋπολογισμού της κατασκευής. Εκτιμάται ότι, στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, το 40% των συνολικών πόρων της

κατασκευαστικής βιομηχανίας χρησιμοποιείται για την επισκευή και συντήρηση των υπαρχουσών κατασκευών και μόνο το 60% για νέες εγκαταστάσεις. Επίσης, είναι εμφανής η τάση για ενίσχυση και αποκατάσταση υφιστάμενων κατασκευών, κυρίως λόγω των κακών οικονομικών συνθηκών που επικρατούν στη χώρα μας αλλά και παγκοσμίως.

1.2. Παράγοντες ανθεκτικότητας

Οι κύριες αιτίες μείωσης της ανθεκτικότητας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα μπορεί να επηρεάζονται από α) εσωτερικούς ή β) εξωτερικούς παράγοντες και μπορεί να είναι 1) φυσικές, 2) χημικές, 3) μηχανικές. Οι τρεις κατηγορίες ρευστών που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα είναι:

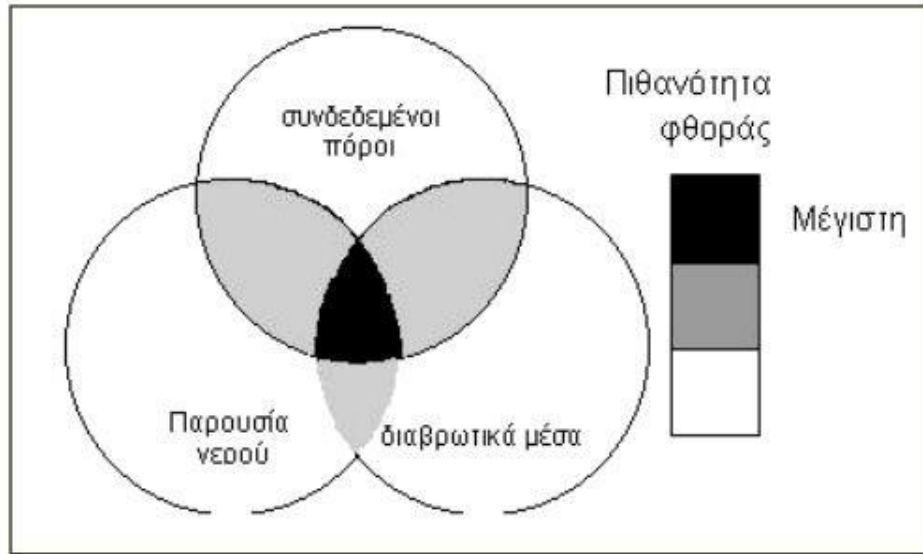
- το νερό
- ο ατμοσφαιρικός αέρας (O_2 , CO_2)
- το ειδικό περιβάλλον που μπορεί να βρίσκεται το σκυρόδεμα (SO_4^{2-} , Cl^- , O_2)

Η διαπερατότητα (permeability), εκφράζει την ευκολία με την οποία τα παραπάνω ρευστά εισέρχονται και μεταφέρονται στο σκυρόδεμα. Η κίνηση των ρευστών μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους εξής μηχανισμούς: α) διαμέσου ροής σε πορώδες μέσο, β) μέσω διάχυσης, γ) μέσω απορρόφησης.

Έτσι, οι τρεις (3) παράγοντες επιρροής της ανθεκτικότητας είναι:

- η παρουσία νερού
- η παρουσία συνδεδεμένων πόρων
- η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον

Καθένας απ' αυτούς τους τρεις παράγοντες συμβάλλει στη μείωση της ζωής του σκυροδέματος, ενώ συνύπαρξη και των τριών, συντελεί στην επιτάχυνση του χρόνου φθοράς της κατασκευής.



Εικόνα 1.1: Παράγοντες ανθεκτικότητας

1.3. Το νερό ως παράγοντας φθοράς

Το νερό αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Τα μόρια του είναι πολύ μικρά κι επομένως είναι ικανά να διεισδύουν μέσα σε λεπτούς πόρους και κοιλότητες ενώ είναι αυτό που διαλύει τις περισσότερες ουσίες από οποιοδήποτε άλλο υγρό. Επίσης, συμμετέχει σχεδόν σε όλους τους μηχανισμούς αποσάθρωσης του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, 1) οι φθορές από τριβή και κρούση που οφείλονται σε δράσεις του περιβάλλοντος όπως αέρας, νερό και διάφορα φερτά υλικά, 2) η αποσάθρωση λόγω παγετού που οφείλεται στην εναλλαγή κύκλων ψύξης - απόψυξης του σκυροδέματος με παρουσία υγρασίας ή νερού, το οποίο κατά τη φάση της ψύξης λόγω της μετατροπής του σε πάγο διογκώνεται και αποσαθρώνει το σκυρόδεμα που περικλείει πόρους ή ρωγμές γεμάτες με νερό, 3) η διάβρωση-οξείδωση του οπλισμού και η καταστροφή της παθητικής προστασίας του που γίνεται όταν το νερό εισχωρήσει στην επιφάνεια του οπλισμού, είναι μερικά απ' τα παραδείγματα που κάνουν έκδηλη την επιρροή του νερού στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Ακόμη, 4) το νερό επηρεάζει το πορώδες, αφού υψηλός λόγος w/c αυξάνει την ύπαρξη τριχοειδών

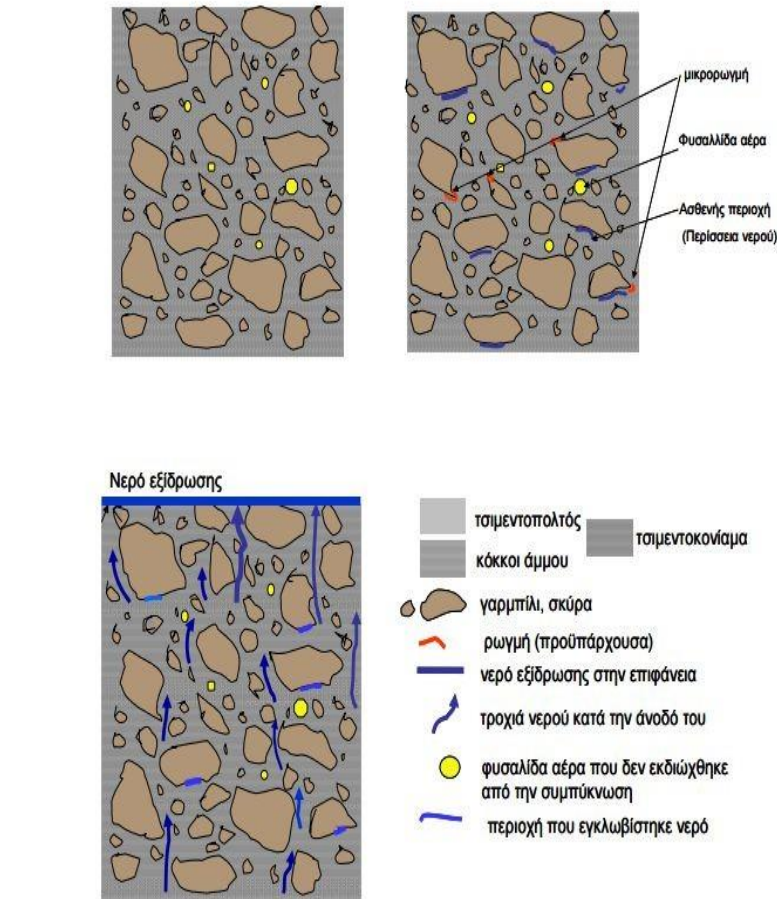
πόρων, 5) αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους τους σκυροδέματος, 6) συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και ενανθράκωση.

Εκτός από τα παραπάνω, το νερό επηρεάζει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, ως προς την ανομοιομορφία και την πολυφασικότητα του ως δομικό υλικό. Πράγματι, το μίγμα του τσιμέντου με τα λεπτόκοκκα αδρανή (τσιμεντοκονίαμα) φαίνεται μακροσκοπικά ότι είναι ομοιογενές, ενώ το σκυρόδεμα παρουσιάζεται ως ένα ανομοιομόρφο υλικό δύο φάσεων: το τσιμεντοκονίαμα (μέσο διασποράς) μέσα στο οποίο είναι διασκορπισμένα τα χονδρότερα αδρανή κατά τυχαίο τρόπο. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν περιοχές του τσιμεντοκονιάματος, οι οποίες είναι μικρότερης πυκνότητας και αντοχής λόγω συγκέντρωσης περισσότερου νερού. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζονται κατά προτίμηση στη κάτω επιφάνεια των μεγαλύτερων αδρανών στις περιοχές, οι οποίες κατά τη διάστρωση, συμπύκνωση και πήξη του σκυροδέματος είχαν περίπου οριζόντιο προσανατολισμό. Στις περιοχές αυτές, ανάλογα με τη συμπύκνωση και τις ιδιότητες του σκυροδέματος, υπάρχει δυνατότητα εγκλωβισμού του νερού, το οποίο μεταβάλλει τοπικά τις αναλογίες σύνθεσης του μίγματος και μειώνει τοπικά την αντοχή. Ο εγκλωβισμός του νερού οφείλεται στο φαινόμενο της εξιδρωσης, δηλαδή στην άνοδο του νερού (που είναι το ελαφρύτερο συστατικό του σκυροδέματος) προς την επιφάνεια κατά το διάστημα που το σκυρόδεμα είναι νωπό, ή ακριβέστερα δεν έχει πήξει. Κατά την πορεία του νερού προς την επιφάνεια, σε πολλές περιπτώσεις μέρος αυτού εγκλωβίζεται κάτω από επιφάνειες μεγάλων συνήθως αδρανών που έχουν οριζόντιο περίπου προσανατολισμό, δημιουργώντας έτσι περιοχές μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε νερό συμβάλλοντας σε πυκνότητα και αντοχή τοπικά μικρότερη.

Συνοψίζοντας λοιπόν είναι εμφανής ο καταλυτικός ρόλος του νερού στην ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, κι αυτό γιατί:

- Επηρεάζει το πορώδες (υψηλός λόγος w/c, αυξάνει την παρουσία τριχοειδών πόρων)
- Αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους τους σκυροδέματος
- Αποτελεί το διαλύτη των διαβρωτικών μέσων
- Συμμετέχει στην αντίδραση διάβρωσης του σπλισμού και στην καταστροφή της παθητικής του προστασίας
- Συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και στην ενανθράκωση

- Απουσία νερού, δεν προχωράει σχεδόν καμία δράση φθοράς.

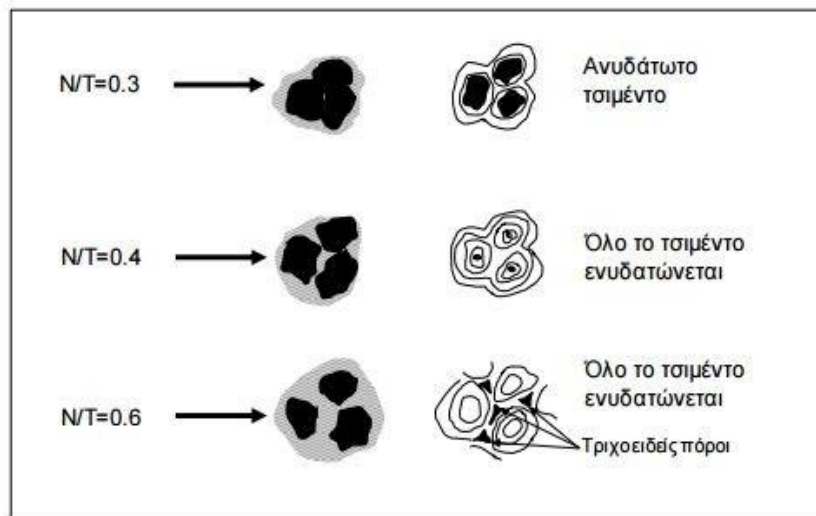


Εικόνα 1.2: Σχηματική παράσταση τομής σκληρυμένου σκυροδέματος . Πάνω αριστερά, τομή όπως φαίνεται με γυμνό οφθαλμό. Πάνω δεξιά, ασθενείς περιοχές λόγω συγκέντρωσης νερού και προϋπάρχουσες μικρορωγμές σε περιοχές της διεπιφάνειας μεγάλων αδρανών τσιμεντοπολτού. Κάτω, φαινόμενο εξίδρωσης (Κόλιας 2011-12).

1.4. Συνδεδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα

Το πορώδες, σχετίζεται με τον βασικό μηχανισμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος και της αύξησης της αντοχής του, τη χημική αντίδραση του νερού με το τσιμέντο, που ονομάζεται «ενυδάτωση του τσιμέντου». Το σύνολο των κενών που απομένει μεταξύ των προϊόντων της ενυδάτωσης, αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος, το οποίο, ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και την απόσταση του κάθε τμήματος του σκυροδέματος από την ελεύθερη επιφάνεια, μπορεί να είναι γεμάτο με νερό ή αέρα. Η σκληρυμένη τσιμεντόπαστα μαζί με τα περιεχόμενα αδρανή, αποτελούν το σκληρυμένο σκυρόδεμα. Το νερό που απαιτείται για την πλήρη αντίδραση του τσιμέντου με το νερό είναι περίπου το 22-23% του βάρους του τσιμέντου, δηλαδή $w/c = 0.23$. [Παπακώστα και Τσιάρα (2015)].

Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει περίσσεια νερού για τις υπόλοιπες ιδιότητες που πρέπει να έχει το σκυρόδεμα, όπως η εργασιμότητα, αντλησιμότητα κλπ. Για να αποκτήσει το σκυρόδεμα αυτές τις ιδιότητες, εκτός των άλλων, απαιτείται περίσσεια νερού.



Εικόνα 1.3: Επίδραση του λόγου N/T στη δημιουργία τριχοειδών κενών

Όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο (μεγάλος λόγος w/c), τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης (πορώδες) των διπλανών κόκκων είναι σχετικά μεγάλα, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να σπάσει αυτός ο «δεσμός» μεταξύ των προϊόντων αντίδρασης νερού-τσιμέντου να είναι σχετικά μικρή, οπότε και η αντοχή να είναι μικρή.

Όταν το νερό σε σχέση με το τσιμέντο είναι λιγότερο (μικρός λόγος w/c), ο δεσμός των προϊόντων ενυδάτωσης είναι αρκετά μεγάλος, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ τους είναι σχετικά μικρά, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να σπάσει να είναι μεγαλύτερη. Οι λόγοι w/c για τα συνηθισμένα έργα κυμαίνονται από 0.45 – 0.70. Για ειδικά σκυροδέματα μπορούμε να φτάσουμε και την τιμή w/c = 0.30-0.35.

Η επίπτωση στο πορώδες, τη «δίοδο» μέσω της οποίας εισέρχονται οι παράγοντες που προσβάλλουν τον σπλισμό, των διαφόρων παραμέτρων, για σταθερά όλα τα υπόλοιπα, είναι:

- Μεγάλη ποσότητα τσιμέντου → μικρό πορώδες
- Μικρός λόγος w/c → μικρό πορώδες
- Μεγάλη αντοχή → μικρό πορώδες

Επομένως, οι υψηλοί λόγοι w/c, αυξάνουν την παρουσία τριχοειδών πόρων, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη διαπερατότητα και μειώνοντας αισθητά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Επιπρόσθετα, άλλο ένα σημείο στο οποίο πρέπει να αναφερθούμε, είναι η μεταβολή του πορώδους στη διεπιφανειακή ζώνη τσιμεντοπολτού και αδρανών, καθώς αυτό επηρεάζει το ρυθμό μεταφοράς μάζας και διαβρωτικών μέσων. Από πολλές έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι γύρω από τους κόκκους των αδρανών υπάρχει μία ζώνη πάχους 10-30 μm περίπου με μεγαλύτερο πορώδες και γενικά με μικρότερη αντοχή, που ονομάζεται διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη ή απλώς μεταβατική ζώνη. Η ζώνη αυτή είναι συνήθως η ασθενέστερη περιοχή στο σκυρόδεμα και θεωρείται ότι έχει καθοριστική επίδραση στη συμπεριφορά του αν και η επίδρασή της δεν έχει ακόμη διερευνηθεί πλήρως.

Τέλος, έχει παρατηρηθεί με τη βοήθεια μικροσκοπίου ή ακτίνων X, ότι σε ορισμένα σημεία στη διεπιφάνεια μεγάλων συνήθως αδρανών και τσιμεντοκονιάματος, υπάρχουν μικρορηγματώσεις χωρίς να έχει υποβληθεί το σκυρόδεμα σε φόρτιση, δεδομένου ότι ο τσιμεντοπολτός κατά τις πρώτες ώρες μετά την σκυροδέτηση υφίσταται θερμοκρασιακές παραμορφώσεις (συστολοδιαστολές), λόγω της εξώθερμης αντίδρασης ενυδάτωσης του τσιμέντου σε συνδυασμό με τη επίδραση των ημερήσιων

μεταβολών της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Οι αντίστοιχες παραμορφώσεις των αδρανών είναι ασήμαντες κι έτσι η ασυμβατότητα αυτή στις παραμορφώσεις προκαλεί ρηγμάτωση, μεταβάλλοντας έτσι το πορώδες του σκυροδέματος.

1.5. Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον

Το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρίσκεται το σκυρόδεμα εάν είναι διαβρωτικό, επιταχύνει τις χημικές επιδράσεις της φθοράς των κατασκευών. Οι χημικές αιτίες δράσης μπορεί να οφείλονται σε α) εξωτερικές επιδράσεις (όξινο διάλυμα, θαλασσινό νερό, έδαφος κ.τ.λ.) ή β) σε εσωτερικές δράσεις (ευπρόσβλητα αδρανή). Ανάλογα λοιπόν με το μηχανισμό με τον οποίο προκαλείται η φθορά, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες χημικής διάβρωσης:

- Διάβρωση λόγω απόπλυσης (προκαλείται από νερό με μικρή σκληρότητα-μαλακό νερό)
- Διάβρωση λόγω διόγκωσης (προκαλείται από θειικά άλατα κυρίως)
- Διάβρωση λόγω ανταλλαγής μάζας (προκαλείται από οξέα, άλατα, φαινόλες)
- Αντίδραση αλκαλίων-αδρανών με κυρίαρχη την αλκαλιοπυριτική αντίδραση
- Επίδραση θαλασσινού νερού, η οποία είναι πολύπλοκη γιατί μπορεί να συνδυάζει πολλές φυσικές και χημικές επιδράσεις, όπως υδροφθορά, επίδραση παγετού-τήξεως, επίδραση του CO₂ της ατμόσφαιρας, επίδραση των αλάτων μέσα στο νερό (θεικών και χλωριούχων), επίδραση αλκαλίων και σχηματισμός βιολογικής μεμβράνης στην επιφάνεια του σκυροδέματος
- Επίδραση εδάφους και εδαφικού νερού

1.6. Διείσδυση χλωριόντων

1.6.1. Σπουδαιότητα χλωριόντων

Στο παραθαλάσσιο περιβάλλον, εκτός του CO₂ δρουν αθροιστικά και τα Cl⁻, των οποίων η δραστηριότητα είναι μεγαλύτερη από του CO₂. Εκτός της μειωμένης διαπερατότητας, στην αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση των Cl⁻ παίζει ρόλο και το είδος του τσιμέντου. Έχει βρεθεί ότι η χρήση τσιμέντων με ποζολάνες ή με σκωρία υψικαμίνων, τύπου II, III, IV σύμφωνα με το νέο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, συντελεί σε μεγαλύτερη αντίσταση στη διείσδυση Cl⁻ από ότι η χρήση αμιγούς τσιμέντου (CEM I, ΕΛΟΤ EN 197-1).

Τα διαλυμένα στο θαλασσινό νερό χλωριούχα και θειικά άλατα αντιδρούν με τα συστατικά του τσιμεντοπολτού σχηματίζοντας χλωριούχο ασβέστιο, θεικό ασβέστιο, υδροξείδιο του μαγνησίου και ετρινγκίτη. Η μεγαλύτερη φθορά στις κατασκευές που είναι σε επαφή με το θαλασσινό νερό, εμφανίζεται στην παλιρροιακή ζώνη (μεταξύ της άνω και της κάτω παλιρροιακής στάθμης), λόγω της ταυτόχρονης δράσης των κυμάτων, της χημικής επίδρασης των αλάτων και της ενανθράκωσης από το CO₂ του αέρα. Τα χλωριόντα μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων, μέσα από τους πόρους του στρώματος με μεγαλύτερη ευκολία από άλλα ιόντα, με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική καταστροφή του επιφανειακού προστατευτικού οξειδίου και την έναρξη της οξειδωσής του χάλυβα [Φαρδής (2005)].

Παρακάτω (Πίνακας 1.1) φαίνονται οι απαιτήσεις που θέτουν οι κανονισμοί διαφόρων χωρών για περιβάλλον κατηγορίας έκθεσης S1 (αέρας κορεσμένος σε θαλάσσια άλατα), περιβάλλον το οποίο στη χώρα μας απαντάται σε μεγάλο βαθμό.

Πίνακας 1.1: Ελάχιστη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος, ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, μέγιστος λόγος N/T κατά EN 206

	Μέγιστος N/T	Ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου	Ελάχιστη αντοχή
Γερμανία	0.50	300	C30/37
Αγγλία	0.50	340	C32/40
Γαλλία	0.55	330	C30/37
Ιταλία	0.50	340	C32/40
Ελλάδα (ΚΤΣ '97)	0.60	330	

Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου (Cl^-), αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβεί το 0.4% έως 0.6% του βάρους του τσιμέντου. Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, είτε από το εξωτερικό περιβάλλον που περικλείει το σκυρόδεμα [Φαρδής (2005)].

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατηρήσουν το προστατευτικό στρώμα προέρχονται από το εσωτερικό του σκυροδέματος, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παράλιες ή θαλάσσιο νερό για το σκυρόδεμα ή από προσθετά βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα. Χλωριόντα από το εξωτερικό περιβάλλον είναι πολύ συνηθισμένο φαινόμενο σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου σε μεγάλες αποστάσεις από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς τη ξηρά. Στης περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη χιονόπτωση, βασική πηγή χλωριόντων είναι τα χλωριούχα άλατα που ρίχνονται στους δρόμους για την τήξη του χιονιού. Χλωριόντα μπορεί να προέρχονται επίσης και από τα επιταχυντικά πήξης που χρησιμοποιούνται ειδικά το χειμώνα.

1.6.2. Πηγές και ενώσεις χλωριόντων

Πηγές χλωριόντων

Τα χλωριόντα που επηρεάζουν τις κατασκευές εμπεριέχονται 1) στο θαλασσινό νερό, 2) τα αντιπαγωτικά άλατα και 3) το υφάλμυρο νερό. Η παρουσία των χλωριόντων στο σκυρόδεμα οφείλεται σε α) πρωτογενή, αλλά και β) δευτερογενή αίτια. Πιο συγκεκριμένα:

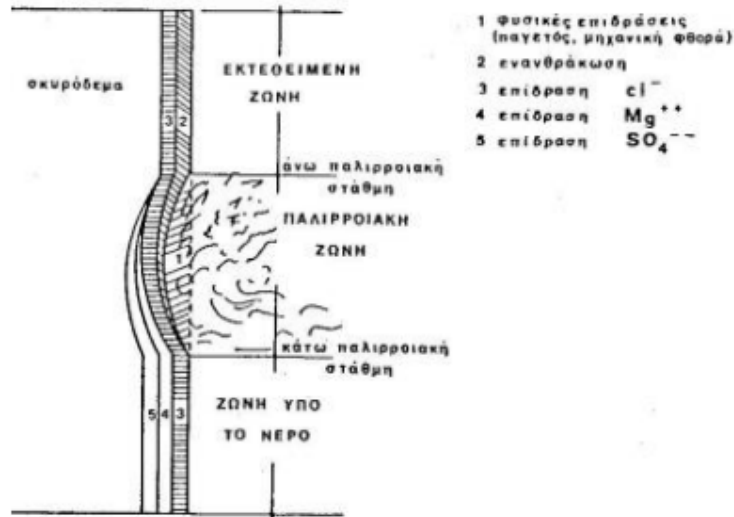
Κατά τη φάση της κατασκευής (πρωτογενή αίτια):

- Χρήση μη καθαρών αδρανών υλικών από παραθαλάσσιες περιοχές
- Χρήση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού στην ανάμιξη
- Χρήση επιταχυντών για ταχεία σκυροδέτηση, με περιεκτικότητα σε Cl^- (CaCl_2)

Κατά τη φάση λειτουργίας (δευτερογενή αίτια):

- Αερομεταφερόμενα άλατα στην υγρασία περιβάλλοντος σε παραθαλάσσιες περιοχές
- Επαφή με άλατα στο υπέδαφος
- Παλίρροια
- Χρήση αντιπαγωτικών αλάτων κατά τους χειμερινούς μήνες για τήξη αλάτων
- Κατασκευές όπως σιλό αποθήκευσης αλατιού

Όπως αναφέρουν και οι M. Regourd (1983) και B. Mather (1982), μια θαλάσσια κατασκευή η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλάσσιο νερό, μπορεί να διακριθεί σε διάφορες ζώνες όπως στην παρακάτω εικόνα. Στις ζώνες αυτές καθεμία από τις προαναφερθείσες φυσικές και χημικές δράσεις εμφανίζεται με διαφορετική ένταση.



Εικόνα 1.4: Φθορά θαλάσσιας κατασκευής η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό (Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιζιγάκη, Αθήνα 1993)

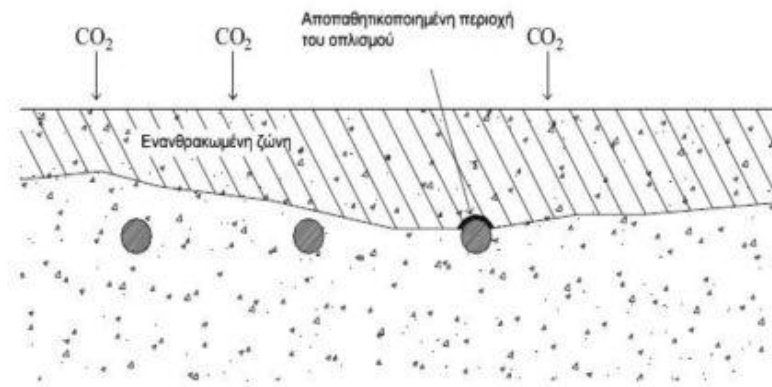
Οι επιπτώσεις εξαιτίας της φθοράς των κατασκευών από το θαλασσινό νερό, μπορούν να περιοριστούν με τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος και με την αύξηση του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών. Η χρήση ποζολανικών πρόσθετων στο τσιμέντο συντελεί στη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος.

Μορφή χλωριόντων

Τα συνολικά χλωριόντα (Cl^- total) που εμπεριέχονται στο σκυρόδεμα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: α) τα ελεύθερα χλωριόντα (Cl^- free) που συναντώνται εντός του πορώδους διαλυμένα στο υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος και β) τα δεσμευμένα στη σκληρυμένη φάση του σκυροδέματος χλωριόντα (Cl^- bound), τα οποία χωρίζονται με τη σειρά τους στα χημικώς δεσμευμένα και τα φυσικώς δεσμευμένα χλωριόντα [Σίδηρης (2010)]. Τα συνολικά χλωριόντα (total chlorides) μπορούν να προσδιοριστούν μέσω διάλυσης του δείγματος σε οξέα, μια διαδικασία που απομακρύνει όλα τα χλωριόντα από το δείγμα με μόνη εξαίρεση τα χλωριόντα που μπορεί να αποτελούν μέρος της χημικής δομής ορισμένων μη όξινων διαλυτών οργανικών πολυμερών [Taylor et al. (1999)].

1.7. Ενανθράκωση Σκυροδέματος

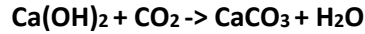
Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από την διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που διατηρείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η αλκαλικότητα αυτή χαρακτηρίζεται από μία τιμή του pH γύρω στο 12.5, που αντιστοιχεί στην υπό συνήθη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$, στο νερό των πόρων. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου, αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβαίνει το 0.4 έως 0.6% του βάρους του τσιμέντου, ή να διαλυθεί γενικά, λόγω μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος γύρω από την ράβδο, σε τιμές του pH κάτω από 9.0. Τότε συμβαίνει αποπαθητικοποίηση του χάλυβα του οπλισμού (δηλαδή δεν απολαμβάνει πλέον την παθητική προστασία που του προσέφερε η αλκαλικότητα του σκυροδέματος).



Εικόνα 1.5: Διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στον οπλισμό σκυροδέματος

Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην χημική αντίδραση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου

τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή του Ca(OH)₂ σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃) σύμφωνα με την αντίδραση:



Η όλη διαδικασία ονομάζεται ενανθράκωση του σκυροδέματος. Είναι αξιοσημείωτο να πούμε ότι η ενανθράκωση, η οποία για το σπλισμένο σκυρόδεμα έχει δυσμενείς επιπτώσεις, είναι η ίδια που οδηγεί στην σκλήρυνση του ασβέστη, στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην Εικόνα 1.6, φαίνεται η διαδικασία εκτίμησης του βάθους ενανθράκωσης του σκυροδέματος μετά από ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης.



Δοκίμιο σκυροδέματος το οποίο έχει ψεκασθεί με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Το τμήμα στο οποίο δεν παρουσιάζεται αλλαγή χρώματος (δεξιά) είναι ενανθρακωμένο (βάθος ενανθρακώσεως περίπου 3cm) Το αριστερά τμήματα (χρώματος ροζ-βουσσινί) δεν έχει ενανθρακωθεί.

Εικόνα 1.6: Εκτίμηση βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος μετά από ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνη

Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν το ρυθμό ενανθράκωσης, είναι:

- Συνθήκες περιβάλλοντος: για σχετική υγρασία περιβάλλοντος 50% έως 70% παρατηρείται το μέγιστο ποσοστό ενανθράκωσης
- Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης

- Χαμηλή διαπερατότητα. Μειώνει το ρυθμό διείσδυσης του CO₂
- Υπάρξη ρωγμών. Επιταχύνει πολύ τη διαδικασία ενανθράκωσης
- Ο λόγος N/T. Με μικρές τιμές του λόγου N/T περιορίζεται πολύ η διείσδυση υγρασίας και CO₂)
- Είδος τσιμέντου. Κατά τον U. Ludwing (1890): τσιμέντα που περιέχουν σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το Portland, κατά τον Matthews (1984): η προσθήκη ιπταμένων τεφρών στο τσιμέντο επιταχύνει την ενανθράκωση σε σκυροδέματα με αντοχή μικρότερη από 30 έως 35 MPa. Κατά τους A. Zhu (1982) και X. Tan (1982), η προσθήκη λιγνοσουλφόνης στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 0.25% κ.β. μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης κατά 10 έως 30%.
- Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης, επιταχύνει την ενανθράκωση

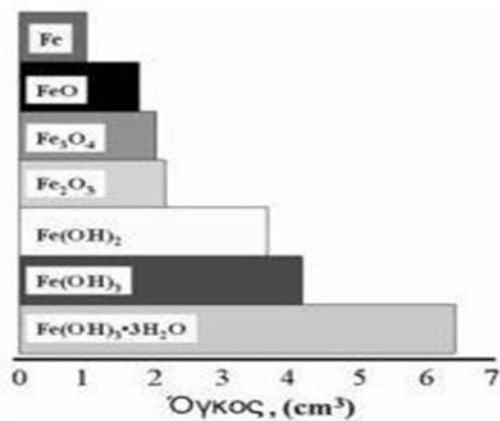
1.8. Διάβρωση Οπλισμού

Στη συνήθη περίπτωση, το σκυρόδεμα αποτελεί ένα προστατευτικό περιβάλλον του σιδηροπλισμού για δύο λόγους:

- Το υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος είναι έντονα αλκαλικό, εξαιτίας του υδροξειδίου του ασβεστίου, προϊόν της αντίδρασης σκλήρυνσης του τσιμέντου, με pH μεταξύ 12.5 και 13.9. Κάτω από αυτές τις συνθήκες ο χάλυβας καλύπτεται επιφανειακά από ένα παθητικό στρώμα οξειδίων, που παρεμποδίζει τη διάβρωσή του. Η διάβρωσή του περιορίζεται στη συντήρηση του παθητικού αυτού στρώματος, δράση εξαιρετικά αργή, που πρακτικά μπορεί να αγνοηθεί.
- Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο στην επαφή του οπλισμού με τα διάφορα διαβρωτικά αέρια (O₂, SO₂ κ.λπ.) και άλλες ουσίες, που βοηθούν τη διάβρωση (χλωριούχα κ.λπ.).

Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, το σκυρόδεμα μπορεί να χάσει την προστατευτική του ικανότητα, π.χ. λόγω ενανθράκωσης όπως προαναφέρθηκε, όπου το pH μπορεί να κατέβει κάτω από ή

όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων γίνει επαρκής, ώστε να καταστρέψει το παθητικό στρώμα οξειδίων του χάλυβα, οπότε η διάβρωση του οπλισμού μπορεί να γίνει σημαντική. Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι μια ηλεκτροχημική δράση, που λαμβάνει χώρα, όταν το σκυρόδεμα έχει μια ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της παρουσίας υγρασίας και ηλεκτρολυτών στους πόρους του. Η ηλεκτροχημική δράση συνεπάγεται την ύπαρξη ανόδου, όπου λαμβάνει χώρα η ανοδική δράση, την ύπαρξη καθόδου, όπου λαμβάνει χώρα η καθοδική δράση και την ύπαρξη ηλεκτρολύτη για τη μεταφορά των ιόντων. Η διεξαγωγή των δράσεων αυτών πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια μετάλλου – ηλεκτρολύτη και ακολουθεί η μετακίνηση των ιόντων στον ηλεκτρολύτη. Στην Εικόνα 1.7 φαίνεται ο μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ στην



Εικόνα 1.8 γίνεται εμφανής η αύξηση του όγκου του σιδήρου κατά τα στάδια δημιουργίας σκωρίας.

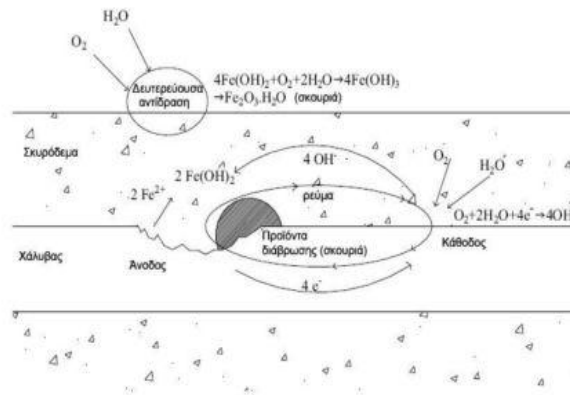
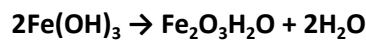
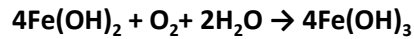
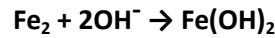
Κατά την έναρξη της διάβρωσης του χάλυβα, τα προϊόντα της διάβρωσης (ιόντα σιδήρου) διαλύονται στο νερό των πόρων του σκυροδέματος, απελευθερώνοντας ταυτόχρονα ηλεκτρόνια, σύμφωνα με την ανοδική αντίδραση:



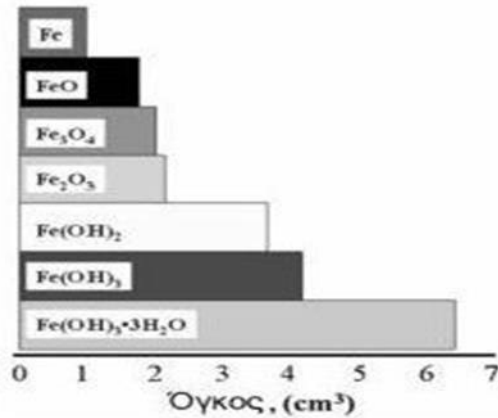
Τα δύο ηλεκτρόνια (e^-) που απελευθερώνονται κατά την ανοδική αντίδραση πρέπει, για λόγους διατήρησης της ηλεκτρικής ουδετερότητας να καταναλωθούν σε κάποιο διαφορετικό σημείο της επιφάνειας του χάλυβα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καθοδικής αντίδρασης, μόνο με ταυτόχρονη παρουσία νερού και οξυγόνου:



Ο σχηματισμός των ιόντων υδροξυλίου (OH⁻) αυξάνουν τοπικά την αλκαλικότητα, ενδυναμώνοντας έτσι την παθητική στρώση και αποτρέποντας τις επιδράσεις της ενανθράκωσης και των χλωριόντων στην κάθοδο [Σωτηριάδης (2011)]. Η δημιουργία σκωρίας πραγματοποιείται με την ακόλουθη πορεία: υδροξείδιο σιδήρου Fe(OH)₂ → σιδηρικό υδροξείδιο Fe(OH)₃ → ένυδρο οξείδιο του σιδήρου (σκωρία) Fe₂O₃·H₂O, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

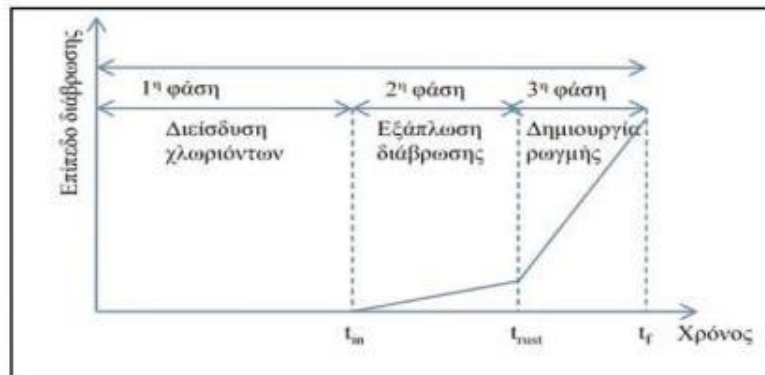


Εικόνα 1.7: Ο μηχανισμός της διάβρωσης του χάλυβα στο σκυρόδεμα



Εικόνα 1.8: Οι σχετικοί όγκοι του σιδήρου και των προϊόντων της διάβρωσης

Η διάβρωση ολοκληρώνεται σε τρία βασικά στάδια: (1η φάση) διείσδυση χλωριόντων (chloride penetration), (2η φάση) εξάπλωση διάβρωσης (corrosion expansion), (3η φάση) δημιουργία ρωγμής (crack creation), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.9.



Εικόνα 1.9: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού από χλωριόντα

Για να πραγματοποιηθεί λοιπόν η διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα πρέπει να υπάρχουν τρεις προϋποθέσεις:

- Ανοδική διάλυση του σιδήρου
- Παρουσία οξυγόνου
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα του σκυροδέματος μέσω του διαλύματος των πόρων

Εάν και οι τρεις προϋποθέσεις εκπληρώνονται, τότε η διάβρωση του σιδηροπλισμού είναι δυνατή.

Τη διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα επηρεάζουν, ακόμη, οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Το είδος και η δομή του σκυροδέματος
- Το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού από το σκυρόδεμα
- Η ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα
- Η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν τη διάχυση του οξυγόνου (αλλά και άλλων διαβρωτικών αερίων) στη μάζα του σκυροδέματος και κατά συνέπεια, στην επιφάνεια του χάλυβα.

Εφόσον οι προϋποθέσεις για τη διάβρωση του σκυροδέματος εκπληρούνται, η διάβρωση λαμβάνει χώρα και μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διατομής των ράβδων οπλισμού με αρνητικές συνέπειες στη στατική ικανότητα της κατασκευής. Επιπλέον, τα προϊόντα της διάβρωσης (σχηματισμός οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού), καταλαμβάνουν αρκετά μεγαλύτερο όγκο από τον αρχικό και προκαλούν εσωτερικές τάσεις στο σκυρόδεμα προκαλώντας διάρρηξη και ρωγμές, καθώς παρεμποδίζεται η ανάπτυξή τους (άσκηση εφελκυστικών τάσεων στο σκυρόδεμα). Τέλος, η απώλεια της επικάλυψης του οπλισμού προκαλεί δομικές φθορές στο οπλισμένο σκυρόδεμα εξαιτίας της απώλειας της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και της μείωσης της διατομής του οπλισμού.

Τα πιο συνηθισμένα μέτρα προστασίας έναντι της διάβρωσης είναι η κατάλληλη επιλογή του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών, η βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος (μείωση της διαπερατότητας, χαμηλός λόγος w/c), η καλή συμπίκνωση και η υγρή συντήρηση.

1.9. Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων

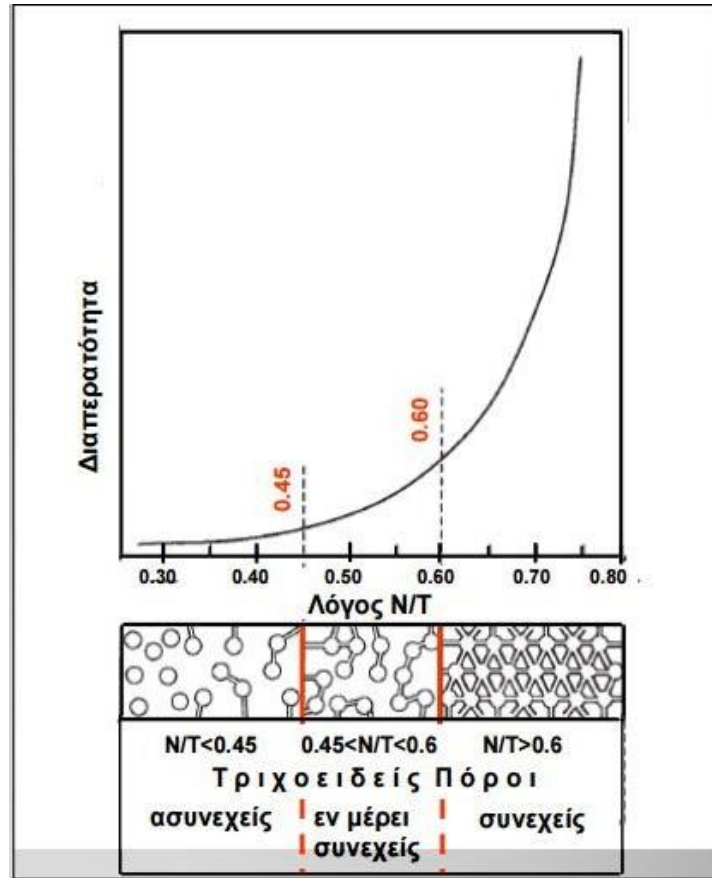
Τρεις είναι οι κύριοι μηχανισμοί με τους οποίους ξένες ουσίες μπορούν να εισχωρήσουν στο σκυρόδεμα, οι οποίοι μπορεί να δρουν είτε μεμονωμένα είτε ταυτόχρονα:

- Η απορρόφηση (είσοδος υγρών λόγω τριχοειδών φαινομένων)
- Η διείσδυση (ροή ρευστού υπό πίεση)
- Η διάχυση (κίνηση μορίων και ιόντων από περιοχές μεγαλύτερης συγκέντρωσης σε περιοχές μικρότερης συγκέντρωσης)

1.9.1. Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)

Η παράμετρος, η οποία θεωρείται ότι εκφράζει την ταχύτητα διείσδυσης του νερού εντός του σκυροδέματος και δίνει έτσι μια καλή πρόβλεψη της ανθεκτικότητάς του, είναι η τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity). Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η παρουσία του νερού σε υγρή μορφή είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς στις κατασκευές από σκυρόδεμα, η τριχοειδής απορρόφηση είναι ο πιο συνηθής μηχανισμός διείσδυσης του νερού μέσα στα δομικά υλικά. Ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης είναι μια παράμετρος που χαρακτηρίζει τα δομικά υλικά αλλά και τα υλικά αποκατάστασης καθώς εκφράζει τον ρυθμό ρόφησης υγρασίας μέσω των τριχοειδών πόρων του κάθε υλικού. Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί πολλά πειράματα ρόφησης νερού μέσω των οποίων προσδιορίζεται ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης μέσω διαφόρων πρότυπων διαδικασιών.

Η τριχοειδής απορρόφηση (ή αλλιώς προσρόφηση μέσω τριχοειδών πόρων), αποτελεί έναν από τους συνηθέστερους μηχανισμούς προσβολής σε περιπτώσεις κύκλων ύγρανσης και ξήρανσης της επιφάνειας του σκυροδέματος (ειδικά σε περιπτώσεις στεγνών επιφανειών), αλλά δεν μπορεί από μόνη της να δημιουργήσει πρόβλημα στον οπλισμό. Μειώνει ωστόσο την διαθέσιμη απόσταση που χρειάζεται να διανυθεί από τα χλωριόντα ώστε αυτά να φθάσουν στη στάθμη του οπλισμού, μέσω διάχυσης. Η διαδικασία της τριχοειδούς απορρόφησης προσεγγίζει το νόμο της διάχυσης. Στην Εικόνα 1.10, φαίνεται η σχέση που υπάρχει μεταξύ τριχοειδών πόρων, υδατοδιαπερατότητας και λόγου N/T .



Εικόνα 1.10: Σχέση υδατοδιαπερατότητας, λόγου N/T και τριχοειδών πόρων

1.9.2. Υδατοπερατότητα (Water permeability)

Ως υδατοπερατότητα ορίζεται η ιδιότητα που χαρακτηρίζει το ρυθμό μεταφοράς του νερού μέσω των πόρων στερεών σωμάτων και χαρακτηρίζεται από το συντελεστή υδατοπερατότητας K , ο οποίος μετράται σε cm/s. Είναι η αντίσταση που προβάλλουν τα υλικά κατά τη διέλευση του νερού μέσα από τη μάζα τους. Ως προς την υδατοπερατότητα τα υλικά χωρίζονται σε α) υδατοπερατά και β) μη υδατοπερατά.

Εξαρτάται από: 1) το πορώδες υλικού (διάταξη πόρων και βαθμός επικοινωνίας τους), 2) από τη μέση διάμετρο των κενών και των τριχοειδών αγγείων, 3) από την υδροστατική πίεση, 4)

από τη σύνθεση του νερού, 5) από τη θερμοκρασία (διαστολή πόρων, ελάττωση του ιξώδους του νερού).

Υδατοπερατότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού

Κατά την αντίδραση ενυδάτωσης του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, καταλυτικοί παράγοντες για την υδατοπερατότητά του είναι το μέγεθος και η συνέχεια των τριχοειδών πόρων του. Πόροι γεμάτοι με νερό σημαίνουν χαμηλή υδατοπερατότητα για το σκυρόδεμα. Αντίστοιχα, πόροι κενοί ή ακόρεστοι σημαίνουν υψηλή υδατοπερατότητα, η οποία αυξάνεται περισσότερο όταν αυτοί είναι συνδεδεμένοι. Έτσι, λίγο μετά τη διάσπρωση, το σκυρόδεμα παρουσιάζει συντελεστή υδατοπερατότητας της τάξης του 10^{-4} cm/s με 10^{-5} cm/s , ενώ κατά την ενυδάτωση μειώνεται τόσο το τριχοειδές πορώδες, όσο και ο συντελεστής, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια αναλογία μεταξύ τους.

Υδατοπερατότητα των αδρανών

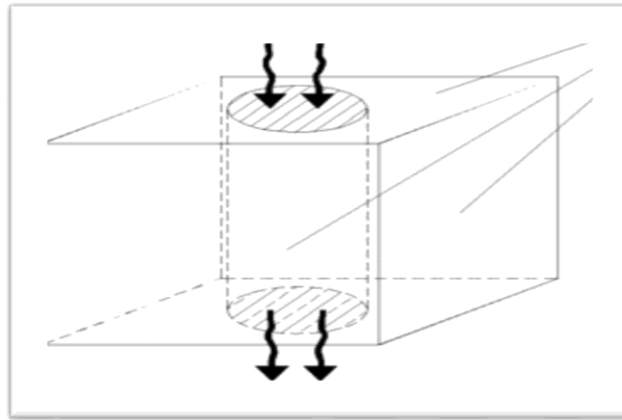
Τα αδρανή έχουν πολύ μικρότερο τριχοειδές πορώδες (συνήθως 3%, σπάνια ξεπερνάει το 10%), σε σχέση με το σκληρυθέν σκυρόδεμα. Ωστόσο, η υδατοπερατότητά τους είναι αυξημένη. Έτσι, ενώ υπάρχουν αδρανή όπως αυτά από μάρμαρο, βασάλτη, διορίτη και πυκνό γρανίτη που έχουν συντελεστή υδατοπερατότητας της τάξης του 1 έως 10×10^{-12} cm/s, κάποιες ποικιλίες από ασβεστόλιθο, ψαμμίτη και γρανίτη δίνουν τιμές δύο τάξεις μεγέθους παραπάνω. Αυτό εξηγείται από το μεγάλο μέγεθος των τριχοειδών πόρων που υπάρχουν σε αυτά τα αδρανή, ακόμα κι αν έχουν πορώδες που δεν ξεπερνά το 10%.

Υδατοπερατότητα του σκυροδέματος

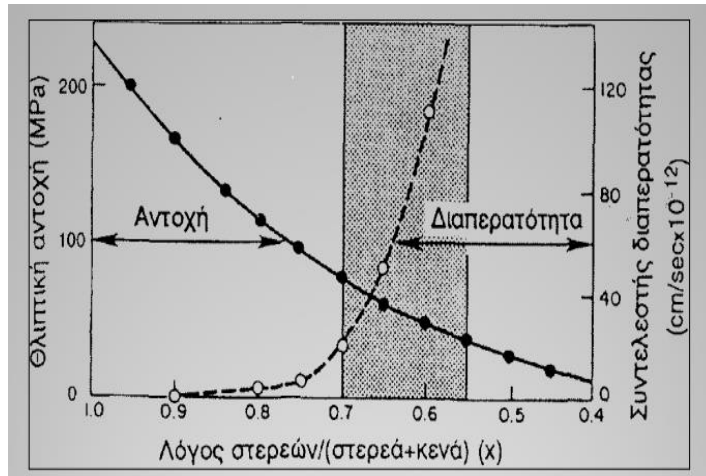
Υδατοπερατό σκυρόδεμα, χαρακτηρίζεται ένα σκυρόδεμα με ανοικτή δομή, που επιτρέπει τη διέλευση του νερού μέσα από τα κενά του. Η εισαγωγή των χαμηλής διαπερατότητας αδρανών στο υψηλής διαπερατότητας νωπό τσιμέντο, στη φάση παραγωγής του σκυροδέματος, θα αναμενόταν να μειώνει την τελική υδατοπερατότητα του μίγματος, καθώς τα αδρανή θα εισχωρούσαν και θα κάλυπταν τα κανάλια διασύνδεσης των τριχοειδών πόρων. Πρακτικά όμως κάτι τέτοιο δε συμβαίνει και το τελικό προϊόν (σκυρόδεμα) έχει συντελεστή υδατοπερατότητας της τάξης του 1×10^{-10} cm/s έως 30×10^{-10} cm/s. Αυτό εξηγείται από τις μικρορωγμές που σχηματίζονται στη διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας κατά τη φάση της ενυδάτωσης, εξαιτίας της συστολής ξήρανσης, των θερμοκρασιακών μεταβολών

και των εξωτερικά εφαρμοζόμενων φορτίων. Αυτές οι μικρορωγμές δημιουργούν νέες, τριχοειδείς διόδους ροής του νερού μέσα στο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η υδατοπερατότητα του. Στην Εικόνα 1.11 απεικονίζεται σχηματικά η υδατοπερατότητα σε ένα δοκίμιο από σκυρόδεμα, ενώ στην Εικόνα 1.12 φαίνεται η συσχέτιση των παραμέτρων της θλιπτικής αντοχής, της υδατοδιαπερατότητας.

Μείωση του τριχοειδούς πορώδους, άρα και της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μικρότερου λόγου w/c , περισσότερης ποσότητας τσιμέντου, με κατάλληλη συμπύκνωση και με προσεκτική επιλογή καλά διαβαθμισμένων αδρανών. Τέλος, η προένταση του υλικού θα μπορούσε να περιορίσει την εμφάνιση των μικρορωγμών στη μεταβατική ζώνη, που είναι και ο κύριος λόγος της αυξημένης υδατοπερατότητας του σκυροδέματος, σε σχέση με το τσιμέντο και τα αδρανή.



Εικόνα 1.11: Σκαρίφημα απεικόνισης υδατοπερατότητας πρισματικού δοκιμίου



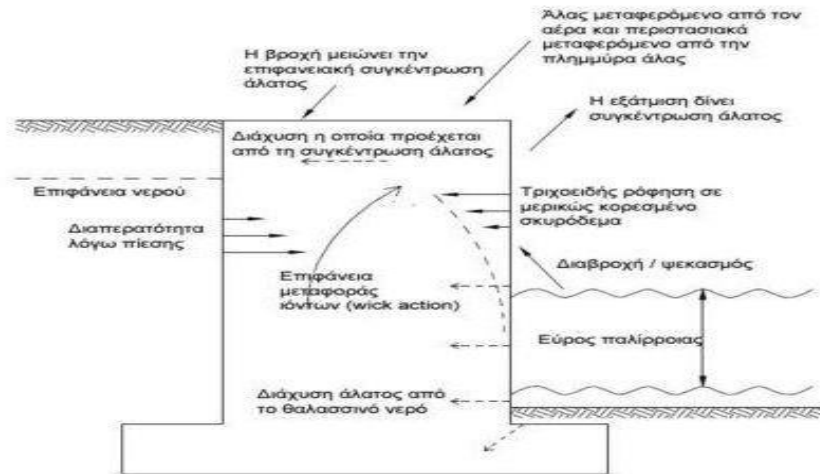
Εικόνα 1.12: Σχέση ελλειπτικής αντοχής, υδατοδιαπερατότητας και λόγου στερεών προς κενά

1.9.3. Μηχανισμός διείσδυσης (permeation)

Διείσδυση: είναι η διαδικασία με την οποία ένα υγρό, αέριο ή υγρό, θα κινηθεί μέσα στο σύστημα των πόρων και ρωγμών του σκυροδέματος λόγω διαφοράς πίεσης. Η αντίσταση σε μια τέτοια ροή δημιουργείται από το ιξώδες του ρευστού, την τριβή στα τοιχώματα των πόρων και των ρωγμών και τη στενότητα και την στρεβλότητα των πόρων και των ρωγμών. Ο βαθμός κορεσμού των συστημάτων πόρου και ρωγμών έχει σημαντική επίδραση στο φαινόμενο της διείσδυσης. Αν ένα από τα ίδια τα υγρά (νερό) δε γεμίσει το σύστημα των πόρων πλήρως, άδειες κοιλότητες που είναι πληρωμένες με ένα άλλο ρευστό (αέρα), θα 'μπλοκάρουν' μέρος της ροής του ρευστού. Εάν ο βαθμός κορεσμού είναι χαμηλός, το ρευστό μπορεί να αποσυνδεθεί, αφήνοντας 'κανάλια ροής' του ρευστού. Η πίεση του υγρού μπορεί να είναι αρνητική, όπως και για τα υγρά στο μη κορεσμένο σκυρόδεμα, δίνοντας υγρή απορρόφηση η οποία θα δημιουργήσει κλίσεις πίεσης και διείσδυσης. Αυτό ονομάζεται τριχοειδής απορρόφηση. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις, η διείσδυση του υγρού από μη κορεσμένο περιβάλλον, θα επηρεαστεί από τη διείσδυση του άλλου ρευστού, αφού στο ρευστό οι πιέσεις είναι αλληλοεξαρτώμενες.

1.9.4. Μηχανισμός διάχυσης (diffusion)

Διάχυση: είναι η μεταφορά αερίου ή διαλυμένης ουσίας σε ένα ρευστό λόγω διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού ενός υλικού. Περιοχές με την υψηλότερη συγκέντρωση μιας ουσίας έχουν την τάση να «αραιώνονται», αν δεν υπάρχει πηγή διαθέσιμη. Η συγκέντρωση μιας ουσίας που έχει μια πηγή διατήρησης της συγκέντρωσης τείνει να εξαπλωθεί μέχρι να επέλθει ισορροπία. Αυτό ονομάζεται διάχυση. Η αντίσταση στη μεταφορά μιας τέτοιας διαδικασίας δημιουργείται από τη διάταξη του συστήματος πόρων, το μέγεθος των πόρων και την στρεβλότητα των πόρων και των ρωγμών. Σε πολύ μικρούς πόρους, η διάχυση επηρεάζεται από μοριακές συγκρούσεις με τα τοιχώματα των πόρων. Ο βαθμός κορεσμού του υγρού του συστήματος πόρων και ρωγμών έχει σημαντική επίδραση στη διάχυση. Οι ατμοί και τα αέρια διαχέονται πολύ αργά μέσα στους πόρους που είναι γεμάτοι με υγρό, βρίσκοντας πολύ πιο εύκολο το δρόμο μέσω των «ανοικτών» άδειων πόρων που συνδέονται για να σχηματίσουν κανάλια ροής γεμάτα με αέρα. Διαλυμένες ουσίες αντιθέτως, απαιτούν κορεσμένο περιβάλλον για να είναι σε θέση να διαχέονται μέσα από το σκυρόδεμα. Η τάση υδρατμών θεωρείται ως η κινητήρια δύναμη για τη ροή υδρατμών, κι η ιδιότητα αυτή του σκυροδέματος ονομάζεται διαπερατότητα υδρατμών, αν και ουσιαστικά ο μηχανισμός είναι η διάχυση, γεγονός που προκαλεί κάποια σύγχυση με τη διείσδυση του νερού και την υδατοπερατότητα. Για να αποφευχθεί αυτή η σύγχυση, η ροή ατμού στον αέρα θα πρέπει να θεωρείται ως μια διαδικασία διάχυσης που οδηγείται από κλίσεις στη συγκέντρωση των ατμών. Η ιδιότητα του υλικού θα πρέπει να εκφράζεται με το συντελεστή διάχυσης υδρατμών. Ωστόσο, ο διαχωρισμός είναι δύσκολος, όταν ο ατμός και η ροή υγρού συνδυάζονται, όπως στην περίπτωση της υγρασίας. Παρακάτω, στην Εικόνα 1.13, φαίνονται οι μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων (Cl⁻) στο σκυρόδεμα.



Εικόνα 1.13: Μηχανισμοί μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα

1.10. Τρόποι Προστασίας Οπλισμένου Σκυροδέματος

Οι τρόποι προστασίας των κατασκευών από σκυρόδεμα αφορούν α) το σκυρόδεμα, ώστε αυτό να καταστεί λιγότερο διαπερατό και περισσότερο ανθεκτικό σε βλαπτικούς παράγοντες που θα οδηγήσουν σε φαινόμενα διάβρωσης του οπλισμού και β) τον χάλυβα, ώστε να έχει τη δυνατότητα να ανθίσταται ή να καθυστερεί σημαντικά τα φαινόμενα διάβρωσης [Τριανταφύλλου (2005)]. Πιο συγκεκριμένα:

Μέθοδοι προστασίας σκυροδέματος:

- Επιλογή του κατάλληλου πάχους επικάλυψης οπλισμού
- Διατήρηση λόγου w/c μεταξύ 0.4 έως 0.6
- Καλή διάστρωση, συμπύκνωση και υγρή συντήρηση για όσο το δυνατό περισσότερες μέρες

- Χρήση κατάλληλου τσιμέντου Portland είτε ποζολανικών τσιμέντων που περιορίζουν τη διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα
- Χρήση ποζολανικών υλικών στο μίγμα
- Χρήση στεγανών ξυλοτύπων, οι οποίοι παρεμποδίζουν τη διαρροή τσιμεντοπολτού

Μέθοδοι προστασίας οπλισμού:

- Χρήση ανοξειδωτων ή γαλβανισμένων ράβδων, ή ράβδων με εποξειδοτική ρητίνη
- Καθοδική προστασία των οπλισμών
- Επικάλυψη των επιφανειών με διαπερατές μεμβράνες ή στρώσεις αδιαπέραστου σκυροδέματος ειδικής σύνθεσης
- Χρήση χημικών προσθέτων, γνωστών ως 'αναστολείς διάβρωσης'

2. ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια συνεχώς αυξανόμενη τάση για τη χρησιμοποίηση και άλλων υλικών στην παραγωγή τσιμέντου, εκτός από τα βασικά στοιχεία του, το κλίνκερ και το γύψο. Τα σύνθετα αυτά τσιμέντα σε διάφορους τύπους παράγονται ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν σε κάθε χώρα. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται, τα οποία εμφανίζουν υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες ή είναι αδρανή, μπορεί να είναι είτε φυσικά υλικά, όπως ο ασβεστόλιθος και οι φυσικές ποζολάνες, είτε βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως η σκωρία υψικαμίνου, η πυριτική παιπάλη και οι ιπτάμενες τέφρες. Η παραγωγή και χρήση σύνθετων τσιμέντων Portland είναι πολύ διαδεδομένη, γεγονός που οφείλεται στην θετική συμβολή τους σε πολλές από τις ιδιότητες του σκυροδέματος, αλλά και στο γεγονός ότι πολλά από τα χρησιμοποιούμενα υλικά αποτελούν παραπροϊόντα άλλων βιομηχανικών διαδικασιών, που έτσι αξιοποιούνται σημαντικά και μειώνονται τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργεί η απόρριψή τους.

Επίσης, τα σύνθετα τσιμέντα έχουν κατά κανόνα, μικρότερο κόστος παραγωγής, ενώ με τη χρήση τους εξοικονομούνται ενέργεια, φυσικοί πόροι και πρώτες ύλες, ενώ συγχρόνως μειώνεται η έκλυση CO₂ κατά την παραγωγή κλίνκερ. Τα σύνθετα τσιμέντα Portland παρουσιάζουν αναμφισβήτητα βελτιωμένες ιδιότητες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι: βελτιωμένη αντοχή έναντι θεικών και άλλων διαλυμάτων οξέων, χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης, βελτίωση χαρακτηριστικών σκυροδέματος (ανθεκτικότητα, προστασία σπλισμού), ανάπτυξη αντοχών κ.ά. Με την πάροδο του χρόνου όμως η βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους, η εκμετάλλευση των συμβατικών ορυκτών πρώτων υλών ή βιομηχανικών παραπροϊόντων καθώς και η μείωση του ενεργειακού κόστους σε συνδυασμό με την πράσινη ανάπτυξη έγιναν ο κύριος σκοπός παραγωγής τους.

Στην Ελλάδα

Η ενεργειακή πολιτική της χώρας μας τα τελευταία 50 χρόνια επικεντρώνεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρή καύση των λιγνιτών έτσι ώστε η ενεργειακή εξάρτηση της χώρας από το πετρέλαιο να μειωθεί στο ελάχιστο. Αυτή η πολιτική έχει σαν αποτέλεσμα την καύση όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων λιγνίτη που εξορύσσονται κυρίως σε δύο περιοχές:

Στα λεκανοπέδια της Δυτικής Μακεδονία, όπου η ηλεκτροπαραγωγή από την καύση του λιγνίτη, στις μονάδες Αμυνταίου, Φλωρίνης, Καρδιάς και Πτολεμαΐδας, καλύπτει το 65% των ενεργειακών αναγκών της χώρας και στη λεκάνη της Μεγαλόπολης, στην κεντρική Πελοπόννησο, όπου για την παραγωγή ενέργειας αξιοποιείται ένας από τους φτωχότερους λιγνίτες παγκοσμίως ενώ καλύπτει το 14% των αναγκών της χώρας μας.

Η καύση του λιγνίτη συνοδεύεται από την παραγωγή παραπροϊόντων των οποίων η σύσταση και οι ποσότητες παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις εξ' αιτίας των διαφορών στα γεωλογικά στρώματα που βρίσκεται ο εκάστοτε εξορυσσόμενος λιγνίτης. Τα παραπροϊόντα αυτά είναι: α) αέρια όπως: εκπεμπόμενο CO₂ και SO₃, β) στερεά όπως: Τέφρα πυθμένα (Bottom slag) και Ιπτάμενη τέφρα (Fly ash). Η ιπτάμενη τέφρα όπως και άλλα βιομηχανικά παραπροϊόντα (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη), αλλά και ο θερμικά επεξεργασμένος καολίνης (μετακαολίνης), αποτελούν τεχνικές ποζολάνες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως 'πρόσμικτα', αντικαταθιστώντας κάποιο ποσοστό του τσιμέντου στο σκυρόδεμα και αντιδρώντας με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)₂), για τη δημιουργία αντίστοιχων τσιμεντοειδών ενώσεων.

2.2. Ιπτάμενη Τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) (Εικόνα 2.1), αποτελεί το κύριο σε ποσότητα παραπροϊόν των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ένα στερεό και κονιώδες υλικό το οποίο παράγεται κατά την καύση των κονιοποιημένων στερεών καυσίμων (λιθάνθρακες, λιγνίτες, τύρφη) στους λέβητες των θερμοηλεκτρικών σταθμών (Θ.Η.Σ.). Στη συνέχεια, συμπαρασύρεται από το ρεύμα των καυσαερίων και συλλέγεται στις εγκαταστάσεις αποκονίωσης (ηλεκτροστατικά φίλτρα). Όπως και στην χώρα μας έτσι και σε παγκόσμια κλίμακα ο διαρκώς αυξανόμενος ρυθμός της χρησιμοποίησης στερεών καυσίμων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνονται παντού οι ποσότητες της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας. Στη χώρα μας, η παραγωγή τέφρας πυθμένα ανέρχεται σε 1×10^6 τόν/έτος, ενώ η συνολική παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας έχει ξεπεράσει τους 13×10^6 τόν/έτος.



Εικόνα 2.1: Ιπτάμενη Τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως πρόσμικτο στην παρασκευή σκυροδέματος, προσφέροντας στο σκυρόδεμα ενδιαφέρουσες τεχνολογικές με αποτέλεσμα να εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα κοινά τσιμέντα. Δε συμπεριφέρεται σαν απλή ποζολάνη αλλά δείχνει να συμβάλλει κατά σημαντικό τρόπο στις τελικές αντοχές των μιγμάτων. Η ιπτάμενη τέφρα σε αντίθεση με τα γνωστά ποζολανικά υλικά έχει διαφορετική συμπεριφορά. Τα

ποζολανικά υλικά αντιδρούν σε δεύτερη φάση (μετά τη λανθάνουσα περίοδο της ενυδάτωσης του τσιμέντου) με το παραγόμενο Ca(OH)_2 από τις πρώτες αντιδράσεις ενυδάτωσης των C_3S και C_2S . Αν ο ρόλος της περιοριζόταν στην αξιοποίηση του παραγόμενου Ca(OH)_2 θα υπήρχε χαμηλό όριο στο ποσοστό προσθήκης της, παρόμοιο με των ποζολανών. Κάτι τέτοιο όμως δεν παρατηρείται και τα μίγματα διατηρούν καλές τεχνολογικές ιδιότητες και σε υψηλά ποσοστά προσθήκης.

Η ιπτάμενη τέφρα είναι υλικό παρόμοιας χημικής σύστασης με το κλίνκερ αφού αποτελείται από τα οξείδια CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O κ.ά. και έχει μορφοποιηθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Η συμπεριφορά της λοιπόν αναμένεται να είναι παρόμοια με του κλίνκερ ως προς την πορεία της ενυδάτωσης, ασχέτως αν αυτή η ενυδάτωση δε συνεπάγεται και ανάπτυξη αντοχών όπως στο καθαρό τσιμέντο. Η ενυδάτωση του τσιμέντου όμως είναι απαραίτητη προκειμένου η τέφρα να αντιδράσει με το παραγόμενο Ca(OH)_2 του ενυδατωμένου τσιμέντου. Αξίζει να σημειωθεί ότι δε λειτουργεί μόνο σαν ποζολανικό υλικό δεσμεύοντας το Ca(OH)_2 που παράγεται από τις πρώιμες αντιδράσεις ενυδάτωσης, αλλά ενεργοποιείται σε δεύτερο στάδιο (από την παρουσία των Ca^{+2}) και αναπτύσει ιδιαίτερα σημαντικές αντοχές.

Ωστόσο, απομένει να διευκρινιστεί εάν τα νέα υλικά που προτείνονται έχουν καλή συμπεριφορά στην επιθετική διάβρωση ιόντων που συναντώνται σε φυσικά ύδατα ώστε να διασφαλίζεται η χρήση τους και σαν ειδικού τύπου υλικά σε μεγάλα τεχνικά έργα, καθώς και εάν μεταβάλλουν τον ρυθμό οξείδωσης του οπλισμού, ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.

2.3. Πυριτική Παιπάλη

Η πυριτική παιπάλη, (Εικόνα 2.2), είναι ένα άμορφο, (μη κρυσταλλικό) πολύμορφο διοξειδίου του πυριτίου. Είναι μια σκόνη πολύ λεπτή που συλλέγεται σαν παραπροϊόν της βιομηχανίας πυρηνικών μετάλλων και σιδηροπυριτικών κραμάτων και αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια με μέση διάμετρο σωματιδίων 150 nm. Αυτό την καθιστά περίπου 100 φορές μικρότερη από το μέσο όρο των σωματιδίων του τσιμέντου. Το κύριο πεδίο εφαρμογής είναι ως ποζολανικό υλικό για σκυρόδεμα υψηλών επιδόσεων.



Εικόνα 2.2: Πυριτική Παιπάλη

Η πρώτη δοκιμή της πυριτικής παιπάλης σε σκυροδέματα, πραγματοποιήθηκε το 1952. Το μεγαλύτερο εμπόδιο για την διερεύνηση των ιδιοτήτων της πυριτικής παιπάλης ήταν η έλλειψη του υλικού, με το οποίο επρόκειτο να πειραματιστούν.

Με την εφαρμογή των αυστηρότερων περιβαλλοντικών νόμων κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1970, χυτήρια πυριτίου άρχισαν να συλλέγουν την πυριτική παιπάλη και να αναζητούν εφαρμογές της [Κανελλόπουλος (2009)]. Εφαρμογές του υλικού αυτού πραγματοποιήθηκαν στη Νορβηγία και δείχνουν ότι το τσιμέντο τύπου Portland που περιέχει πυριτική παιπάλη είχε πολύ υψηλές αντοχές και χαμηλό πορώδες. Έκτοτε, η έρευνα και η ανάπτυξη της πυριτικής παιπάλης είναι ένα από τα πιο πολύτιμα και με πολλαπλές χρήσεις, προσμίκτα, για σκυρόδεμα και τα τσιμεντοειδή προϊόντα που κατασκευάζονται.

Λόγω της λεπτότητας της και της υψηλής περιεκτικότητας σε διοξείδιο του πυριτίου, η πυριτική παιπάλη είναι ένα πολύ αποτελεσματικό ποζολανικό υλικό. Έτσι, προστίθεται σε σκυρόδεμα Portland για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του, ιδίως την αντοχή σε θλίψη και τη σύνδεση μεταξύ των κόκκων του ενώ συμβάλλει εμφανώς στη βελτίωση της εργασιμότητας του. Οι βελτιώσεις αυτές προκύπτουν από την προσθήκη μιας πολύ λεπτής σκόνης στην πάστα του τσιμέντου, καθώς και από την ποζολανική αντίδραση μεταξύ της πυριτικής παιπάλης και των ελεύθερων υδροξειδίων του ασβεστίου στην πάστα.

Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης μειώνει επίσης τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε ιόντα χλωρίου (Cl^-), το οποίο προστατεύει το χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος από τη διάβρωση, ειδικά σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα, όπως παράκτιες περιοχές αλλά και οδοστρώματα (λόγω της χρήσης των αποπαγωγικών αλάτων) ή και γέφυρες πάνω από θαλασσινό νερό.

2.4. Σκωρία Υψικαμίνου

Η σκωρία υψικαμίνου (Granulated Blast Furnace Slag), (Εικόνα 2.3), αποτελεί παραπροϊόν υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων σε μορφή σκωρίας, δηλαδή προκύπτει από την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα. Είναι υλικό μη μεταλλικό, που αποτελείται από πυριτικά και αργιλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου. Η χημική της σύσταση χαρακτηρίζεται κυρίως από οξείδια ασβεστίου, σιδήρου και μαγνησίου (CaO , FeO , MgO) και άλλα οξείδια και στοιχεία σε μικρότερες αναλογίες (SiO , MnO , Al_2O_3 , P_2O_5 , S). Δημιουργείται όταν το μετάλλευμα σιδήρου λιώνει μαζί με ασβεστόλιθο ή δολομίτη, σε φούρνο με αέρα υπό πίεση. Στον υψικάμινο, οι σκωρίες επιπλέουν στο μέταλλο κι έπειτα η λειωμένη σκωρία ψύχεται και στερεοποιείται. Αν η ψύξη της σκωρίας γίνεται πολύ γρήγορα με έκθεση στο νερό, σχηματίζεται διεσταλμένη σκωρία, η οποία στη συνέχεια συνθλίβεται για να παραχθούν τα απαιτούμενα μεγέθη για τις διάφορες εφαρμογές. Όταν η μεταλλουργική διαδικασία της τήξης ολοκληρώνεται, το ασβέστιο έχει συνδυαστεί χημικά με τα αργιλικά και πυριτικά άλατα του μεταλλεύματος και της τέφρας, ώστε να διαμορφωθεί αυτό το μη μεταλλικό προϊόν. Μαζί με τη σκωρία από φούρνους χάλυβα, η σκωρία υψικαμίνου αποτελεί τους σημαντικότερους τύπους σκωρίας. Οι σκωρίες έχουν από μόνες τους υδραυλικές ιδιότητες. Όταν όμως ενυδατώνονται μόνες τους, χωρίς την παρουσία του τσιμέντου Portland, το ποσό του υδραυλικού υλικού που σχηματίζεται είναι μικρό και ο ρυθμός σχηματισμού του χαμηλός. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πάντα σε μίγματα με τσιμέντο τύπου Portland.



Εικόνα 2.3: Σκωρία υψικαμίνου

Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της σκωρίας, σωματίδια κοκκομετρίας μικρότερης από τα 10 μm συνεισφέρουν στις πρώιμες αντοχές, ενώ σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μm και μικρότερα από 45 μm συνεισφέρουν στις τελικές αντοχές. Σωματίδια κοκκομετρίας μεγαλύτερης των 45 μm είναι δύσκολο να ενυδατωθούν. Η σκωρία είναι υλικό κοκκομετρίας μικρότερης των 45 μm.

Η σκωρία υψικαμίνου έχει πολλά πλεονεκτήματα ως πρόσθετο στο σκυροδεμα, όπως: 1) η υψηλή τελική αντοχή, με χαμηλές πρώιμες αντοχές, 2) η υψηλή αναλογία σε κάμψη ως προς την αντοχή σε θλίψη, 3) αντίσταση στα θεϊκά ιόντα και τα ιόντα χλωρίου, 4) χαμηλή θερμοκρασία ενυδάτωσης, 5) μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας του σκυροδέματος. Τα τσιμέντα σκωρίας έχουν επίσης καλή εργασιμότητα και χαμηλή απαίτηση σε νερό. Στην ενυδάτωση της σκωρίας σημαντικό ρόλο παίζει η επίδραση της θερμοκρασίας. Η ενυδάτωση επιταχύνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και επιβραδύνεται σε χαμηλότερες.

Τέλος, η σκωρία χάλυβα είναι αλκαλική, με pH που κυμαίνεται από 8 έως 10. Εντούτοις, το pH της σκωρίας μπορεί να υπερβεί την τιμή 11, ένα επίπεδο που είναι διαβρωτικό στους γαλβανισμένους σωλήνες χάλυβα που έρχονται σε επαφή με τη σκωρία [Καραστεργίου (2009)].

2.5. Μετακαολίνης

Ο μετακαολίνης, (Εικόνα 2.4), είναι ένα προϊόν, άμορφο κατά το μεγαλύτερο μέρος του, που παράγεται με θερμική επεξεργασία (έψηση), σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (450°C) καθαρού καολινίτη (κύριο συστατικό του καολίνης). Ο καολινίτης έχει θεωρητική χημική σύσταση $46.54\% \text{SiO}_2$, $39.5\% \text{Al}_2\text{O}_3$, $13.96\% \text{H}_2\text{O}$ κ.β. Αποτελεί τεχνητή ποζολάνη που παρουσιάζει πολύ υψηλή ποζολανική δραστικότητα σε σύγκριση με τις φυσικές ποζολάνες. Χρησιμοποιείται ως πρόσθετο σκυροδέματος με σκοπό τη βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων του.



Εικόνα 2.4: Μετακαολίνης

Ο καολινίτης, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, είναι ένα αργιλοπυριτικό ορυκτό, το οποίο πήρε το όνομά του από την κινεζική επαρχία Cauling. Το πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από το ορυκτό καολινίτη, ονομάζεται καολίνης. Ο καολίνης είναι το βασικό συστατικό των πορσελάνων. Ο καολινίτης ανήκει στην ομάδα των αργλικών ορυκτών, με δομή 1:1, δηλαδή ένα φύλλο

τετραέδρων πυριτίου εναλλάσσεται με ένα φύλλο οκταέδρων αργιλίου. Ο καολινίτης χαρακτηρίζεται από λευκό χρώμα, λεπτόκοκκη υφή, μεγάλη διασπορά, είναι χημικά αδρανής και έχει χαμηλό κόστος παραγωγής. Ο χοντρόκοκκος καολίνης χρησιμοποιείται ως πληρωτικό, ενώ ο λεπτόκοκκος ως υλικό επικάλυψης. Ο καολίνης αποτελεί πρώτη ύλη σε κεραμικά, σε πορσελάνες, σε είδη υγιεινής, στη τσιμεντοβιομηχανία, σε πυρίμαχους πλίνθους, στη χαρτοβιομηχανία, στη βιομηχανία ελαστικών και πλαστικών PVC κ.ά.

Αποθέσεις καολίνη υπάρχουν στη Λέσβο, την Κίμωλο, την Κω, τη Θήρα, τη Ροδόπη, το Κιλκίς, τη Μήλο και Δράμα. Ο καολίνης εξορύσσεται περιοδικά μόνο από τα κοιτάσματα της Μήλου και της Δράμας, που όμως η ποιότητα του είναι χαμηλή διότι, ο μεν καολίνης της Μήλου (13-20% Al_2O_3 και 0.3-0.6% Fe_2O_3) περιέχει οπαλιοειδή SiO_2 και αλουνίτη (θειούχο ορυκτό), ο δε καολίνης της Δράμας (18% Al_2O_3 και 2,5% Fe_2O_3) περιέχει χαλαζία, αστρίους και μαρμαρυγίες. Τα ενδεικτικά αποθέματα καολίνη (κυρίως της Μήλου και της Δράμας) είναι 50 εκατ. τόνοι.

Τα ορυκτολογικά και χημικά χαρακτηριστικά και των δύο τύπων καολίνη (της Μήλου και της Δράμας) τα καθιστούν ακατάλληλα για υψηλής ποιότητας επικαλυπτικά και πληρωτικά υλικά. Το μεγαλύτερο ποσοστό (80%) της παραγωγής της Μήλου καταναλώνεται, σε ακατέργαστη μορφή, στην εγχώρια τσιμεντοβιομηχανία, ενώ μικρό μέρος (10%) εξάγεται για την παραγωγή λευκού τσιμέντου. Όλη η παραγωγή των Λευκογείων Δράμας καταναλωνόταν μέχρι το 2010 για την παραγωγή πλακιδίων δαπέδου και τοίχου. Οι εγχώριες βιομηχανικές ανάγκες για υψηλής ποιότητας καολίνη ικανοποιούνται από εισαγωγές. Από το 1995 η παραγωγή καολίνη έχει περιοριστεί δραματικά, εξαιτίας κυρίως της έλλειψης καλής ποιότητας αποθεμάτων.

Σύμφωνα με μελέτες, μεγάλα πλεονεκτήματα μπορούν να προκύψουν από τη χρήση μετακαολίνη υψηλής δραστηριότητας στο σκυρόδεμα. Τα πλεονεκτήματα αυτά αφορούν το πορώδες, την κατανομή πόρων, τη διαπερατότητα σε αέρα, την υδατοαπορροφητικότητα, τη διάχυση των χλωριόντων Cl^- και την αντοχή του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η παρουσία μετακαολίνη στο σκυρόδεμα επιδρά θετικά στο πορώδες, μειώνοντάς το. Αυτή η μείωση οφείλεται μεταξύ άλλων και στο ότι οι κόκκοι του μετακαολίνη είναι μικρότεροι από τους κόκκους του τσιμέντου με αποτέλεσμα να καλύπτουν τα κενά μεταξύ των κόκκων τσιμέντου. Επιπρόσθετα, η προσθήκη του μετακαολίνη βελτιώνει σημαντικά τις αντοχές θλίψης του σκυροδέματος. Βέβαια, η εργασιμότητα του σκυροδέματος με μετακαολίνη παρουσιάζεται μειωμένη σε σχέση με ένα σκυρόδεμα αμιγούς τσιμέντου αλλά αυτό εύκολα ρυθμίζεται με τη χρήση ρευστοποιητών. Επομένως, η χρήση του μετακαολίνη συμβάλλει στην παραγωγή σκυροδέματος υψηλής απόδοσης

(high performance concrete), αφού όλες οι ιδιότητες που διαμορφώνουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, παρουσιάζουν σαφή βελτίωση [Badogiannis E. & Tsvivilis S., (2009)].

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1. Εισαγωγή

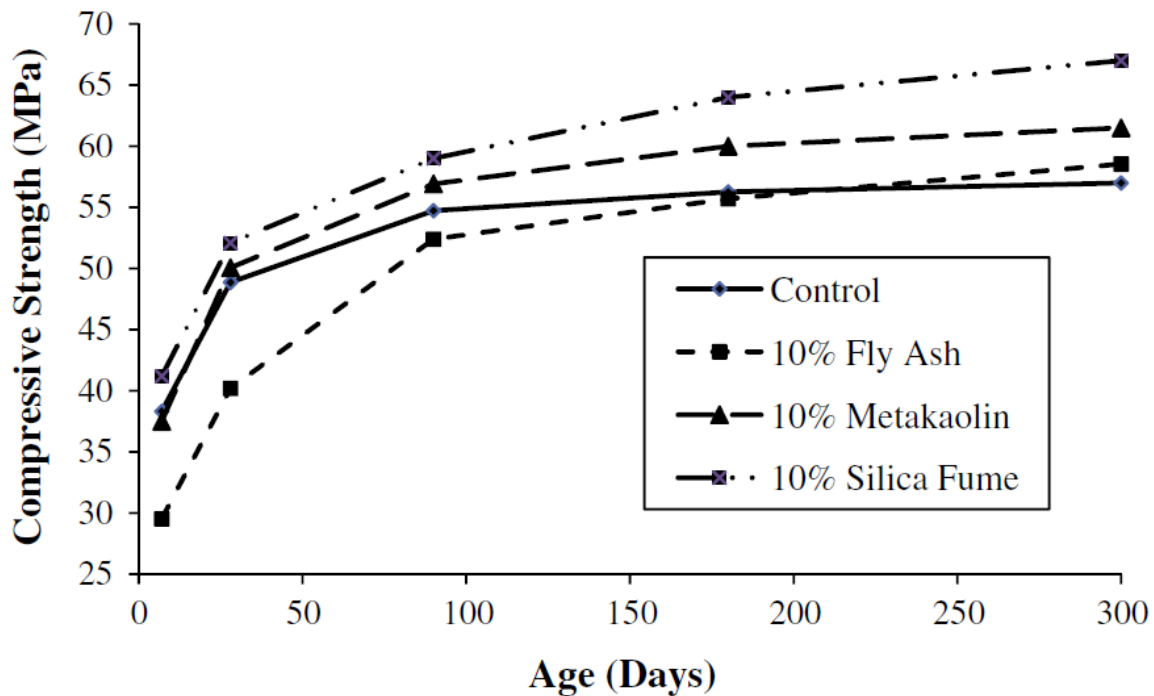
Η ανθεκτικότητα των κατασκευών είναι ένα θέμα ύψιστης σημασίας για τους μηχανικούς και τον κατασκευαστικό κλάδο. Τα τελευταία χρόνια, πραγματοποιείται ένας μεγάλος αριθμός ερευνών σε παγκόσμιο επίπεδο από επιστήμονες, πανεπιστημιακούς και μηχανικούς, οι οποίες επικεντρώνονται στους παράγοντες που την επηρεάζουν, με τελικό στόχο την επίτευξη της διατήρησης της αντοχής και της λειτουργικότητας των κατασκευών σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η αύξηση της ανθεκτικότητας επιτυγχάνεται με ανάμιξη πρόσθετων υλικών όπως σκωρία υφικαμίνου, πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα και μετακαολίνη, σε πληθώρα κατασκευών από σκυρόδεμα. Το γεγονός αυτό κίνησε σε πολλούς το ενδιαφέρον να μελετήσουν την επιρροή αυτών των τσιμεντοειδών υλικών στην ανθεκτικότητα των κατασκευών. Στην παράγραφο που ακολουθεί, παρατίθενται τα αποτελέσματα και τα βασικά συμπεράσματα ερευνών που έχουν διεξαχθεί σχετικά με την τριχοειδή απορρόφηση, την υδατοπερατότητα, τη διαπερατότητα σε αέρα και τη διείσδυση χλωριόντων σε δοκίμια σκυροδέματος.

3.2. Τρέχουσα Ερευνητική Δραστηριότητα

Οι A. Mardani et al., το 2014 διερεύνησαν την αντικατάσταση και ανάμιξη του τσιμέντου με μετακαολίνη (MK), πυριτική παιπάλη (SF) και ιπτάμενη τέφρα (FA) σε ποσοστό 10% και την τυχόν επίδρασή τους στην θλιπτική αντοχή, στο μέτρο ελαστικότητας, στους συντελεστές μεταφοράς μάζας, όπως διείσδυσης χλωριόντων, τριχοειδούς απορρόφησης και υδατοαπορροφητικότητας, στην αντίσταση του σκυροδέματος σε κύκλους ψύξης-απόψυξης, στην αντίσταση του στη δράση των θεικών και τέλος στην μικροδομή του σκυροδέματος. Επίσης να αναφερθεί ότι η αντοχή σε θλίψη που μετρήθηκε σε διαφορετικές ηλικίες (7, 28, 90, 180 και 300 ημέρες), συσχετίστηκε με την ταχύτητα υπερήχων UPV (km/s) μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων, τα οποία δείξαν ότι στις πρώτες 28 μέρες η αντοχή σε θλίψη σκυροδέματος με πυριτική παιπάλη

υπερίσχυε ελαφρώς του σκυροδέματος με μετακαολίνη και περισσότερο του σκυροδέματος με ιπτάμενη τέφρα, ενώ για μεγαλύτερα διαστήματα οι τιμές τους συνέκλιναν.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής με τον χρόνο σε ημέρες

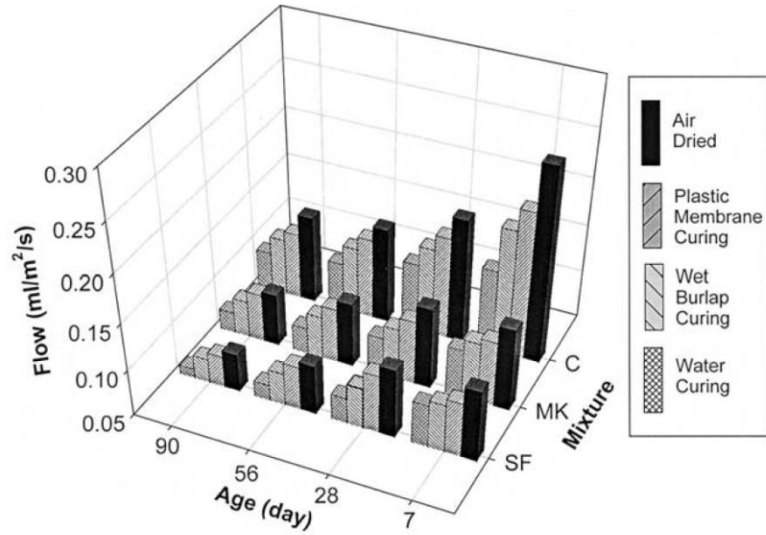
Οι M. Lachemi et al., το 2012 μελέτησαν την επίδραση που έχουν ο μετακαολίνης (MK) και η πυριτική παιπάλη (SF) στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC) και αν ο MK μπορεί να αντικαταστήσει το SF, καθώς είναι οικονομικότερο και πιο εύχρηστο υλικό. Συνολικά, παρασκευάστηκαν δώδεκα δοκίμια με σταθερό λόγο νερού προς κονία (w/b) 0.40, εκ των οποίων τα επτά είχαν ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη 3%, 5%, 8%, 11%, 20%, 25% κατά βάρος αντίστοιχα, τα τέσσερα με πυριτική παιπάλη σε ποσοστό 3%, 5%, 8%, 11% κατά βάρος, και ένα χωρίς καθόλου πρόσθετα. Στη συνέχεια, μετρήθηκε η αντοχή σε θλίψη, από την οποία

προέκυψε ότι για διάστημα 28 ημερών ($T=28d$), το MK8 εμφάνισε παρόμοιες τιμές αντοχής σε θλίψη με το SF8, ενώ το MK25 δεν παρουσίασε σημαντική αύξηση στην αντοχή, παρά μόνο σε ποσοστό 7% σε σχέση με το MK8. Έπειτα, προσδιορίστηκαν η ρευστότητα του σκυροδέματος σε τράπεζα εξάπλωσης διαμέτρου 500 mm, το ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα με τη μέθοδο ASTM C457 και ο συντελεστής συστολής ξηράνσεως σε διάστημα 400 ημερών ($T=400d$) για όλες τις παραπάνω συνθέσεις. Ακολούθησαν δοκιμές για τη εκτίμηση της αντίστασης του σκυροδέματος σε κύκλους ψύξης-απόψυξης και της διάχυσης των χλωριόντων.

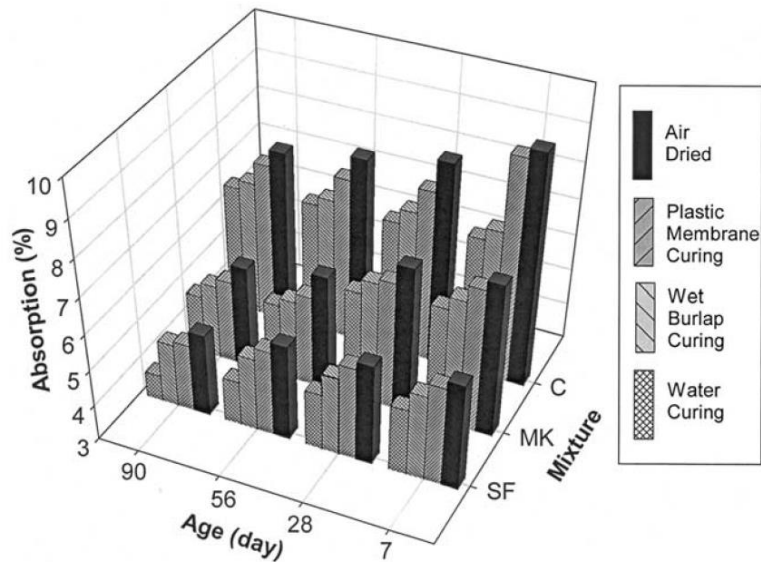
Οι M. Valiour et al., το 2013 παρακολούθησαν την εξέλιξη της ενανθράκωσης και της διείσδυσης των χλωριόντων του σκυροδέματος, σε ακραίο διαβρωτικό περιβάλλον. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο Περσικός Κόλπος όπου επικρατούν συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, υψηλού ποσοστού υγρασίας και αυξημένης συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν επτά συνθέσεις, τέσσερις από τις οποίες είχαν διαφορετικές αναλογίες νερού προς τσιμέντο w/b (0.35, 0.40, 0.45, 0.50 αντίστοιχα) και δεν περιείχαν ποζολάνες. Αντίθετα, οι άλλες τρεις συνθέσεις είχαν σταθερό λόγο w/b 0.40, και το τσιμέντο αντικαταστάθηκε με ποσότητες 5% από μετακαολίνη (MK), 5% από πυριτική παιπάλη (SF) και 10% από φυσικό ζεόλιθο (NZ). Ακολούθως, οι συνθέσεις αυτές τοποθετήθηκαν για μια περίοδο εννέα μηνών σε τέσσερις κρίσιμες τοποθεσίες, όπως σε παλιρροιακή ζώνη με ίσους κύκλους ξήρανσης-ύγρυνσης, σε παραθαλάσσια ζώνη όπου ψεκάζονταν ή διαβρέχονταν από θαλασσινό νερό και σε περιοχές όπου εκτέθηκαν απλά σε ατμοσφαιρικές και υπόγειες συνθήκες. Δείγματα των συνθέσεων αυτών, μελετήθηκαν για τον προσδιορισμό της διείσδυσης και διάχυσης των ιόντων χλωρίου. Διαπιστώθηκε ότι παρόλο που η παλιρροιακή ζώνη είναι η δυσμενέστερη όσον αναφορά στην έκθεση των συνθέσεων στο θαλασσινό νερό, εντούτοις η συγκέντρωση των χλωριόντων ήταν αρκετά μεγαλύτερη στην παραθαλάσσια ζώνη, σε σχέση με τα δείγματα που εκτέθηκαν σε ατμοσφαιρικές και υπόγειες συνθήκες, τα οποία παρουσίασαν πολύ μικρή συγκέντρωση. Οι ερευνητές παρατήρησαν επίσης ότι οι συνθέσεις που περιείχαν πρόσθετες ποζολάνες, είχαν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές στην αντίσταση σε χλωριόντα σε βάθος 20 mm, έναντι των συνθέσεων εκείνων με μεταβλητό λόγο νερού προς τσιμέντο, καθώς επίσης ότι όσο μειωνόταν ο λόγος αυτός τόσο αυξανόταν η τιμή της αντίστασης σε χλωριόντα.

Οι H. A. Razak et al., το 2013 παρακολούθησαν την εξέλιξη επιφανειακής διείσδυσης νερού σκυροδέματος υψηλής αντοχής, όπου κατά τη διάρκεια ωρίμανσης του, επικρατούσαν

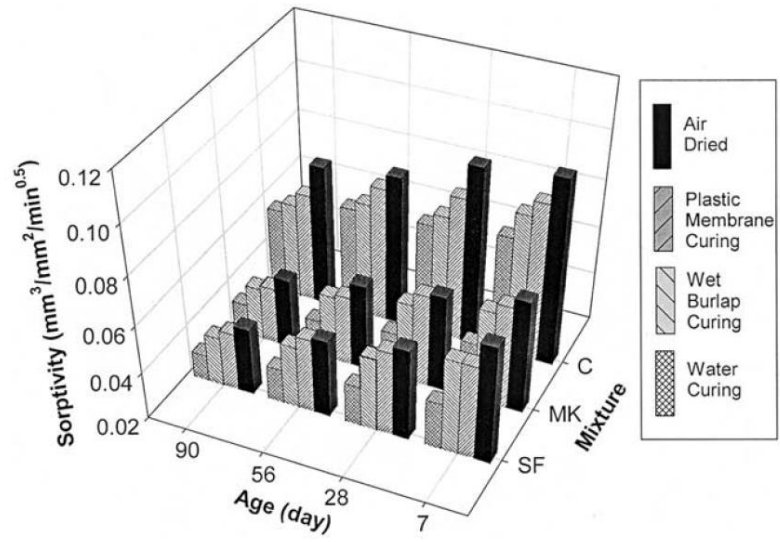
τέσσερις διαφορετικές συνθήκες. Τέτοιες συνθήκες ωρίμανσης ήταν υπό το νερό, εντός βρεγμένης λινάτσας, εντός πλαστικής μεμβράνης και στον αέρα σε θερμοκρασία 27°C. Για τον λόγο αυτόν, παρασκεύασαν σκυροδέματα αμιγούς σύνθεσης, με τσιμέντο (OPC) κατά το Αμερικανικό Πρότυπο ASTM C 150 και σκυροδέματα όπου το τσιμέντο είχε αντικατασταθεί σε ποσοστό 10% από ποζολανικά υλικά όπως μετακαολίνη (MK) και πυριτική παυπάλη (SF), κρατώντας την τιμή w/c σταθερή και ίση με 0.30. Δείγματα αυτών των συνθέσεων υποβλήθηκαν σε δοκιμές επιφανειακής απορρόφησης (ISAT), υδατοαπορροφητικότητας για τον προσδιορισμό του πορώδους και τριχοειδούς απορρόφησης σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, 7, 28, 56 και 90 ημερών. Οι ερευνητές τόνισαν, για την πρώτη δοκιμή, ότι στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια συμπύκνωσης του με δόνηση, παρατηρείται συνήθως σχετική μετακίνηση της τσιμεντόπαστας και λεπτόκοκκων αδρανών προς τα εξωτερικά τοιχώματα του δοκιμίου, που έχει ως αποτέλεσμα να μεγαλώνει το πορώδες ως τιμή σε σχέση με την εσωτερική του δομή και για αυτό το λόγο τα πρώτα δέκα λεπτά ήταν τα πιο αντιπροσωπευτικά (ISAT10). Παρατηρείται στο σχήμα 10, ότι με την πάροδο του χρόνου όλα οι συνθέσεις παρουσίασαν βελτίωση στην ανθεκτικότητα τους, ιδιαίτερος το τσιμέντο με τις πρόσθετες ποζολάνες. Όμοια αποτελέσματα σημειώθηκαν για την τριχοειδή απορρόφηση που διεξήχθη. Τα επιπρόσθετα τσιμεντοειδή βοήθησαν το σκυρόδεμα να μειώσει την ταχύτητα διείσδυσης υγρού στους πόρους του σκυροδέματος. Επιπροσθέτως όλα τα μείγματα που σχεδιάστηκαν επειδή είχαν πολύ χαμηλό συντελεστή w/c =0.30 ο συντελεστής της τριχοειδούς απορρόφησης (S) ήταν οριακά χαμηλότερος του $0.1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{min}^{1/2}$. Τέλος, στο πείραμα της υδατοαπορροφητικότητας των τριών συνθέσεων προσδιορίστηκε η παρουσία των συνδεδεμένων πόρων. Κατά την αντίδραση της ενυδάτωσης του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, η απλή σύνθεση μείγματος τσιμέντου τις πρώτες 28 μέρες δεν είχε σημαντική μείωση της απορρόφησης, σε αντίθεση με τις σύνθετες συνθέσεις με ποζολανικά υλικά, οι οποίες από την αρχή έως το τέλος των 90 ημερών συνέχισαν να σημειώνουν βελτίωση της ανθεκτικότητας τους.



Εικόνα 3.2: Τρισδιάστατο ραβδόμορφο διάγραμμα επιφανειακής διείσδυσης νερού των πρώτων 10 λεπτών σε σχέση με τον χρόνο και το είδος της σύνθεσης



Εικόνα 3.3: Τρισδιάστατο ραβδόμορφο διάγραμμα υδατοαπορροφητικότητας σε σχέση με τον χρόνο και το είδος της σύνθεσης



Εικόνα 3.4: Τρισδιάστατο ραβδόμορφο διάγραμμα τριχοειδούς απορρόφησης σε σχέση με τον χρόνο και το είδος της σύνδεσης

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιείται διερεύνηση σχετικά με την επίδραση στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος της αντικατάστασης του τσιμέντου σε ποσοστό 10% από δύο τσιμεντοειδή πρόσθετα τον μετακαολίνη (MK) και την πυριτική παιπάλη (SF). Συγκεκριμένα, μελετάται: α) η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη, β) η υδατοαπορροφητικότητα μέσω του υπολογισμού του ανοικτού πορώδους και του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης και γ) η διαπερατότητα σε χλωριόντα μέσω του υπολογισμού του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων, κατά το πρότυπο NT BUILD 492.

Παρακάτω, γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκειμένου να γίνει ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, της υδατοαπορροφητικότητας και της διείσδυσης χλωριόντων. Η διεξαγωγή των πειραματικών διαδικασιών έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

4.2. Υλικά / Συνθέσεις δοκιμών

Σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε η παραγωγή των εννέα (9) συνολικά συνθέσεων, με την προσθήκη των δύο τσιμεντοειδών σε αναλογία 10% κ.β. στις έξι (6) από αυτές. Συγκεκριμένα τρεις (3) συνθέσεις με προσθήκη μετακαολίνη (MK) και λόγο (N/T) 0.55, 0.50 και 0.45 αντίστοιχα, και τρεις (3) με προσθήκη πυριτικής παιπάλης (SF) και ομοίως λόγο (N/T) 0.55, 0.50 και 0.45 αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες τρεις (3) συνθέσεις αποτέλεσαν συνθέσεις αναφοράς σκυροδέματος με σύνθετο τσιμέντο Portland. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι κωδικοποιήσεις των συνθέσεων αυτών, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Σύμφωνα με τη λογική της κωδικοποίησης τα πρώτα γράμματα αναφέρονται στο όνομα του πρόσθετου τσιμεντοειδούς στην αγγλική γλώσσα και στη συνέχεια αναγράφεται πρώτα το ποσοστό (%) αντικατάστασης του τσιμέντου και μετά ο λόγος (N/T) της κάθε σύνθεσης. Για παράδειγμα, ο συμβολισμός 'MK10-0.55', αναφέρεται στη σύνθεση σκυροδέματος με προσθήκη Μετακαολίνη σε ποσοστό 10% κ.β. τσιμέντου και με λόγο (N/T) 0.55.

Όσον αφορά τις αμιγείς συνθέσεις, ο συμβολισμός αυτής 'REF', προκύπτει από τα αρχικά της αγγλικής λέξης reference.

Πίνακας 4.1: Ποσότητες υλικών ανά σύνθεση και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.

	REF-0.55	REF-0.50	REF-0.45	ΜΚ10-0.55	SF10-0.55	ΜΚ10-0.50	SF10-0.50	ΜΚ10-0.45	SF10-0.45
	17A-1	17A-2	17A-3	17A-4	17A-5	17A-6	17A-7	17A-8	17A-9
ενεργ. Ν/Τ	0.55	0.50	0.45	0.55	0.55	0.50	0.50	0.45	0.45
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	350	350	350	315	315	315	315	315	315
ΜΚ	0	0	0	35	0	35	0	35	0
SF	0	0	0	0	35	0	35	0	35
ΑΜΜΟΣ	925	925	925	925	925	925	925	925	925
ΡΥΖΑΚΙ	555	555	555	555	555	555	555	555	555
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	370	370	370	370	370	370	370	370	370
ΕΝΕΡΓ ΝΕΡΟ	192.5	175.0	157.5	192.5	192.5	175.0	175.0	157.5	157.5
ΣΥΝ ΝΕΡΟ	220.62	203.12	185.62	220.62	220.62	203.12	203.12	185.62	185.62
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ (%)	0.20	0.49	0.73	0.44	0.54	0.79	1.15	1.26	1.59
ΣΥΝΟΛΟ	2393	2375	2358	2393	2393	2376	2376	2359	2359
κάθιση (mm)	60	100	60	60	50	80	68	150	150
μοναδιαίο βάρος (Kg/m ³)	2327	2354	2370	2320	2329	2341	2335	2354	2371

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστολιθική άμμος (0-2 mm), ρυζάκι (4-8 mm) και γαρμπίλι (8-16 mm). Η ποσότητα κάθε σύνθεσης ήταν 10 lt με λόγο νερού προς τσιμέντο Ν/Τ 0.55, 0.50 και 0.45, σταθερή ποσότητα αδρανών υλικών και κ.β. ποσοστό πρόσθετων τσιμεντοειδών. Η ποσότητα του ρευστοποιητή Sika Viscocrete που χρησιμοποιήθηκε άλλαζε κάθε φορά ανάλογα με την προσθήκη του τσιμεντοειδούς και το λόγο Ν/Τ, με σκοπό την επίτευξη κάθισης κατηγορίας S₂ – S₃. Για κάθε σύνθεση νωπού σκυροδέματος μετρήθηκε η κάθιση και η

πυκνότητα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και οι ποσότητες των υλικών για κάθε σύνθεση που παρασκευάστηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Ακόμα, για όλες τις συνθέσεις παρασκευάστηκαν έξι (6) κυβικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x100 mm, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής, ενώ για τον προσδιορισμό του ανοικτού πορώδους και των συντελεστών διείσδυσης Cl^- , παρασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια, ύψους $H=200$ mm και διαμέτρου $D=100$ mm, δύο για την κάθε σύνθεση, με κωδική ονομασία Α και Β, αντίστοιχα. Εν συνεχεία τα δοκίμια κόπηκαν με ειδικό τροχό προκειμένου να αποκτήσουν τις επιθυμητές διαστάσεις. Τα κυλινδρικά δοκίμια $\Phi 100 \times 200$ κόπηκαν και από την κοπή προέκυψαν πέντε (5) τμήματα από το κάθε δοκίμιο διαστάσεων 100 x 20 mm περίπου το πρώτο τμήμα, 100 x 50 mm τα τρία επόμενα, 100 x 20 mm το τελευταίο και περίπου τα υπόλοιπα 10 mm ήταν υλικό που απορρίφθηκε. Το τελευταίο τμήμα κάθε δοκιμίου ύψους περίπου 20 mm χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη του ανοικτού πορώδους και του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, ενώ τα τρία τμήματα ύψους 50 mm χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων.

Στις εννέα (9) συνθέσεις σκυροδέματος που παρήχθησαν, χρησιμοποιήθηκε κοινό εμπορικό τσιμέντο CEM II M (P,W,L) 32,5. Το διάστημα ωρίμανσης των δοκιμίων ήταν 28 ημέρες για τα τρία (3) από τα έξι (6) συνολικά κυβικά δοκίμια κάθε σύνθεσης, και 90 ημέρες για τα υπόλοιπα τρία (3) κάθε σύνθεσης. Τα δοκίμια ωρίμασαν και συντηρήθηκαν μέσα στο νερό, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.1: Παρασκευή κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών διαστάσεων 1000x100x100 mm και 200x100 mm αντίστοιχα



Εικόνα 4.2: Συντήρηση κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών σε νερό

4.3. Μέτρηση Θλιπτικής αντοχής

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός της θλιπτικής τους αντοχής f_c , σε ηλικία 28 και στις 90 ημερών. Τα κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm αρχικά ζυγίστηκαν για τον υπολογισμό του βάρους τους πριν υποβληθούν σε μονοαξονική θλίψη (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Μέτρηση βάρους κυβικού δοκιμίου

Η αντοχή σε θλίψη δίνεται από τον τύπο:

$$f_c = \frac{P_{max}}{bd} \quad (4.1)$$

όπου:

f_c : η θλιπτική αντοχή σε MPa (N/mm^2)

P_{max} : το μέγιστο φορτίο που ασκείται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου σε N

bd : το εμβαδόν του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισής σε mm^2 , εδώ
 $b = d = 100 \text{ mm}$

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η διάταξη WgkyhamFarance (Εικόνα 4.4), δυναμικότητας 3 MN. Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό κυβικό δοκίμιο μετά το πέρας της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη.



Εικόνα 4.4: Διάταξη δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής f_c



Εικόνα 4.5: Δοκίμιο μετά τη δοκιμή θραύσης

4.4. Ανοιχτό Πορώδες (OP) / Υδατοαπορροφητικότητα

Η μελέτη της Υδατοαπορροφητικότητας περιλαμβάνει κατάλληλες δοκιμές για τον υπολογισμό του ανοικτού πορώδους και του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το τελευταίο τεμάχιο από τα δύο καταλλήλως κοπτόμενα κυλινδρικά δοκίμια αρχικών διαστάσεων 100 x 200 mm των εννέα (9) συνθέσεων. Τα δύο τεμάχια αυτά ονομάστηκαν Α και Β από κάθε σύνθεση.

Το ανοιχτό πορώδες (open porosity), πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο ASTM C 642 (1997). Για τη μέτρηση του ανοικτού πορώδους καταγράφεται το βάρος κάθε δοκιμίου, με ακρίβεια ± 0.1 gr, σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Η πρώτη ζύγιση πραγματοποιείται σε κορεσμένο δοκίμιο (M_{sat}), αμέσως μετά την έξοδό του από τη δεξαμενή συντήρησης, σε περιβάλλον αέρα και η δεύτερη στο ίδιο δοκίμιο σε περιβάλλον νερού, υπό άνωση (M_{imm}). Η τρίτη ζύγιση πραγματοποιείται έπειτα από ξήρανση του δοκιμίου έως σταθεροποίησης του βάρους του, σε περιβάλλον αέρα (M_{dry}).

Τα δοκίμια μεταφέρθηκαν σε φούρνο όπου πραγματοποιήθηκε η ξήρασή τους, για διάστημα περίπου 12 ημερών υπό συνθήκες σταθερής θερμοκρασία 100°C μέχρι να επιτευχθεί σταθεροποίηση του βάρους τους. Σημειώνεται ότι η διαφορά βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων σε διάστημα 24 ± 2 ωρών θα πρέπει να είναι κάτω από 0.1% (24 ± 2 h < 0.1%). Μετά την ξήρασή του, το κάθε δοκίμιο ζυγίστηκε εκ νέου σε συνθήκες ατμοσφαιρικού αέρα (μάζα ξηρού

δοκιμίου, M_{dry}). Από τον συνδυασμό των τριών διαφορετικών τιμών μάζας προέκυψε η τιμή του ανοικτού πορώδους, με τη χρήση των εξισώσεων 4.2 – 4.5:

$$V_o = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{\rho_w} \quad (4.2)$$

όπου:

V_o : ο όγκος ανοιχτών πόρων (m^3)

ρ_w : το ειδικό βάρος του νερού σε συνήθη θερμοκρασία ($18^\circ C$), το οποίο για τους υπολογισμούς ελήφθη ίσο με 1000 kg/m^3 .

$$V_\phi = \frac{M_{sat} - M_{imm}}{\rho_w} \quad (4.3)$$

όπου:

V_ϕ : ο φαινόμενος όγκος (m^3)

$$d_\phi = \frac{\rho_w * M_{dry}}{M_{sat} - M_{imm}} \quad (4.4)$$

όπου:

d_ϕ : ο φαινόμενη πυκνότητα (kg/m^3)

$$OP = \frac{100 * (M_{sat} - M_{dry})}{M_{sat} - M_{imm}} \quad (4.5)$$

όπου:

OP: το ανοικτό πορώδες

Στις Εικόνες 4.6 και 4.7 παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της μάζας ξηρού δοκιμίου, της μάζας υπό αιώρηση και τη μάζας του επιφανειακώς στεγνού δοκιμίου.



Εικόνα 4.6: Μέτρηση μάζας επιφανειακώς στεγνού δοκιμίου



Εικόνα 4.7: Διαδικασία μέτρησης ανοικτού πορώδους: μέτρηση μάζας υπό άνωση (Mimm)

4.5. Συντελεστής Τριχοειδούς απορρόφησης

Στα πλαίσια της μελέτης της Υδατοαπορροφητικότητας διεξάγεται δοκιμή για τον προσδιορισμό του συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης. Το πείραμα της τριχοειδούς απορρόφησης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την οδηγία της RILEM (TC 116-PCD: Permeability of

Concrete as a criterion of its durability), που αναφέρεται στην προσρόφηση νερού μέσω τριχοειδούς απορρόφησης.

Τα δοκίμια $\Phi 100 \times 20$ mm καλύφθηκαν περιμετρικά με ταινία ύψους 20 mm, όσο δηλαδή είναι το ύψος τους. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό, έτσι ώστε η πλευρά έδρασής τους να βρέχεται εξολοκλήρου και η στάθμη του νερού να είναι σταθερά 3 mm πάνω από αυτή. Ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα τα δοκίμια ζυγίζονταν, το κάθε ένα ξεχωριστά, και επανατοποθετούνταν στη δεξαμενή νερού. Από τη διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων για το ίδιο δοκίμιο, προκύπτει η απορροφημένη μάζα νερού.

Η πειραματική διαδικασία αλλά και η μορφή των δοκιμών μετά την εμβάπτιση στο νερό, φαίνονται στις Εικόνες 4.8 και 4.9.



Εικόνα 4.8: Διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης



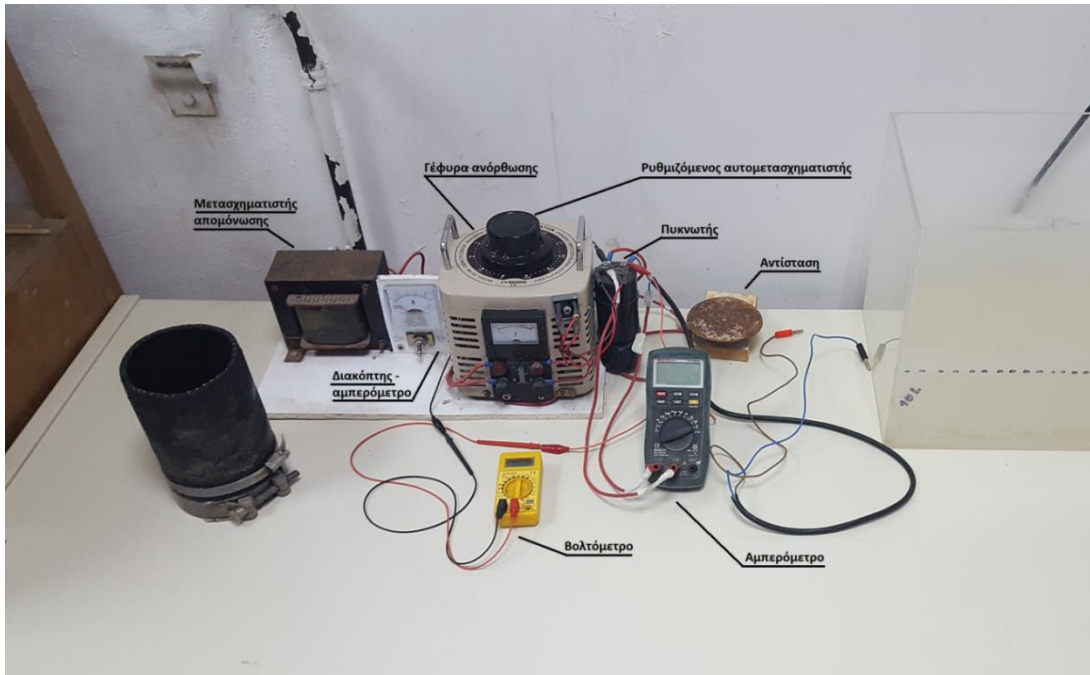
Εικόνα 4.9: Δοκίμια κατά την διάρκεια του πειράματος της τριχοειδούς απορρόφησης

4.6. Συντελεστής διείσδυσης Cl μη σταθερής κατάστασης (NT BUILD 492)

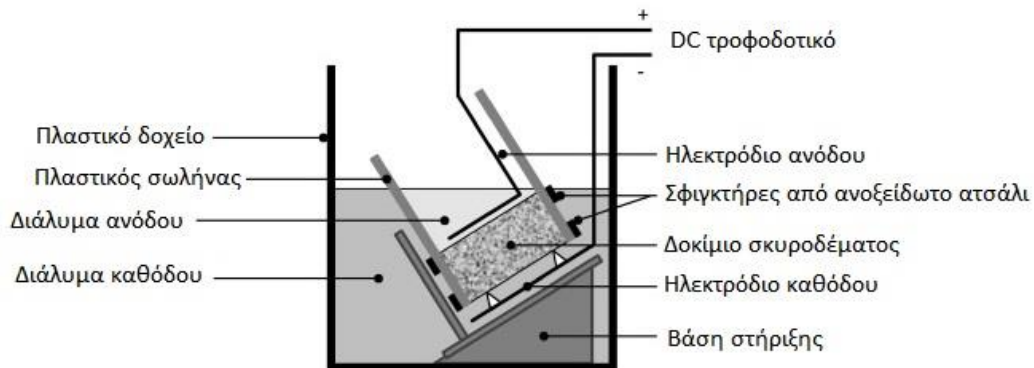
Στο πλαίσιο του πειράματος αυτού προσδιορίστηκε ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient), D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m^2/s), σύμφωνα με την πρότυπη επιταχυνόμενη μέθοδο NordTest Build 492 (1999). Η διαδικασία διεξαγωγής της δοκιμής για τον προσδιορισμό του συντελεστή, περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια της ενότητας αυτής.

Στη φάση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν 2 κυλινδρικά δοκίμια $\Phi 100$ ύψους 50 mm. Για την εκτίμηση της ικανότητας του σκυροδέματος να ανθίσταται στα χλωριόντα επιλέχθηκε η επιταχυνόμενη δοκιμή NordTest Build 492 (1999). Αρχικά, πραγματοποιήθηκε συντήρηση των δοκιμίων σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου ($Ca(OH)_2$), εικοσιτέσσερις ώρες πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής της κάθε σύνθεσης. Σε αυτή τη δοκιμή, ο προσδιορισμός του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων (chloride migration coefficient), επιτυγχάνεται με την εξαναγκασμένη

επιταχυνόμενη κίνηση των χλωριόντων, διαμέσου κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος και μέσω κατάλληλης διάταξης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10: Ηλεκτρική διάταξη δοκιμής NordTest Build 492



Εικόνα 4.11: Η διάταξη της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων

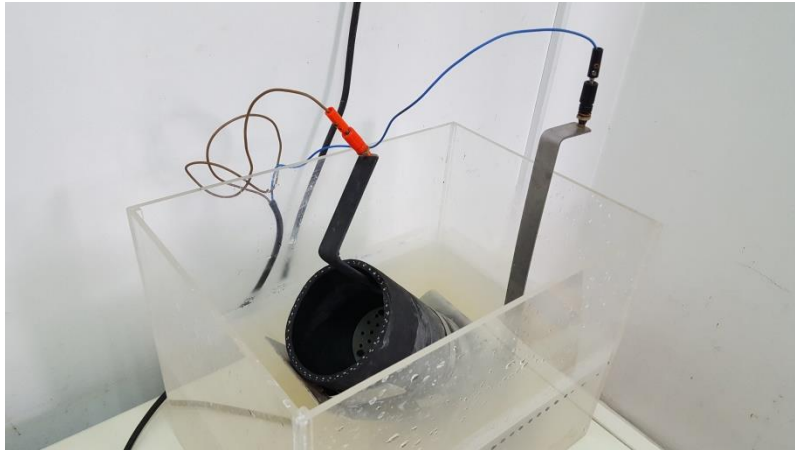
Ένα τμήμα κυλινδρικού δοκιμίου ($D = 100 \text{ mm}$, $L = 50 \text{ mm}$) παραμένει, μέσω κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων, υπό σταθερή διαφορά δυναμικού, από 10 έως 60 V dc (συνηθέστερα μεταξύ 10 και 30 V dc), για χρονική περίοδο από 6 έως 96 ώρες (συνήθως 24 ώρες, όπως έγινε και στην παρούσα εργασία). Η επιλογή της επιβαλλόμενης διαφοράς δυναμικού και της διάρκειας της δοκιμής γίνεται με βάση το αρχικώς διερχόμενο ρεύμα για δοκιμαστική διαφορά δυναμικού ίση με 30 V dc, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2, ενώ η ηλεκτρική διάταξη με κλειστό το ηλεκτρικό κύκλωμα, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.12.

Πίνακας 4.2: Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: NordTest Build 492 (1999)]

Αρχικό ρεύμα από σταθερή διαφορά δυναμικού	Επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού (κατόπιν ρύθμισης) (V)	Πιθανό νέο ρεύμα I_o	Διάρκεια δοκιμής t
30 V dc (mA)		(mA)	(h)
$I_o < 5$	60	$I_o < 10$	96
$5 \leq I_o < 10$	60	$10 \leq I_o < 20$	48
$10 \leq I_o < 15$	60	$20 \leq I_o < 30$	24
$15 \leq I_o < 20$	50	$25 \leq I_o < 35$	24
$20 \leq I_o < 30$	40	$25 \leq I_o < 40$	24
$30 \leq I_o < 40$	35	$35 \leq I_o < 50$	24
$40 \leq I_o < 60$	30	$40 \leq I_o < 60$	24
$60 \leq I_o < 90$	25	$50 \leq I_o < 75$	24
$90 \leq I_o < 120$	20	$50 \leq I_o < 80$	24
$120 \leq I_o < 180$	15	$60 \leq I_o < 90$	24
$180 \leq I_o < 360$	10	$60 \leq I_o < 120$	24
$360 \leq I_o$	10	$120 \leq I_o$	6

Η διαδικασία της δοκιμής βασίζεται στην εφαρμογή διαφοράς δυναμικού στο εσωτερικό του δοκιμίου λόγω της τάσης του συνεχούς ρεύματος. Το δοκίμιο παρατίθεται μεταξύ δύο διαλυμάτων, εκ των οποίων, το διάλυμα καθόδου αποτελείται από 10% κ.β χλωριούχο νάτριο NaCl, ενώ το διάλυμα ανόδου από υδροξείδιο του νατρίου NaOH 0.3 N. Η σταθερή διαφορά

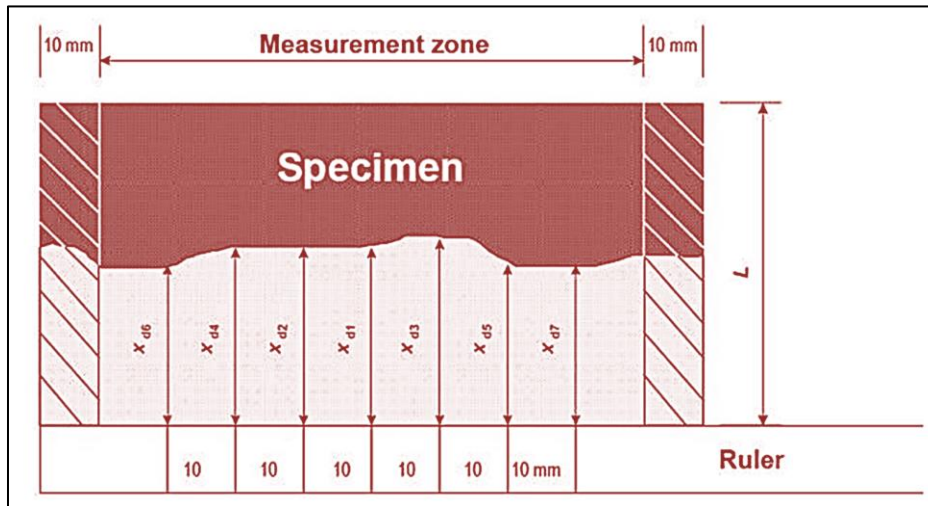
δυναμικού επιβάλλεται συνήθως για διάστημα 24 ωρών. Επίσης, κατά την έναρξη και τη λήξη της δοκιμής καταγράφονται το διερχόμενο ρεύμα, η θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου και η ηλεκτρική αντίσταση του δοκιμίου.



Εικόνα 4.12: Η διάταξη με το ηλεκτρικό κύκλωμα σε λειτουργία

Η μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων γίνεται με τη χρήση της χρωματογραφικής μεθόδου και μέσω αυτής υπολογίζεται ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων (chloride migration coefficient). Για το σκοπό αυτό, το κάθε δοκίμιο υποβάλλεται αρχικά, σε δοκιμή σε διάρρηξη προκειμένου να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός του, περίπου στο μέσον του. Η δοκιμή σε διάρρηξη (Εικόνα 4.13) επιτυγχάνεται με την επιβολή φορτίου στα μέσα δύο απέναντι πλευρών του δοκιμίου. Αφού χωριστεί το δοκίμιο κάθετα στη μέση (Εικόνα 4.14), τα δύο μέρη ψεκάζονται με διάλυμα 0.1M νιτρικού αργύρου AgNO_3 . Στη συνέχεια, μετράται το βάθος διείσδυσης, δηλαδή το ύψος της περιοχής που έχει αλλάξει χρώμα μετά τον ψεκασμό με νιτρικό άργυρο, με τη χρήση χάρακα ξεκινώντας από το κέντρο του δοκιμίου και προχωρώντας προς τα έξω (Εικόνα 4.16). Αυτό γίνεται εφικτό λόγω της παρουσίας χλωριόντων που οδηγεί σε σχηματισμό χλωριούχου αργύρου AgCl μέσω χημικών αντιδράσεων. Η διαδικασία φαίνεται και

στο Σχήμα 4.1, ενώ τα δοκίμια διαφόρων συνθέσεων, μετά τη διάρρηξη και τον ψεκάσμο με AgNO_3 , παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.14 και 4.15.



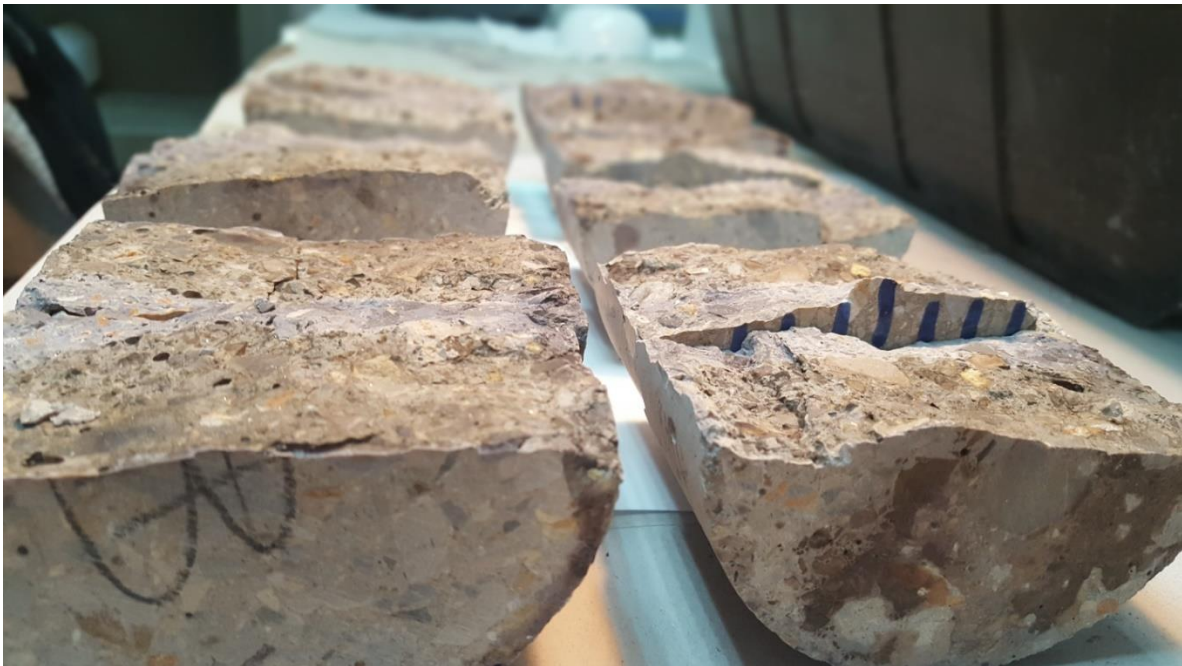
Σχήμα 4.1: Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων



Εικόνα 4.13: Διάρρηξη του δοκιμίου



Εικόνα 4.14: Δοκίμια μετά τη διάρρηξη



Εικόνα 4.15: Δοκίμια μετά τη διάρρηξη και τον ψεκασμό με $AgNO_3$.



Εικόνα 4.16: Μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων

Ο συντελεστής διείσδυσης των χλωριόντων (Chloride Migration Coefficient), λόγω εξαναγκασμένης διείσδυσής τους μέσα στο σκυρόδεμα, υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$D_{nssm} = \frac{RT}{ZFE} * X_d - \frac{a * \sqrt{X_d}}{t} \quad (4.6)$$

$$E = \frac{u - 2}{L} \quad (4.7)$$

$$a = 2 * \sqrt{\frac{RT}{ZFE}} * \text{erf}^{-1} * \frac{1 - 2 * c_d}{c_o} \quad (4.8)$$

όπου:

D_{nssm} : συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων (m^2/s),

Z: απόλυτη τιμή του σθένους ιόντων, για χλωριόντα, $z = 1$,

F: σταθερά του Faraday, $F = 9.648 * 10^4 \text{ J / (V, mol)}$,

U: απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V),

R: παγκόσμια σταθερά αερίων, $R = 8.314 \text{ J / (V , mol)}$,

T: η μέση τιμή της αρχική και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου ($^{\circ}\text{C}$),

L: το πάχος του δοκιμίου (mm),

x_d : η μέση τιμή των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων (mm),

t: η διάρκεια του πειράματος (hour),

c_d : η συγκέντρωση χλωριόντων στην οποία το χρώμα αλλάζει, $c_d = 0.07 \text{ N}$,

c_o : η συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα καθόδου, $c_o = 2 \text{ N}$,

Στην περίπτωση του σκυροδέματος και ανάλογα με την τιμή του συντελεστή διείσδυσης, γίνεται η κατηγοριοποίηση των δοκιμίων ως προς την αντίστασή τους στη διείσδυση των χλωριόντων, σύμφωνα με τον Tang (1996), στον Πίνακα 4.3 καθώς και με βάση τους Nilson et al (1998), στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διείσδυσης [πηγή: Tang (1996)]

Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12}$	Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων
>16	Ακατάλληλο για επιθετικό περιβάλλον (not suitable for aggressive environment)
8-16	Μέτρια (Moderate)
2-8	Καλή (good)
<2	Πολύ Καλή (very good)

Πίνακας 4.4: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διείσδυσης [πηγή: Nilsson et al (1998)]

Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12}$	Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων
>15	Χαμηλή (Low)
10-15	Μέτρια (Moderate)
5-10	Υψηλή (High)
2.5-5	Πολύ Υψηλή (Very High)
<2.5	Εξαιρετικά Υψηλή (Extremely High)

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Θλιπτική αντοχή

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται συγκριτικά η μέση θλιπτική αντοχή σε MPa και η τυπική απόκλιση 3 μετρήσεων για κάθε σύνθεση, σε κάθε ηλικία (28 και 90 ημέρες).

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) αντοχής θλίψης 28 και 90 ημερών, κυβικών δοκιμών.

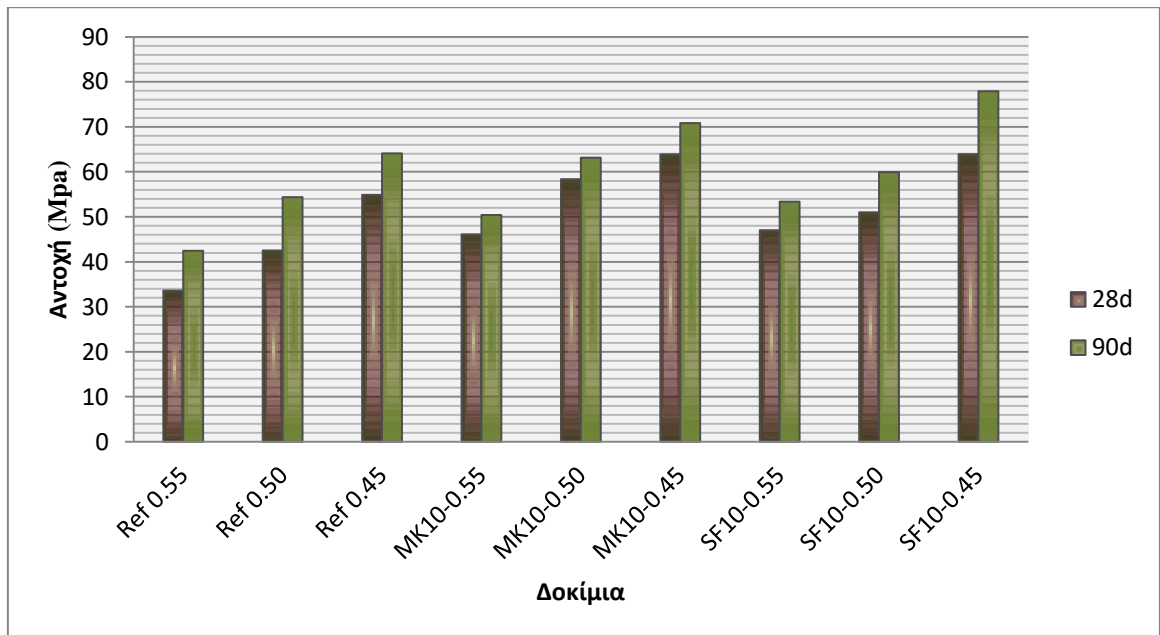
Σύνθεση	Θλιπτική Αντοχή 28 ημερών (MPa)		Θλιπτική Αντοχή 90 ημερών (MPa)	
	Μέση τιμή	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική Απόκλιση
Ref 0.55	33.61	0.42	42.45	0.31
Ref 0.50	42.52	0.61	54.37	4.67
Ref 0.45	54.88	0.63	64.10	1.63
MK10-0.55	46.10	0.59	50.40	0.83
MK10-0.50	58.36	2.31	63.14	1.21
MK10-0.45	63.89	1.06	70.83	1.64
SF10-0.55	47.02	1.06	53.37	2.16
SF10-0.50	51.00	2.12	59.91	2.01
SF10-0.45	63.92	0.27	77.90	4.27

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, αλλά και από τα διαγράμματα του Σχήματος 5.1, η θλιπτική αντοχή αυξάνεται σημαντικά με την προσθήκη τσιμεντοειδών. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής καταγράφηκε στις συνθέσεις MK10-0.45 και SF10-0.45 που σημείωσαν παραπλήσιες τιμές αντοχής, ξεπερνώντας τα 63 MPa. Ακολούθησε η σύνθεση MK10-0.50 με 58.36 MPa. Συγκεκριμένα, για τις συνθέσεις MK10-0.45 και SF10-0.45 καταγράφηκε αύξηση της τάξης του 16%, σε σχέση με την αμιγή σύνθεση Ref 0.45. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση παρατηρήθηκε για τις συνθέσεις MK10-0.55 και

MK10-0.50 ίση με 37% και για τη σύνθεση SF10-0.55 ίση με 40%, σε σχέση με τις αμιγείς συνθέσεις Ref 0.55 και Ref 0.50.

Η θλιπτική αντοχή για ηλικία σκυροδέματος 90 ημερών παρουσίασε ακόμα υψηλότερες τιμές. Η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής καταγράφηκε για τη σύνθεση SF10-0.45 με αντοχή τα 77.91 MPa και ακολούθησε η MK10-0.45 με τιμή 70.83 MPa. Οι ποσοστιαίες αυξήσεις της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με τις αμιγείς συνθέσεις διαμορφώθηκαν αναλογικά με τις αυξήσεις του σκυροδέματος των 28 ημερών, αλλά διακυμάνθηκαν σε χαμηλότερα επίπεδα. Συγκεκριμένα, για τη σύνθεση SF10-0.45 καταγράφηκε η αύξηση της τάξης του 21%, σε σχέση με την αμιγή σύνθεση Ref 0.45, ενώ μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση παρατηρήθηκε για τη σύνθεση SF10-0.55 ίση με 25%, σε σχέση με την αμιγή σύνθεση Ref 0.55.

Επίσης, να σημειωθεί για τις πρώτες 3 συνθέσεις, Ref 0.55, Ref 0.50 και Ref 0.45, τόσο των 28 ημερών όσο και των 90 ημερών με την μείωση του λόγου νερού προς τσιμέντου αυξήθηκε εντυπωσιακά η αντοχή τους σχεδόν 63% και 51% αντίστοιχα. Τέλος, η τυπική απόκλιση που καταγράφεται για κάποια δείγματα είναι μεγάλη κυρίως στις 90 ημέρες.



Σχήμα 5.1: Μέση θλιπτική αντοχή (MPa), για κάθε σύνθεση

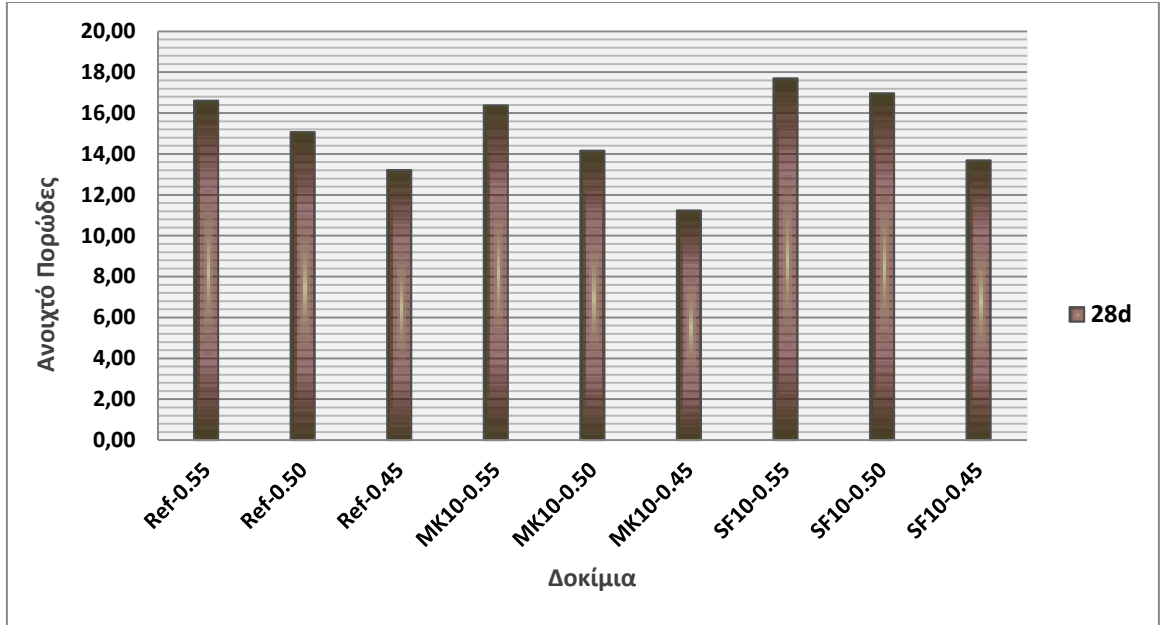
5.2. Ανοικτό πορώδες

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι ζυγίσεις που πραγματοποιήθηκαν για όλα τα δοκίμια σε ξηρή, κορεσμένη και υπό άνωση κατάσταση. Στην προτελευταία στήλη του πίνακα έχει υπολογιστεί το ανοικτό πορώδες, σύμφωνα με τη σχέση (4.5) και στην τελευταία η % μεταβολή του ως προς το αμιγές σκυρόδεμα.

Πίνακας 5.2: Μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμής ανοικτού πορώδους

Σύνθεση	Μέτρηση Βάρους ξηρών δοκιμίων (gr)	Μέτρηση Βάρους κορεσμένων δοκιμίων (gr)	Μέτρηση Βάρους δοκιμίων υπό άνωση (gr)	Ανοικτό Πορώδες OP (%)	Μεταβολή ως προς αμιγές Σκυρόδεμα (%) για κάθε λόγο N/T
Ref-0.55	481.80	517.74	301.42	16.61	-
Ref-0.50	410.49	437.68	257.34	15.07	-
Ref-0.45	365.20	385.97	228.69	13.21	-
MK10-0.55	413.10	443.76	256.70	16.38	-1.38
SF10-0.55	465.11	502.83	289.74	17.70	6.56
MK10-0.50	481.03	504.20	314.02	14.16	-6.04
SF10-0.50	458.58	493.81	286.17	16.97	12.61
MK10-0.45	446.23	473.57	280.63	11.24	-14.91
SF10-0.45	467.16	494.78	293.06	13.69	3.63

Στο διάγραμμα του ανοικτού πορώδους, σχήμα 5.2, διαφαίνεται η πτωτική τάση για όλες τις συνθέσεις όσο μικραίνει ο λόγος N/T, λαμβάνοντας διαφορά της τάξεως 26% 46% και 30% αντιστοίχως για κάθε είδος σύνθεσης. Συγκριτικά με το αμιγές σκυρόδεμα, η μεγαλύτερη μείωση ανοικτού πορώδους που καταγράφηκε ήταν κατά 15%, για προσθήκη μετακαολίνη 10% κατά βάρος τσιμέντου (MK10) και λόγο N/T 0.45.



Σχήμα 5.2: Ανοιχτό πορώδες OP (%), για κάθε σύνθεση.

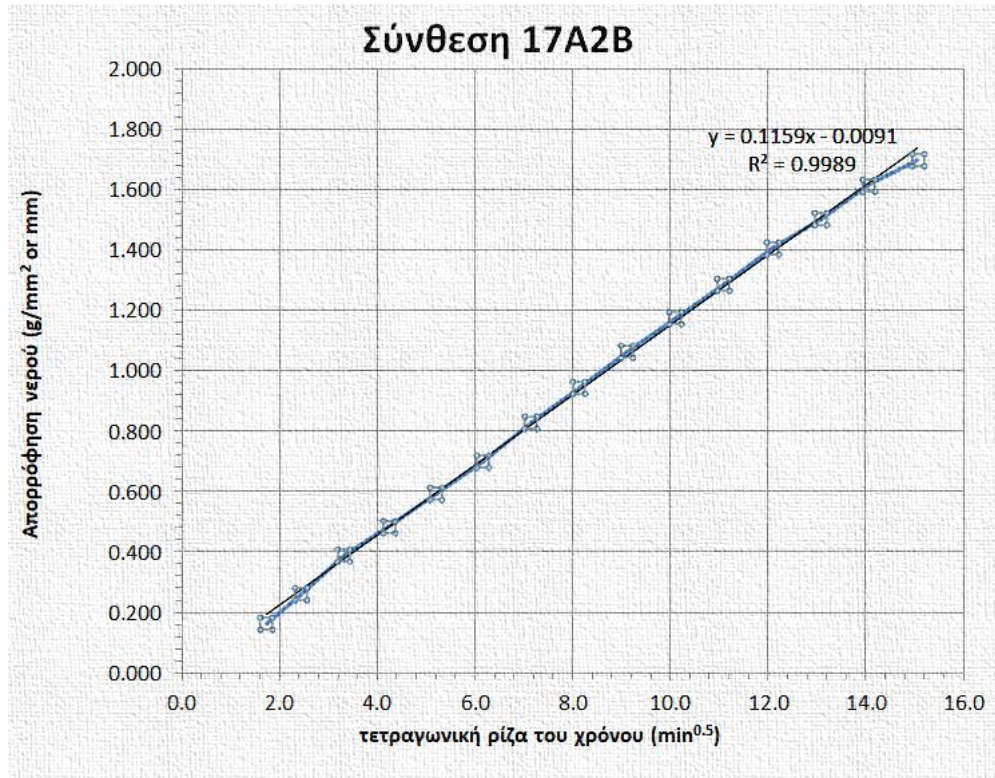
5.3. Τριχοειδής απορρόφηση

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3, στις στήλες παρουσιάζονται οι μέσες τιμές αθροιστικής απορρόφησης του νερού σε χιλιοστά (mm) και στις γραμμές η ανάπτυξη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου T . Η μέση τιμή προκύπτει από τα δοκίμια A και B για κάθε σύνθεση από A1 έως A9. Οι τιμές προέκυψαν από τα πειράματα τριχοειδούς απορρόφησης για δοκίμια με ηλικία 28 ημέρες.

Πίνακας 5.3: Πειραματικές μετρήσεις δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης για κάθε σύνθεση

VT	Σ (ΔW/A) / ρ _w (mm)								
	Ref 0.55	Ref 0.50	Ref 0.45	MK10-0.55	SF10-0.55	MK10-0.50	SF10-0.50	MK10-0.45	SF10-0.45
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0.11	0.14	0.06	0.16	0.11	0.09	0.13	0.08	0.10
2	0.25	0.23	0.11	0.24	0.18	0.15	0.18	0.13	0.13
3	0.37	0.34	0.18	0.32	0.25	0.21	0.23	0.19	0.17
4	0.50	0.44	0.23	0.41	0.31	0.27	0.29	0.24	0.20
5	0.62	0.54	0.28	0.50	0.38	0.34	0.35	0.29	0.24
6	0.75	0.64	0.34	0.57	0.45	0.41	0.40	0.34	0.27
7	0.87	0.76	0.41	0.69	0.51	0.46	0.45	0.39	0.30
8	1.01	0.86	0.47	0.78	0.57	0.53	0.50	0.44	0.33
9	1.13	0.97	0.52	0.87	0.64	0.60	0.56	0.50	0.36
10	1.26	1.07	0.59	0.96	0.71	0.66	0.61	0.56	0.39
11	1.39	1.18	0.65	1.05	0.76	0.72	0.66	0.62	0.42
12	1.52	1.29	0.71	1.14	0.82	0.79	0.70	0.67	0.44
13	1.64	1.39	0.76	1.23	0.88	0.85	0.76	0.73	0.48
14	1.76	1.50	0.81	1.32	0.95	0.91	0.80	0.79	0.51
15	1.87	1.60	0.87	1.41	1.01	0.98	0.85	0.84	0.54

Το διάγραμμα του Σχήματος 5.3, φαίνεται παρακάτω, είναι της μορφής γραμμικής καμπύλης $y=ax+b$, για $x=\sqrt{t}$, οι γραμμές όπως φαίνονται στον πίνακα 5.3 και $y=\bar{\Sigma}(\Delta W/A)/\rho_w$ (mm), οι στήλες αθροιστικής απορρόφησης του νερού. Ενδεικτικά επιλέχθηκε το δοκίμιο της σύνθεσης 17A2B (Ref 0.50). Από την κλίση της ευθείας προκύπτει η τιμή του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης S . Στο διάγραμμα αυτό, για τη σύνθεση 17A2B, ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης είναι $S = 0.1159 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$. Οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης κυμαίνονται μεταξύ 0.9966 - 0.9994 για όλα τα δοκίμια.



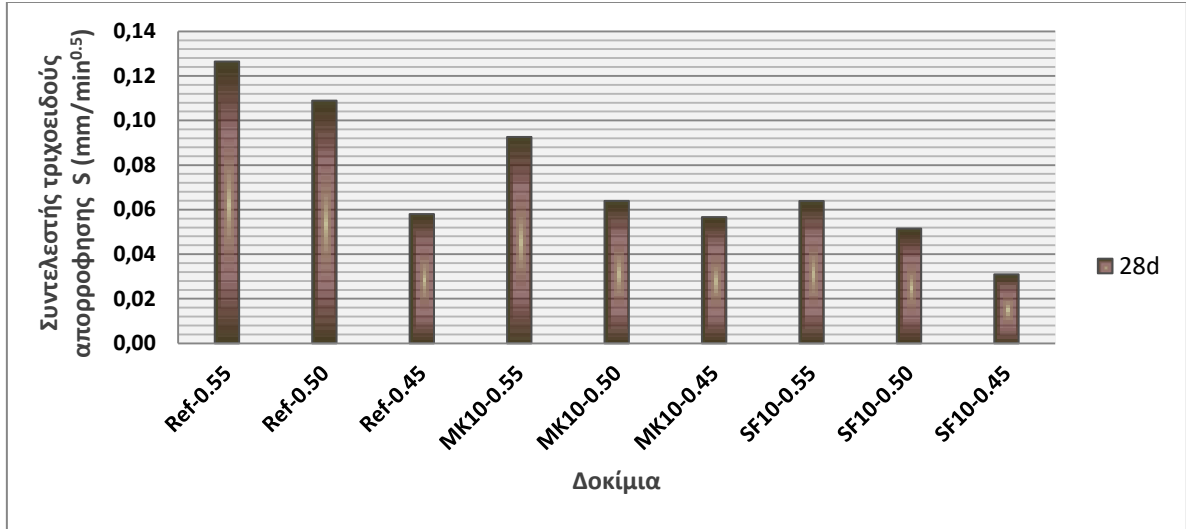
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, για τη σύνθεση 17A2B.

Ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{0.5}), η μεταβολή ως προς το αμιγές Σκυρόδεμα (%) για κάθε λόγο N/T και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης εμφανίζονται στον πίνακα 5.4. Στο σχήμα 5.4 φαίνεται το ραβδωτό διάγραμμα του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης S για 28 ημέρες σε σχέση με τα δοκίμια ανά είδος σύνθεσης.

Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης

Σύνθεση	Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min ^{0.5})	Μεταβολή ως προς αμιγές Σκυρόδεμα (%) για κάθε λόγο Ν/Τ	Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R ²
Ref-0.55	0.13	-	0.99
Ref-0.50	0.11	-	0.99
Ref-0.45	0.06	-	0.99
MK10-0.55	0.09	-26.80	0.99
SF10-0.55	0.06	-49.49	0.99
MK10-0.50	0.06	-47.93	0.99
SF10-0.50	0.06	-41.32	0.99
MK10-0.45	0.05	-11.21	0.99
SF10-0.45	0.03	-46.55	0.99

Εξετάζοντας το σχήμα 5.4 είναι εμφανές ότι το αμιγές σκυρόδεμα έχει τις υψηλότερες τιμές ακολουθώντας ο μετακαολίνη και η πυριτική παιπάλη. Η μέγιστη τιμή ήταν 0.13 mm/min^{0.5} για το Ref 0.55 και η ελάχιστη που σημειώθηκε ήταν 0.03 mm/min^{0.5} για την SF10-0,45. Στο σκυρόδεμα με μετακαολίνη σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα βρέθηκε μειωμένος από 44% έως 20%, ενώ στο σκυρόδεμα με πυριτική παιπάλη καταγράφηκαν ακόμα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης από 53% το μέγιστο έως 50% το ελάχιστο. Άλλος παράγοντας μείωσης είναι ο λόγος Ν/Τ. Ελαττώνοντας την ποσότητα του νερού σε σχέση με το τσιμέντο είχαμε μείωση για την αμιγής σύνθεση 46% και 44%, 51% για μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη.



Σχήμα 5.4: Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{0.5}), ανά είδος σύνθεσης.

5.4. NT BUILD 492

Στους Πίνακες 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται η μέση θερμοκρασία, το μέσο πάχος και η μέση διείδυση των μετρήσεις A και B για όλες τις συνθέσεις των 28 ημερών και των 90 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής χλωριόντων για 28 ημέρες, για κάθε δοκίμιο

Σύνθεση		Μέση θερμο/σία	Μέσο πάχος	Μέση διείσδυση	Μέση Τάση	Μέση θερμο/σία	Μέσο πάχος	Μέση διείσδυση	Μέση Τάση
		°C	mm	mm	Volts	°C	mm	mm	Volts
		ομάδα Α				ομάδα Β			
A1	Ref-0.55	16.70	46.33	29.36	25.00	17.65	49.50	31.50	25.00
A2	Ref-0.50	18.66	47.34	30.29	25.40	16.45	44.40	29.43	25.00
A3	Ref-0.45	17.40	48.83	28.29	25.10	17.25	42.50	29.29	24.90
A4	ΜΚ10-0.55	16.00	45.50	15.57	35.00	17.55	44.33	16.07	35.00
A5	SF10-0.55	14.30	45.00	18.14	40.00	13.50	44.67	18.14	40.00
A6	ΜΚ10-0.50	14.25	46.67	16.93	40.00	14.35	44.83	16.00	40.00
A7	SF10-0.50	14.05	45.17	15.79	40.00	14.90	47.50	15.00	35.00
A8	ΜΚ10-0.45	18.20	49.00	16.00	40.00	17.70	48.83	12.36	35.00
A9	SF10-0.45	16.05	49.10	16.00	20.00	16.60	49.5	13.79	35.00

Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής χλωριόντων για 90 ημέρες, για κάθε δοκίμιο

Σύνθεση		Μέση θερμο/σία	Μέσο πάχος	Μέση διείσδυση	Μέση Τάση	Μέση θερμο/σία	Μέσο πάχος	Μέση διείσδυση	Μέση Τάση
		°C	mm	mm	Volts	°C	mm	mm	Volts
		ομάδα Α				ομάδα Β			
A1	Ref-0.55	16.60	47.67	24.64	30.00	15.80	44.50	25.07	30.00
A2	Ref-0.50	18.05	45.17	24.21	30.00	20.45	43.17	25.00	30.00
A3	Ref-0.45	16.50	47.17	21.71	35.00	17.95	49.00	21.00	30.00
A4	ΜΚ10-0.55	17.03	46.88	10.86	39.80	17.95	47.98	12.00	39.40
A5	SF10-0.55	18.85	47.00	12.43	50.00	18.90	46.83	9.93	40.00
A6	ΜΚ10-0.50	20.05	46.50	9.86	40.00	20.55	47.33	10.14	40.00
A7	SF10-0.50	20.35	45.17	10.14	50.00	19.95	47.50	8.21	40.00
A8	ΜΚ10-0.45	20.45	48.00	11.77	50.20	20.75	46.17	10.07	40.00
A9	SF10-0.45	19.45	46.00	8.56	60.00	18.10	44.33	9.36	40.00

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων 28 και 90 ημερών, για κάθε σύνθεση

Σύνθεση	Συντελεστής Διείσδυσης Χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12}$) 28ημερών	Μεταβολή D_{nssm} ως προς αμιγές σκυρόδεμα (%)	Συντελεστής Διείσδυσης Χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12}$) 90 ημερών	Μεταβολή D_{nssm} ως προς αμιγές σκυρόδεμα (%)
Ref-0.55	15.69	-	10.55	-
Ref-0.50	15.31	-	10.14	-
Ref-0.45	14.75	-	8.71	-
MK10-0.55	5.39	-65.64	3.62	-65.73
SF10-0.55	5.49	-65.03	3.09	-70.71
MK10-0.50	4.58	-70.08	3.09	-69.53
SF10-0.50	5.43	-64.52	2.48	-75.54
MK10-0.45	4.81	-67.41	3.05	-64.98
SF10-0.45	5.20	-64.77	2.22	-68.89

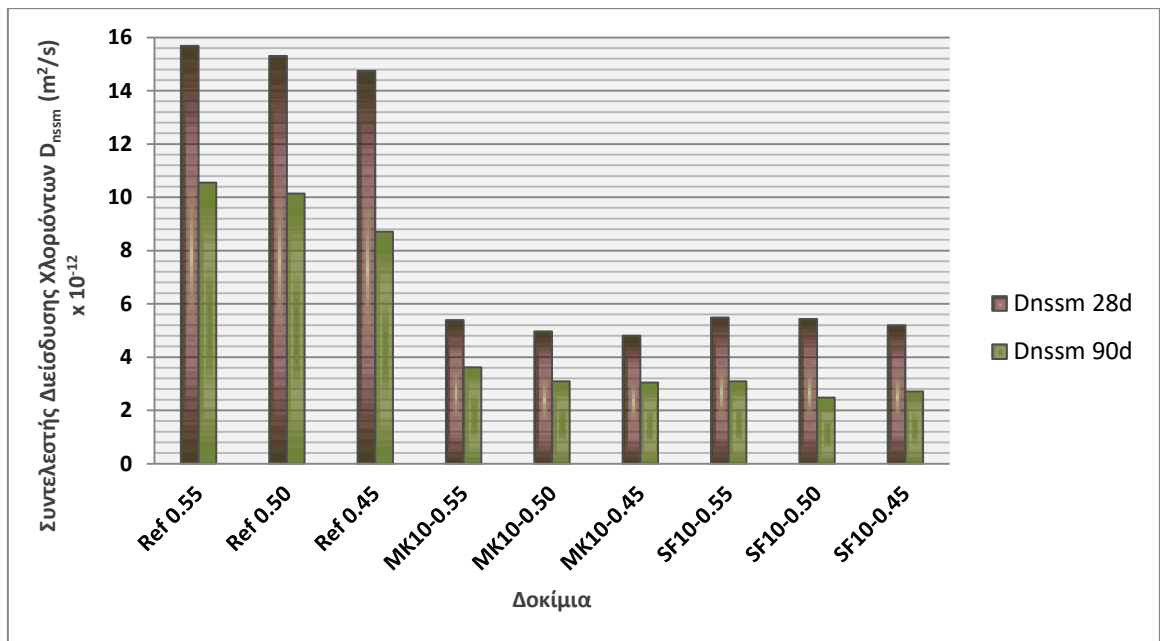
Όπως αναλυτικά ειπώθηκε στο Κεφάλαιο 4.6, ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} υπολογίστηκε κατά το πρότυπο NT BUILD 492. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, ο συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} και η μεταβολή του σε σχέση με την αμιγή σύνθεση σκυρόδεμα, από τις δοκιμές διείσδυσης χλωριόντων για όλες τις συνθέσεις των 28 ημερών και των 90 ημερών.

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 5.5 και 5.6 η υψηλότερη διείσδυση καταγράφηκε για τα δοκίμια Ref 0.55 με διείσδυση 30.43 mm για της 28 ημέρες και για της 90 ημέρες 24.86 mm. Αντίθετα η χαμηλότερη τιμή ήταν για MK-0.45 με τιμή 14.18 mm, με μικρή διαφορά από την σύνθεση SF10-0.45 και SF10-0.50 για 28 ημέρες, ενώ για τις 90 ημέρες το μικρότερο βάθος διείσδυσης καταγράφηκε για SF10-0.45 με τιμή 9.36.

Παρατηρώντας τον πίνακα 5.7, η προσθήκη τσιμεντοειδών στο σκυρόδεμα, επηρεάζει μόνο θετικά την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση των χλωριόντων. Αυτή η άποψη ενισχύεται εξετάζοντας το διάγραμμα στο σχήμα 5.5, στο οποίο διαφαίνεται η πτωτική τάση του συντελεστή με την προσθήκη ποζολανικών υλικών, όπως αναλυτικώς φαίνεται στον πίνακα 5.7, στην τελευταία στήλη μεταβολής του συντελεστή D_{nssm} ως προς το αμιγές σκυρόδεμα. Οι σύνθετες

συνθέσεις έχουν κατακόρυφη μείωση της τάξεως 66% με 76% και την τελευταία τιμή να την αποδίδει η σύνθεση SF10-0.50.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτήν την πειραματική διαδικασία, είναι εφικτή η κατάταξη των συνθέσεων με βάση την αντίστασή τους στη διείσδυση των χλωριόντων, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3 κατά Tang (1996), καθώς και με βάση τον Πίνακα 4.4 κατά Nilson et al (1998) του Κεφαλαίου 4. Έτσι κατά τον πίνακα 4.3, οι περισσότερες συνθέσεις κατατάσσονται στην κατηγορία με καλή αντίσταση (2-8) και μέτρια αντίσταση (8-16) για τις συνθέσεις αναφοράς. Με βάση τον πίνακα 4.4, οι συνθέσεις αναφοράς έχουν εξίσου μέτρια αντίσταση (10-15) και πολύ χαμηλή στις 28 ημέρες. Οι συνθέσεις με τα τσιμεντοειδή πρόσθετα στις 28 ημέρες έχουν υψηλή αντίσταση (5-10) και πολύ υψηλή (2.5-5) για τις ίδιες συνθέσεις των 90 ημερών. Επιπροσθέτως οι τιμές των συνθέσεων SF10-0.50 και SF10-0.45 κυμάνθησαν οριακά στην κατηγορία αντίστασης εξαιρετικά υψηλή (<2.5).



Σχήμα 5.5: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (m^2/s), για κάθε σύνθεση.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτέλεσε η μελέτη των παραμέτρων ανθεκτικότητας σκυροδέματος με τσιμεντοειδή πρόσθετα, όπως ο μετακαολίνη και η πυριτική παιπάλη. Συνολικά, παράχθηκαν εννέα (9) συνθέσεις και συγκεκριμένα, τρεις (3) συνθέσεις αναφοράς με αμιγές σκυρόδεμα, τρεις (3) συνθέσεις με πρόσθετο μετακαολίνη και τρεις (3) συνθέσεις με πρόσθετο πυριτική παιπάλη. Τα τσιμεντοειδή προστέθηκαν σε αναλογία 10% κ.β. τσιμέντου. Από τη μελέτη και την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η θλιπτική αντοχή (f_c) αυξήθηκε σημαντικά σε όλες τις συνθέσεις των 28 και 90 ημερών με την προσθήκη των τσιμεντοειδών. Η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής σημειώθηκε στις 28 ημέρες στη σύνθεση SF10-0.45 και σχεδόν ισοδύναμη απόδοση είχε η σύνθεση MK10-0.45. Όμως, η διαφορά των ίδιων συνθέσεων ήταν μεγαλύτερη για τις 90 ημέρες, με τη σύνθεση SF10-0.45 να καταγράφει 9% αύξηση.
- Μείωση του ανοικτού πορώδους (OP) υπήρξε σε όλες τις συνθέσεις με πρόσθετα τσιμεντοειδή. Παρόλα αυτά, καλύτερη συμπεριφορά παρουσίασαν οι συνθέσεις με συντελεστή $N/T=0.45$. Έτσι, η σύνθεση MK10-0.45 είχε το χαμηλότερο δείκτη ανοικτού πορώδους και ακολούθησαν οι SF10-0.45 και MK10-0.50.
- Ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης (S) επίσης μειώθηκε σημαντικά με την προσθήκη πρόσθετων τσιμεντοειδών στο σκυρόδεμα. Οι συνθέσεις με πρόσθετο παραπροϊόν την πυριτική παιπάλη είχαν την καλύτερη επίδοση και η σύνθεση SF10-0.45 παρουσίασε το μικρότερο συντελεστή.
- Ο συντελεστής διείσδυσης $Cl D_{nssm}$ (m^2/s) επηρεάζεται μόνο θετικά με την προσθήκη τσιμεντοειδών στο σκυρόδεμα. Η αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση των χλωριόντων κατά το πρότυπο NT Build 492 παρουσιάστηκε μεγαλύτερη για τη σύνθεση MK10-0.45 και ακολούθως η σύνθεση SF10-0.45 είχε παραπλήσιες τιμές για διάρκεια ωρίμανσης 28 ημερών. Όμως, για το διάστημα 90 ημερών, η SF10-0.45 φαίνεται να έχει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από την MK10-45, με εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων.

Συνοψίζοντας, με κριτήριο τα πειραματικά αποτελέσματα, επιβεβαιώνεται ότι είναι σημαντικό ο δείκτης N/T να παραμένει μικρότερος ή ίσος με 0.45 ($N/T \leq 0.45$). Φυσικές ποζολάνες και βιομηχανικά παραπροϊόντα όπως είναι ο μετακαολίνης και η πυριτική παιπάλη, αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι της θλίψης και της διείδυσης δραστικών χλωριόντων.

Από την εργασία φαίνεται ότι κατασκευές που εκτίθενται σε έντονα διαβρωτικές συνθήκες όπως π.χ. σε κατηγορίες έκθεσης XS2 και XS3 κατά ΕΛΟΤ EN 206-1, μπορούν να προστατευθούν εξίσου αποτελεσματικά με την χρήση τσιμεντοειδών πρόσθετων, αφού όλες οι τιμές των παραμέτρων ανθεκτικότητας είναι σημαντικά βελτιωμένες. Αυτό δύναται να οδηγήσει σε οικονομικότερο και φιλικότερο προς το περιβάλλον, σχεδιασμό κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δ. Βασιλείου (2014): Επιρροή παραθαλάσσιου περιβάλλοντος στην ανθεκτικότητα μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι Πειραιά, Αθήνα.

Δ. Βούκια (2013): Διαπερατότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με μετακαολίνη, Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Ε. Ι. Μακρινού (2017): Ανθεκτικότητα Κονιαμάτων Με Τσιμεντοειδή Πρόσθετα, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ.

ΕΛΟΤ EN 197-1 (2000): Σύνθεση, Προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα

Θ. Π. Τάσιος (1993): Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος. Αθήνα: Εκδόσεις Φοίβος

Κ. Σιδέρης (2010): Ανθεκτικότητα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Σέλκα - 4Μ.

Μ. Φαρδής (2005): Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος. In Μέρος III. Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.

Τ. Ε. Πραγματογνώμονες (2006): Εκτίμηση της κατάστασης του σιδηρού οπλισμού κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος κατά την ανάληψη του κινδύνου ή μετά από μία ζημιά. ΕΝΗΜ . 4 / ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ / 14.06.2006, Χαλάνδρι, Αθήνα.

Τ.Ε.Ε Ελληνικό τμήμα σκυροδέματος. (1994): 11ο Ελληνικό Συνέδριο σκυροδέματος, Τόμος 1. 18-20 Μαΐου 1994, Κέρκυρα.

<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/58-kaolinitis>. (2016, December 17). <http://www.orykta.gr>

Χ. Μ. Στρατουρά (2015): Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου σκυροδέματος. Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

A. A. A. Hassan, M. Lachemi, K. M.A. Hossain (2012): Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete, Journal of Cement & Concrete Composites, Vol. 34, pp. 801-807. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconcomp

A. Boddy, R. D. Hotton, K. A. Gruber (2001): Long-term testing of the chloride penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin, *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 759-765. Journal homepage: <http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>

A. Mardani-Aghabaglou, G. I. Sezer, K. Ramyar (2014): Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point, *Journal of Construction and Building Materials* , Vol. 70, pp. 17-25. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

A. R. Bagheri and H. Zanganeh (2012): Comparison of Rapid Tests for Evaluation of Chloride Resistance of Concretes with Supplementary Cementitious Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, Issue 9, PP. 1175-1182.

A. Tafraoui, G. Escadeillas, T. Vidal (2016): Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 112, pp. 980-987. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

ACI 222.1. (1996): Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. American Concrete Institute.

ACI 222R. (2010): Provisional Standard Test Method for Water-Soluble Chloride Available for Corrosion of Embedded Steel in Mortar and Concrete Using the Soxhlet Extractor. American Concrete Institute.

ASTM C 642: (1997). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

E. G. Badogiannis, I. P. Sfikas, D. V. Voukia, K. G. Trezos, S. G. Tsivilis (2015): Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 82, pp. 133-141. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

G. Batis, P. Pantazopoulou, S. Tsivilis, E. Badogiannis (2005): The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, *Journal of Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 125-130. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconcomp

H. Abdul Razak, H. K. Chai, H. S. Wong (2004): Near surface characteristics of concrete containing

M. S. Meddah, M. A. Ismail, S. El-Gamal, H. Fitriani (2018): Performances evaluation of binary concrete designed with silica fume and metakaolin, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 166, pp. 400-412. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

M. Shekarchi, A. Bonakdar, M. Bakhshi, A. Mirdamadi, B. Mobasher (2010): Transport properties in metakaolin blended concrete, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2217-2223. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, S. Khani (2013): Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 879-888. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, S. Khani, M. Moradian (2013): In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 46, pp. 63-70. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

supplementary cementing materials, *Journal of Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 883-889. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconcomp

T. Luping (2008): Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete, *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 1092-1097. Journal homepage: <http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>

Z. Li, Z. Ding (2003): Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag, *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 579-584. Journal homepage: <http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

8.1 Τριχοειδής απορρόφηση

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		17A1/A					
Σύνθεση :		REF-0.55 /A					
Ημερομηνία :		14/Dec/17					
W _o (g) :		449,70					
W _o +tape (g) :		451,72					
A/A	T(h)	T(min)	t ^{0.5}	W (gr)	dW (g)	i (mm)	(mm/min) ^{0.5}
1	00:01:00	1	1	452,52	0,80	0,08	0,0800
2	00:04:00	4	2	454,09	2,37	0,237	0,1185
3	00:09:00	9	3	455,35	3,63	0,363	0,1210
4	00:16:00	16	4	456,52	4,80	0,48	0,1200
5	00:25:00	25	5	457,75	6,03	0,603	0,1206
6	00:36:00	36	6	458,97	7,25	0,725	0,1208
7	00:49:00	49	7	460,2	8,48	0,848	0,1211
8	01:04:00	64	8	461,49	9,77	0,977	0,1221
9	01:21:00	81	9	462,53	10,81	1,081	0,1201
10	01:40:00	100	10	463,95	12,23	1,223	0,1223
11	02:01:00	121	11	465,23	13,51	1,351	0,1228
12	02:24:00	144	12	466,4	14,68	1,468	0,1223
13	02:49:00	169	13	467,65	15,93	1,593	0,1225
14	03:16:00	196	14	468,77	17,05	1,705	0,1218
15	03:45:00	225	15	469,84	18,12	1,812	0,1208
16	04:16:00	256	16			0	0,0000
Regression analysis							
R square :							0,9996
S (mm/min ^{0.5}) :							0,1232
S (mm/min ^{0.5}) _{avg} :							0,1185
							TRUE

Σχήμα Π1: Ενδεικτική Τεχνική αναφορά όπως αυτή συμπληρώθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης.

8.2 Διείσδυση Χλωριόντων

ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ			
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	REF0.55A	ΚΩΔΙΚΟΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	TAX_REF0.55A.water.43
ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	water	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ/ΕΣ	ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΓΚΑΜΑΡΑΖΗ
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	30/11/2017		ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ Ε
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	18/10/2017		
ΗΛΙΚΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ημέρες)	43		
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (ώρες)	24		
ΔΙΑΛΥΜΑ ΚΑΘΟΔΟΥ		ΔΙΑΛΥΜΑ ΑΝΟΔΟΥ	
ΝΕΡΟ ΔΙΚΤΥΟΥ (g)	12000,00	ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ (g)	365,00
ΧΛΩΡΙΟΥΧΟ ΝΑΤΡΙΟ NaCl (g)	1333,33	ΥΔΡΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ NaOH (g)	4,84
ΠΟΣΟΣΤΟ NaCl ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ (%)	10,00%	ΠΟΣΟΣΤΟ NaOH ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ (%)	1,31%
ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30,00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0,060		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	30/11/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	1/12/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	16:00	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	16:00
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	25,00	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	24,80
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0,048	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0,064
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	16,0	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	17,4
ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ		<p>Τομή Δοκιμίου: Διείσδυση Χλωριόντων</p>	
ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	100,00	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ (h)	24,00
ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗΣ (mm)	46,50 46,50 46,00	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	16,70
ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	46,33	ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (mm)	29,36
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (kN)	24,27	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (m ² /s)	15,25E-12
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ (MPa)	3,33		
Xd1 (mm)	#### ## 29,50		
Xd2 (mm)	#### ## 29,50		
Xd3 (mm)	#### ## 28,00		
Xd4 (mm)	#### ## 30,00		
Xd5 (mm)	#### ## 27,50		
Xd6 (mm)	#### ## 31,00		
Xd7 (mm)	#### ## 30,00		
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:			

Σχήμα Π2: Ενδεικτική τεχνική αναφορά όπως αυτή συμπληρώθηκε κατά την διεξαγωγή διείσδυσης χλωριόντων.

Για περαιτέρω ακρίβεια, σε δοκίμια τα οποία ήταν δυσδιάκριτα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό imageJ.



Σχήμα Π3: Ενδεικτική εικόνα από το πρόγραμμα ImageJ