



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**

**ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

**ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΑ  
ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ ΚΑΙ ΠΥΡΙΤΙΚΗΣ ΠΑΙΠΑΛΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΟΥ**

**Κωνσταντίνου Νικόλαου Σταθακόπουλου**

**Επιβλέπων:**

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

**Αθήνα, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2023**

## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Σκυρόδεμα .....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Τσιμέντο.....	1
1.3 Πρόσμικτα.....	4
1.4 Αδρανή.....	5
1.4.1. Εισαγωγή.....	5
1.4.2. Κανονικού Βάρους .....	6
1.4.3. Ελαφρά Αδρανή .....	6
1.5 Τσιμεντοειδή Πρόσθετα Σκυροδέματος .....	7
1.5.1. Εισαγωγή.....	7
1.5.2. Μετακαολίνης (Metakaolin) .....	8
1.5.3. Πυριτική Παυτάλη (Silica Fume) .....	9
Κεφάλαιο 2: Ανθεκτικότητα .....	12
2.1 Εισαγωγή .....	12
2.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	13
2.3 Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον .....	14
2.4 Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων .....	16
2.5 Τριχοειδής απορρόφηση .....	16
2.6 Υδατοπερατότητα .....	16
2.7 Μηχανισμός διείσδυσης (migration).....	18
2.8 Μηχανισμός διάχυσης (diffusion) .....	18
2.9 Διείσδυση χλωριόντων.....	19
Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	22
3.1 Εισαγωγή .....	22
3.2 Τρέχουσα Ερευνητική Δραστηριότητα.....	22

3.2.1.	Κίσηρης .....	22
3.2.2.	Πυριτική Παιπάλη .....	23
3.2.3.	Μετακαολίνης.....	26
Κεφάλαιο 4: Πειραματικό Μέρος .....		28
4.1	Εισαγωγή .....	28
4.2	Υλικά και συνθέσεις δοκιμών .....	28
4.3	Μέτρηση θλιπτικής αντοχής.....	30
4.4	Ανοιχτό Πορώδες.....	32
4.5	Τριχοειδής απορρόφηση .....	33
4.6	Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης.....	34
Κεφάλαιο 5: Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....		44
5.1	Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος .....	44
5.2	Θλιπτική αντοχή.....	46
5.3	Ανοιχτό πορώδες.....	48
5.4	Τριχοειδής απορρόφηση .....	51
5.5	Διείσδυση χλωριόντων.....	53
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα .....		58
Κεφάλαιο 7: Προτάσεις Μετεξέλιξης της Ερευνητικής Εργασίας .....		60
Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία .....		61
Κεφάλαιο 9: Παράρτημα.....		65
9.1	Τριχοειδής απορρόφηση .....	65
9.2	Διείσδυση χλωριόντων.....	74

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού εξαιτίας των χλωριόντων .....	20
Σχήμα 3.1: Αντοχή στις 28 ημέρες (Hesam Madani et al (2018)) .....	24
Σχήμα 3.2: Αντοχή στις 90 ημέρες (Hesam Madani et al (2018)) .....	25
Σχήμα 3.3: Διείσδυση χλωριόντων (Hesam Madani et al (2018)) .....	25
Σχήμα 3.4: Επίδραση του μετακαολίνη στην διάβρωση του ελαφρού σκυροδέματος (Kim Hung Mo et al (2017)) .....	27
Σχήμα 5.1: Πυκνότητα δοκιμίων μετά από 28 και 90 ημέρες .....	45
Σχήμα 5.2: Θλιπτική αντοχή 28 και 90 ημερών .....	47
Σχήμα 5.3: Συγκριτικό Διάγραμμα Πορώδους 28, 90 και 215 ημερών .....	50
Σχήμα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα τριχοειδούς απορρόφησης.....	52
Σχήμα 5.5: Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων σε διάστημα 28, 90 και 215 ημερών .....	56
Σχήμα 9.1: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu .....	65
Σχήμα 9.2: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu MK10.....	66
Σχήμα 9.3: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu SF10.....	67
Σχήμα 9.4: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu MK20.....	68
Σχήμα 9.5: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu SF20.....	69
Σχήμα 9.6: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu .....	70
Σχήμα 9.7: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu MK10.....	71
Σχήμα 9.8: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu SF10.....	72
Σχήμα 9.9: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu MK20.....	73
Σχήμα 9.10: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu SF20.....	74

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Φυσικά χαρακτηριστικά και χημική ανάλυση συστατικών τσιμέντου [Πηγή: <i>Holland, Terence C. (2005); Kosmatka, S.; Kerkhoff, B.; Panerese, W. (2002); Gamble, William</i> ] .....	2
Πίνακας 1.2: Βασικοί τύποι τσιμέντου .....	3
Πίνακας 1.3: Κατηγορίες Αντοχής Τσιμέντου .....	3
Πίνακας 1.4: Κατάταξη αδρανών με κριτήριο το μέγεθος του κόκκου .....	6
Πίνακας 2.1: Οριακές τιμές σύνθεσης σκυροδέματος και επικάλυψης για ανθεκτικότητα.....	13
Πίνακας 4.1: Συνθέσεις σκυροδέματος με σταθερό λόγο N/T = 0,40.....	30
Πίνακας 4.2: Διάρκεια δοκιμής και διαφορά δυναμικού (πηγή: Nordtest Build 492 (1999)) .....	37
Πίνακας 4.3: Κατηγοριοποίηση του σκυροδέματος ως προς την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων, με κριτήριο την τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής διείσδυσης.....	41
Πίνακας 5.1: Πυκνότητα των συνθέσεων σε ηλικία 28 και 90 ημερών .....	44
Πίνακας 5.2: Θλιπτικές αντοχές των συνθέσεων σε ηλικία 28 και 90 ημερών.....	46
Πίνακας 5.3: Εξέλιξη τιμών ανοικτού πορώδους (μέση τιμή και συντελεστής διακύμανσης) 28, 90 και 215 ημερών.....	49
Πίνακας 5.4: Συγκριτικός πίνακας τιμών συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης και συντελεστή διακύμανσης των τιμών.....	52
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα του συντελεστή διείσδυσης σε διάστημα 28, 90 και 215 ημερών .....	54
Πίνακας 5.6: Κατάταξη ανθεκτικότητας των συνθέσεων .....	55
Πίνακας 9.1: Πρώτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών	75
Πίνακας 9.2: Δεύτερο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών .....	75
Πίνακας 9.3: Τρίτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών ..	76
Πίνακας 9.4: Τέταρτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών .....	76
Πίνακας 9.5: Πέμπτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών .....	77
Πίνακας 9.6: Πρώτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών	77

Πίνακας 9.7: Δεύτερο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών .....	78
Πίνακας 9.8: Τρίτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών ..	78
Πίνακας 9.9: Τέταρτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών .....	79
Πίνακας 9.10: Πέμπτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών .....	79
Πίνακας 9.11: Πρώτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών .....	80
Πίνακας 9.12: Δεύτερο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών .....	80
Πίνακας 9.13: Τρίτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών .....	81
Πίνακας 9.14: Τέταρτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών .....	81
Πίνακας 9.15: Πέμπτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών .....	82

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Μετακαολίνης.....	8
Εικόνα 1.2: Πυριτική Παιπάλη.....	10
Εικόνα 2.1: Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	14
Εικόνα 2.2: Συντελεστής διάχυσης συναρτήσει του λόγου νερού-τσιμέντου και της θερμοκρασίας °C.....	19
Εικόνα 4.1: Διαδικασία θραύσης του δοκιμίου με σκοπό τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής $f_c$ .....	31
Εικόνα 4.2: Δοκίμια κατά τη διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης.....	34
Εικόνα 4.3: Ηλεκτρική διάταξη δοκιμής NT 492.....	35
Εικόνα 4.4: Διάταξη της δοκιμής NT 492.....	35
Εικόνα 4.5: Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.....	38
Εικόνα 4.6: Θραύση δοκιμίου σε διάρρηξη.....	39
Εικόνα 4.7: Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση του ψεκασμού με διάλυμα νιτρικού αργύρου.....	39
Εικόνα 4.8: Δοκίμια με αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων extremely high.....	42
Εικόνα 4.9: Δοκίμια με αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων high.....	43

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας έρευνας αποτελεί η διερεύνηση της αντοχής, και κυρίως της ανθεκτικότητας, ελαφρών σκυροδεμάτων που χρησιμοποιούν την κίσηρη ως αδρανές. Παράλληλα, επιδιώκεται ο προσδιορισμός της επίδρασης που επιφέρει η αντικατάσταση του τσιμέντου από τον μετακαολίνη και την πυριτική παιπάλη στις ιδιότητες του σκυροδέματος.

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας παρασκευάστηκαν δέκα διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος, οι οποίες διαφοροποιούνταν από το ποσοστό προσθέτων που περιείχαν, καθώς και την παρουσία ή όχι ασβεστολιθικών αδρανών. Οι συνθέσεις αυτές υποβλήθηκαν σε πληθώρα πειραματικών δοκιμών οι οποίες εκπονήθηκαν σε τρία διαφορετικά στάδια ωρίμανσης των σκυροδετήσεων, είκοσι οκτώ (28), ενενήντα (90) και διακοσίων δέκα πέντε (215) ημερών αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή έγινε με στόχο τον προσδιορισμό της επίδρασης του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή και την ανθεκτικότητα τους.

Για την ακρίβεια, τα δοκίμια υπέστησαν δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, έτσι ώστε να υπολογιστεί η θλιπτική τους αντοχή, ενώ διαδοχικά η ανθεκτικότητα αξιολογήθηκε στη βάση τριών διαφορετικών παραμέτρων. Αυτοί είναι το ανοιχτό πορώδες, ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης και ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης, ο οποίος υπολογίστηκε με τη μέθοδο NT 492.

Μετά από την ολοκλήρωση των πειραματικών διαδικασιών, ακολούθησε ενδελεχής μελέτη των συγκριτικών αποτελεσμάτων, με στόχο τον εντοπισμό των συνθέσεων που συνδύαζαν πολύ υψηλή ανθεκτικότητα, καθώς και ικανοποιητική αντοχή. Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν πως οι συνθέσεις που αξιοποιούν την κίσηρη ως αδρανές παρουσίασαν εξαιρετική ανθεκτικότητα. Ταυτόχρονα, η αντικατάσταση τσιμέντου με μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη σε ποσοστά της τάξεως του δέκα και είκοσι τοις εκατό επέφερε εξαιρετική βελτίωση, τόσο στην αντοχή, όσο και στην ανθεκτικότητα των συνθέσεων.



## **Abstract**

The object of this research is the investigation of the strength, and especially the durability, of lightweight concretes that use pumice as aggregate. At the same time, it is sought to determine the effect that the replacement of cement with metakaolin and silica fume has on the properties of concrete.

As part of the experimental process, ten different concrete compositions were produced, which were differentiated by the percentage of additives they contained, as well as the presence or not of limestone aggregates. These compositions were subjected to a multitude of experimental tests which were prepared at three different stages of maturation of the concretes, twenty-eight (28), ninety (90) and two hundred and fifteen (215) days respectively. This process was done with the aim of determining the effect of the ripening time on their strength and durability.

Specifically, the specimens were subjected to a uniaxial compression test in order to calculate their compressive strength, while successively the durability was evaluated based on three different parameters. These are the open porosity, the capillary absorption coefficient, and the unsteady state chloride penetration coefficient, which was calculated using the NT 492 method.

After the completion of the experimental procedures, a thorough study of the comparative results followed, with the aim of identifying the compositions that combined very high durability, as well as satisfactory strength. These results showed that the compositions that utilize pumice as an inert presented excellent durability. At the same time, the replacement of cement with metakaolin and siliceous clay in percentages of the order of ten and twenty percent brought about an extraordinary improvement, both in the strength and in the durability of the compositions.

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν σε αυτή μου την προσπάθεια.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου, Ευστράτιο Μπαδογιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεργασία μας σε όλο αυτό το διάστημα, καθώς και για τη σωστή καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την διδάκτωρ Μαρία Στρατουρά, για τη συνεχή βοήθεια της και υποστήριξη της κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, και ιδιαίτερα την μητέρα μου Έφη, καθώς και τη φίλη μου Κατερίνα, για τη διαρκή βοήθεια και στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

## Κεφάλαιο 1: Σκυρόδεμα

### 1.1 Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από λεπτά και χονδροειδή αδρανή που συνδέονται μαζί με ένα ρευστό τσιμέντο το οποίο σκληραίνει με την πάροδο του χρόνου. Το σύνθετο αυτό υλικό, όμως, δεν αποτελεί πρόσφατη δημιουργία, καθώς οι ρίζες του μπορούν να βρεθούν, σε πιο απλοϊκές βέβαια μορφές, στα βάθη της αρχαιότητας. Συγκεκριμένα, αν και υπάρχουν αναφορές για σκυρόδεμα σε αρχαίες κατασκευές των Μάγια, από παράδειγμα της χρήσης του αποτελούν τα πατώματα από σκυρόδεμα στο αρχαίο παλάτι της Τίρυνθας, που χρονολογείται μεταξύ 1400 και 1200 μ.Χ. Επιπλέον, εκτενή χρήση του σκυροδέματος έκανα οι Ρωμαίοι στα κτήρια τους, ενώ ανακάλυψαν ότι με την προσθήκη ηφαιστειακής στάχτης μπορούσαν να το στήσουν κάτω από το νερό. Από εκείνο το σημείο και μετά, το σκυρόδεμα συνέχισε να αποτελεί βασικό στοιχείο των κατασκευών μέχρι και σήμερα, όπου χαρακτηρίζεται ένα από τα πιο συνήθη κατασκευαστικά υλικά, του οποίου η χρήση παγκοσμίως είναι σχεδόν διπλάσια της χρήσης της ξυλείας, του πλαστικού, του αλουμινίου και του ατσαλιού συνδυαστικά.

Στη σημερινή εποχή ωστόσο, παράγονται πολλές διαφορετικές προσμίξεις του σκυροδέματος, οι οποίες άμεσα επηρεάζουν την αντοχή, την πυκνότητα, αλλά και την ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος. Συνήθως, όμως, η παραγωγή σκυροδέματος προϋποθέτει τη χρήση αδρανών, αλλά και ενός συνδετικού υλικού, συνήθως τσιμέντου. Παράλληλα, απαραίτητο είναι το νερό, ενώ συχνά χρησιμοποιούνται πρόσθετα και πρόσμικτα, τα οποία επηρεάζουν άμεσα τις ιδιότητες του σκυροδέματος.

### 1.2 Τσιμέντο

Το τσιμέντο αποτελεί ένα συνδετικό υλικό, το οποίο σκληραίνει και προσκολλάται σε άλλα υλικά προκειμένου να τα συνδέσει. Το τσιμέντο διακρίνεται σε μη υδραυλικό, το οποίο δεν εφαρμόζεται σε υγρές συνθήκες, αλλά σε ξηρές αντιδρώντας με το διοξείδιο του άνθρακα στον αέρα, και στο πιο σύνηθες υδραυλικό. Το υδραυλικό τσιμέντο προκαλεί χημική αντίδραση με το νερό, παράγοντας προϊόντα με χαρακτηριστικά σκλήρυνσης και πήξης, τα οποία αποτελούν την συνδετική ουσία των αδρανών στην παραγωγή του σκυροδέματος.

Το τσιμέντο παράγεται χρησιμοποιώντας ως βασικά συστατικά τον ασβεστόλιθο και την άργιλο. Αυτά, αφού ψηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, σχηματίζουν μια πετρώδη ουσία, το κλίνκερ. Αυτό, μετά την απαραίτητη άλεση για την επίτευξη της επιθυμητής κοκκομετρίας, και την προσθήκη γύψου για να ελέγχεται η πήξη, παράγεται το τελικό προϊόν, το τσιμέντο Πόρτλαντ. Αυτό έχει χρησιμοποιηθεί και στη συγκεκριμένη έρευνα, και συγκεκριμένα κατηγορίας CEM I 42.5.

Η παραγωγή τσιμέντου, ωστόσο, διαφοροποιείται από χώρα σε χώρα, καθώς εξαρτάται άμεσα από τα υλικά που είναι σε κάθε περιοχή διαθέσιμα. Τα πιο συνήθη συστατικά παραγωγής τσιμέντου αναγράφονται στον πίνακα 1.1.

**Πίνακας 1.1: Φυσικά χαρακτηριστικά και χημική ανάλυση συστατικών τσιμέντου [Πηγή: *Holland, Terence C. (2005); Kosmatka, S.; Kerkhoff, B.; Panerese, W. (2002); Gamble, William*]**

Property	Portland cement	Siliceous <sup>[b]</sup> fly ash	Calcareous <sup>[c]</sup> fly ash	Slag cement	Silica fume	
Content (%)	SiO <sub>2</sub>	21.9	52	35	35	85–97
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.9	23	18	12	—
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	11	6	1	—
	CaO	63	5	21	40	< 1
	MgO	2.5	—	—	—	—
	SO <sub>3</sub>	1.7	—	—	—	—
Specific surface <sup>[d]</sup> (m <sup>2</sup> /kg)	370	420	420	400	15,000–30,000	
Specific gravity	3.15	2.38	2.65	2.94	2.22	
General use in concrete	Primary binder	Cement replacement	Cement replacement	Cement replacement	Property enhancer	
<p>a. ^ Values shown are approximate: those of a specific material may vary.</p> <p>b. ^ ASTM C618 Class F</p> <p>c. ^ ASTM C618 Class C</p> <p>d. ^ Specific surface measurements for silica fume by nitrogen adsorption (BET) method, others by air permeability method (Blaine).</p>						

Ταυτόχρονα, το τσιμέντο διακρίνεται σε βασικά είδη. Στην Ελλάδα αυτά καθορίζονται με βάση το πρότυπο EN 197-1, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 1.2:

Πίνακας 1.2: Βασικοί τύποι τσιμέντου

ΤΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CWV V	Σύνθετο Τσιμέντο

Ακόμα, το τσιμέντο κατηγοριοποιείται και με κριτήριο την αντοχή. Οι βασικές κατηγορίες είναι τρεις: 32.5, 42.5 και 52.5, αριθμοί που αντιστοιχούν στην χαρακτηριστική αντοχή του σε θλίψη. Επιπρόσθετα, διακρίνονται δύο υποκατηγορίες με κριτήριο τον ρυθμό ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών. Τσιμέντα με κανονικό ρυθμό συμβολίζονται με N, ενώ αυτά με ταχύ ρυθμό συμβολίζονται με R. Οι κατηγορίες αυτές διακρίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 1.3:

Πίνακας 1.3: Κατηγορίες Αντοχής Τσιμέντου

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή σε θλίψη (Μρα)				Αρχικός χρόνος πήξης (min)	Διαστολή (mm)
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή			
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες			
32.5 N	-	≥16	≥32.5	≤52.5	≥75	≤10
32.5 R	≥10	-				
42.5 N	≥10	-	≥42.5	≤62.5	≥60	
42.5 R	≥20	-				
52.5 N	≥20	-	≥52.5	-	≥45	
52.5 R	≥30	-				

### 1.3 Πρόσμικτα

Στην παραγωγή του σκυροδέματος, συχνά γίνεται χρήση προσμίκτων, τα οποία έχουν ως στόχο την τροποποίηση των ιδιοτήτων του. Συγκεκριμένα, κατά την παραγωγή του σκυροδέματος, πρόσμικτα είναι εκείνα που συμβάλουν σε μικρά ποσοστά, συνήθως λιγότερο του 5% και είναι τις περισσότερες φορές επιβραδυντές ή επιταχυντές. Τα συνηθέστερα πρόσθετα είναι τα εξής:

- **Επιταχυντές.** Επιταχύνουν την ενυδάτωση και συνεπώς την σκλήρυνση του σκυροδέματος. Συνήθως αποτελούνται από χλωριούχο ασβέστιο, νιτρικό ασβέστιο, ή νιτρικό νάτριο, αλλά καθώς τα χλωριόντα συχνά οδηγούν σε διάβρωση του χάλυβα απαγορεύονται σε ορισμένες χώρες και αποφεύγονται. Έτσι προτιμούνται τα νιτρικά άλατα, παρά την μειωμένη αποτελεσματικότητά τους. Οι επιταχυντές συχνά χρησιμοποιούνται σε περιοχές με κρύο καιρό.
- **Επιβραδυντές.** Επιβραδύνουν την ενυδάτωση του σκυροδέματος και χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλες ή δύσκολες εκχύσεις. Τυπικοί επιβραδυντές είναι τα σάκχαρα, η σακχαρόζη και η γλυκόζη.
- **Ρευστοποιητές.** Αυξάνουν την λειτουργικότητα του σκυροδέματος, επιτρέποντας του να τοποθετείται πιο εύκολα. Παράλληλα, επιτρέπουν τη μείωση του συνολικού νερού του σκυροδέματος, διατηρώντας ταυτόχρονα την λειτουργικότητα του, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας.
- **Υπερρευστοποιητές (Superplasticizers).** Ονομάζονται και μειωτές νερού υψηλής κατηγορίας και είναι ένα είδος ρευστοποιητών με λιγότερο επιβλαβή αποτελέσματα που αυξάνουν περισσότερο την εργασιμότητα, αλλά και την αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη. Συγκεκριμένα, μειώνουν το ποσοστό του νερού κατά 15-30%, ενώ την ίδια στιγμή οδηγούν σε επιβραδυντικά αποτελέσματα
- **Παράγοντες παγίδευσης του αέρα.** Προσθέτουν και παρασύρουν μικρές φυσαλίδες αέρα μέσα στο σκυροδέμα, μειώνοντας τις ζημιές που συμβαίνουν στους κύκλους ψύξης-απόψυξης, οδηγώντας σε έτσι σε αύξηση της ανθεκτικότητας. Ωστόσο, με αυτό τον τρόπο μειώνεται η συνολική αντοχή, αφού κάθε 1% αέρα στο σκυροδέμα προκαλεί ως και 5% μείωση της αντοχής.
- **Συνδετικοί παράγοντες.** Χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία δεσμού μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος.
- **Αναστολείς διάβρωσης.** Χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της διάβρωσης του χάλυβα.

## 1.4 Αδρανή

### 1.4.1. Εισαγωγή

Ένα ακόμα απαραίτητο υλικό για την παραγωγή του σκυροδέματος είναι τα λεπτά και χονδροειδή αδρανή. Τα κοκκώδη αυτά υλικά αποτελούν την πλειοψηφία του μείγματος του σκυροδέματος και η διαβάθμιση τους σε διαφορετικά μεγέθη είναι αυτή που καθορίζει πόσο συνδετικό υλικό, συνήθως τσιμέντο, απαιτείται. Συγκεκριμένα, η διακύμανση των μεγεθών των αδρανών κρίνεται απαραίτητη, καθώς μειώνει τα κενά στο σκυρόδεμα, αλλά και την απαραίτητη ποσότητα τσιμέντου, μειώνοντας άρα και το συνολικό κόστος παραγωγής. Ταυτόχρονα, τα αδρανή χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την προέλευση, αλλά και την κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Με βάση την προέλευση, τα αδρανή διακρίνονται σε:

- Φυσικά ή συλλεκτά. Έτσι ονομάζονται τα αδρανή των οποίων η συλλογή γίνεται στη φύση, χωρίς να απαιτείται θραύση πετρωμάτων. Τις περισσότερες φορές, τόπος συλλογής αυτών των αδρανών είναι τα ποτάμια.
- Θραυστά. Έτσι ονομάζονται τα αδρανή που εξορύσσονται σε λατομεία, με την θραύση βράχων. Διακρίνονται σε συμβατικά αδρανή για οικοδομικές χρήσεις και σε αδρανή ειδικών χρήσεων για υποβάσεις σιδηροδρομικών γραμμών και για αντιολισθηρούς ασφαλοτάπητες.
- Ανακυκλωμένα. Έτσι ονομάζονται τα αδρανή που προέρχονται από την ανακύκλωση δομικών υλικών υφιστάμενων κατασκευών.
- Τεχνητά ή βιομηχανικά. Έτσι ονομάζονται τα αδρανή που αποτελούν προϊόντα ή υποπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας και προκύπτουν λόγω θερμικής ή χημικής επεξεργασίας πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης.

Ταυτόχρονα, με βάση το μέγεθος των κόκκων, τα αδρανή διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 1.4: Κατάταξη αδρανών με κριτήριο το μέγεθος του κόκκου

Κατηγορία αδρανών	Μέγεθος κόκκων
α) Άμμος	μέχρι 2,5 mm
β) Λεπτόκοκκα σκύρα	ριζάκι 2,5-7 mm γαρμπίλι 7-14 mm σκύρα 14-30 mm
γ) Χονδρόκοκκα σκύρα	30-70 mm

Ακόμα, ανάλογα με το βάρος, τα αδρανή μπορούν να διακριθούν σε αδρανή κανονικού βάρους και σε ελαφριά αδρανή.

#### 1.4.2. Κανονικού Βάρους

Τα αδρανή κανονικού βάρους είναι τα αδρανή που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την παραγωγή συμβατικού σκυροδέματος. Τα συνηθέστερα είναι η άμμος, το φυσικό χαλίκι και η θρυμματισμένη πέτρα, ενώ τα ανακυκλωμένα αδρανή παίζουν όλο και μεγαλύτερο ρόλο στις σημερινές κατασκευές.

#### 1.4.3. Ελαφρά Αδρανή

Τα ελαφρά αδρανή είναι αδρανή με αυξημένο πορώδες και χαμηλό ειδικό βάρος, τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ελαφρού σκυροδέματος. Τα αδρανή αυτά μπορούν να είναι φυσικά, με συνηθέστερα την κίσηρη, η οποία χρησιμοποιείται και στα πλαίσια αυτής της έρευνας, και τη σκωρία, αλλά και τεχνητά, όπως ο διογκωμένος περλίτης, η ιπτάμενη τέφρα και η διογκωμένη άργιλος. Ταυτόχρονα, τα ελαφρά αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ή χωρίς προσθήκη άμμου, ενώ η μεγάλη απορρόφηση νερού που συνδέεται μαζί τους επηρεάζει άμεσα τον τρόπο ανάμειξης του κονιάματος.



## 1.5 Τσιμεντοειδή Πρόσθετα Σκυροδέματος

### 1.5.1. Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή είναι όλο και πιο συχνή η χρήση προσθέτων, κατά την διαδικασία παραγωγής του σκυροδέματος. Τα πρόσθετα αυτά χρησιμοποιούνται με στόχο την βελτίωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, ενώ συχνά εμφανίζονται ως αντικαταστάτες του τσιμέντου. Τα υλικά χαρακτηρίζονται από πληθώρα πλεονεκτημάτων, καθώς οδηγούν σε σημαντική αύξηση αντοχής, αλλά και ανθεκτικότητας. Παράλληλα, τα πρόσθετα αυτά οδηγούν στην μείωση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα, συμβάλλοντας έτσι στην προστασία του περιβάλλοντος. Τα πιο συνήθη πρόσθετα αυτής της κατηγορίας είναι:

- Πυριτική Παιπάλη. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας του τελικού μείγματος. Η χρήση του απαιτεί συνήθως την ύπαρξη υπερρευστοποιητή για να εξασφαλιστεί η εργασιμότητα του σκυροδέματος. Η ουσία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την έρευνα.
- Μετακαολίνης. Παρομοίως με την πυριτική παιπάλη αυξάνει την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Σε αντίθεση με το σκούρο γκρι ή μαύρο χρώμα της πυριτικής παιπάλης όμως, ο μετακαολίνης έχει συνήθως έντονο λευκό χρώμα, που μπορεί να προτιμηθεί σε ορισμένες κατασκευές.
- Ιπτάμενη τέφρα. Είναι υποπροϊόν των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με καύση άνθρακα και χρησιμοποιείται συνήθως ως υποκατάστατο του τσιμέντου Πόρτλαντ, σε ποσοστά έως και 60%.
- Σκωρία υψικαμίνου (GGBFS ή GGBS). Είναι ένα υποπροϊόν της παραγωγής χάλυβα και χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο του τσιμέντου Πόρτλαντ, σε ποσοστά έως 80%.
- Νανοΐνες άνθρακα. Αυτές βελτιώνουν την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και το βοηθούν να αποκτήσει υψηλότερο συντελεστή Young. Ταυτόχρονα, βελτιώνουν τις ηλεκτρικές του ιδιότητες που απαιτούνται για την παρακολούθηση της καταπόνησης, αλλά και της υγείας του σκυροδέματος. Οι ίνες άνθρακα προσδίδουν πολλά πλεονεκτήματα, εξαιτίας της υψηλής τους εφελκυστικής αντοχής και αγωγιμότητας.

Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, ορισμένα από αυτά τα πρόσθετα χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερο από άλλα. Μέχρι πρόσφατα ένα μεγάλο ποσοστό, περίπου το 48%, της ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας, παράγεται από την καύση λιγνίτη. Η καύση αυτή οδηγεί σε πλήθος υποπροϊόντων, όπως τα αέρια CO<sub>2</sub> και SO<sub>3</sub>, καθώς και στερεά όπως ιπτάμενη τέφρα

και τέφρα πυθμένα. Αυτά, καθώς και άλλα βιομηχανικά υποπροϊόντα, όπως η πυριτική παιπάλη και ο θερμικά επεξεργασμένος καολίνης (μετακαολίνης), είναι πρόσθετα των οποίων η χρήση στην Ελλάδα είναι όχι μόνο εφικτή, αλλά και συμφέρουσα.

### 1.5.2. Μετακαολίνης (Metakaolin)

Ο μετακαολίνης είναι ένα ποζολανικό υλικό, που προκύπτει από την θερμική αποσύνθεση του καολίνης, σε θερμοκρασίες μεταξύ 450°C και 850°C, αν και οι θερμοκρασίες μεταξύ 650°C και 750°C είναι οι πιο αποδοτικές. Αξίζει να σημειωθεί πως είναι υλικό που εμφανίζει εξαιρετικά υψηλή ποζολανική δραστηριότητα, σχεδόν διπλάσια από αυτή άλλων φυσικών ποζολάνων.



**Εικόνα 1.1: Μετακαολίνης**

Παράλληλα, ο μετακαολίνης μπορεί να συνδράμει σημαντικά στην βελτίωση των ιδιοτήτων παραγόμενου σκυροδέματος. Για την ακρίβεια, η αντικατάσταση τσιμέντου πόρτλαντ με μετακαολίνη σε ποσοστά της τάξεως 8-20% οδηγεί σε πληθώρα ωφέλιμων μηχανικών ιδιοτήτων, όπως το η επιτάχυνση της ενυδάτωσης OPC, το φαινόμενο της πλήρωσης και η ποζολανική αντίδραση, η οποία συμβαίνει εντός δύο εβδομάδων. Ακόμα, ο μετακαολίνης μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες αντοχές του σκυροδέματος, αλλά και

σημαντικά αυξημένη ανθεκτικότητα. Συγκεκριμένα, ο μετακαολίνης μειώνει σημαντικά τη διαπερατότητα χλωριόντων. Ακόμα, ενισχύει την προστασία έναντι χημικών και μειώνει την συρρίκνωση του σκυροδέματος, καθώς οδηγεί σε σκυροδέματα πυκνότερης δομής. Την ίδια στιγμή όμως, αυξάνει την εργασιμότητα του, αλλά και βελτιώνει την εμφάνιση του, αφού ο μετακαολίνης δίνει λευκότερο χρώμα στο σκυρόδεμα, το οποίο συχνά είναι προτιμότερο στις κατασκευές.

Παράλληλα, η χρήση μετακαολίνη ως υποκατάστατο τσιμέντου είναι σημαντικά καλύτερη για το περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει καθώς η παραγωγή μετακαολίνη εκλύει σημαντικά λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σύγκριση με το τσιμέντο, αποτελώντας έτσι πιο οικολογική επιλογή.

### 1.5.3. Πυριτική Παιπάλη (Silica Fume)

Η πυριτική παιπάλη είναι ένα μη κρυσταλλικό, άμορφο, πολύμορφο του διοξειδίου του πυριτίου. Συγκεκριμένα, είναι μια εξαιρετικά λεπτή σκόνη η οποία αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια με πολύ μικρή διάμετρο, ίση κατά μέσο όρο με 150 νανόμετρα. Ταυτόχρονα, αποτελεί υποπροϊόν της παραγωγής πυριτίου και κραμάτων σιδήρου και η βασική χρήση του είναι η παραγωγή σκυροδέματος υψηλής απόδοσης.

Τα πρώτα πειράματα με στόχο τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της πυριτικής παιπάλης ξεκίνησαν το 1952. Ωστόσο, πιο έντονες έρευνες έγιναν στα μέσα της δεκαετίας του 1970, όπου αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί νόμοι απαγόρευαν την διοχέτευση της πυριτικής παιπάλης στην ατμόσφαιρα, όπως γινόταν μέχρι τότε. Αυτό ανάγκασε τα χυτήρια να αρχίσουν να συλλέγουν την πυριτική παιπάλη, αλλά και αποτέλεσε κίνητρο να βρουν χρήση για αυτή. Έρευνες στη Νορβηγία έδειξαν θετικά αποτελέσματα, καθώς βρήκαν πως σκυροδέματα που περιείχαν πυριτική παιπάλη παρουσίαζαν υψηλές αντοχές, αλλά και χαμηλά πορώδη. Από τότε, η πυριτική παιπάλη διακρίνεται για τα αναμφισβήτητα οφέλη της στην παραγωγή σκυροδέματος



**Εικόνα 1.2: Πυριτική Παιπάλη**

Η πυριτική παιπάλη προστίθεται στο σκυρόδεμα με στόχο την βελτίωση των ιδιοτήτων του. Συγκεκριμένα, προκαλεί σημαντική αύξηση της αντοχής του, εξαιτίας των μηχανικών βελτιώσεων που προκαλεί η προσθήκη μιας τόσο λεπτής σκόνης στο μείγμα του σκυροδέματος, αλλά και λόγω των ποζολανικών αντιδράσεων ανάμεσα στο πυρίτιο και στο ελεύθερο υδροξείδιο του ασβεστίου στην πάστα. Ταυτόχρονα, η πυριτική παιπάλη προκαλεί σημαντική βελτίωση στην ανθεκτικότητα, κυρίως λόγω της αυξημένης προστασίας που παρέχει έναντι των χλωριόντων, προστατεύοντας έτσι την ενίσχυση από χάλυβα. Για το λόγο αυτό, η συνδρομή της σε κατασκευές κοντά σε θάλασσα είναι συχνά καθοριστική. Παράλληλα, η πυριτική παιπάλη μειώνει την απορρόφηση νερού του σκυροδέματος, καθώς μεγάλη ποσότητα νερού καταναλώνεται για την διαβροχή της μεγάλης επιφάνειας της πυριτικής παιπάλης, αλλά και επειδή αυτή φράζει τους πόρους του φρέσκου σκυροδέματος, σταματώντας έτσι την πορεία του νερού. Ωστόσο, η πυριτική παιπάλη μειώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος, αλλά όχι πολύ καθώς η απώλεια καθίζησης με το χρόνο αντισταθμίζεται εν μέρει από την μεγάλη επιφάνεια που επιφέρει η προσθήκη της πυριτικής

παιπάλης στο μείγμα. Συνήθως, ωστόσο, η ύπαρξη της σε μείγμα σκυροδέματος επιβάλλει συνήθως τη χρήση υπερρευστοποιητή.

Ταυτόχρονα, η πυριτική παιπάλη, όπως και ο μετακαολίνης, είναι λιγότερο επιβλαβείς ουσίες για το περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει καθώς η παραγωγή της εκλύει μικρότερη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα από το προϊόν που αντικαθιστά, δηλαδή το τσιμέντο, ενώ συνήθως παράγεται ήδη για άλλους σκοπούς. Συνεπώς, η χρήση πυριτικής παιπάλης ως αντικαταστάτη του τσιμέντου μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην προστασία του περιβάλλοντος.

## Κεφάλαιο 2: Ανθεκτικότητα

### 2.1 Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα, όπως και τα περισσότερα υλικά, έχει πεπερασμένη διάρκεια ζωής, στο τέλος της οποίας κατατάσσεται πλέον ανεπαρκές. Ο παράγοντας που άμεσα επηρεάζει αυτή τη διάρκεια, και καθορίζει το χρόνο για τον οποίο το σκυρόδεμα μπορεί να υπομένει τις επιδράσεις περιβαλλοντικών παραγόντων χωρίς να χάνει τις ιδιότητες λειτουργικότητας και αντοχής του, ονομάζεται ανθεκτικότητα. Συγκεκριμένα, ο ορισμός της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος είναι η ικανότητα του να αντιστέκεται σε φθοροποιό δράση, σε χημική προσβολή, σε απότριψη και σε κάθε άλλη διαδικασία φθοράς.

Η ανθεκτικότητα, άλλωστε, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα επιστημονικά, αλλά και πρακτικά προβλήματα του σκυροδέματος στη σημερινή εποχή. Αυτό συμβαίνει καθώς σήμερα, οι βιομηχανικοί πόροι που αποτίθενται στις επισκευές παλαιών κατασκευών είναι σχεδόν ίσοι με αυτούς για τη δημιουργία νέων. Για την ακρίβεια, οι σύγχρονες κατασκευές οφείλουν να αντέχουν στις χημικές επιθέσεις, τη φθορά, αλλά και τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Όταν αποτυχαίνουν, λόγω χαμηλής ανθεκτικότητας, απαιτούνται διαρκώς επισκευές ή νέες κατασκευές, οι οποίες, εκτός από αντισοικονομικές, είναι και επιβλαβείς προς το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, ο παράγοντας ανθεκτικότητα κρίνεται απαραίτητος.

Η απαιτούμενη ανθεκτικότητα διαφέρει από εφαρμογή σε εφαρμογή ωστόσο. Συγκεκριμένα, κάθε κατασκευή έχει άλλες ανάγκες ανθεκτικότητας, εξαρτώμενες από τη χρήση και τη λειτουργία της, η οποία και καθορίζει τις επιθυμητές ιδιότητες του σκυροδέματος. Πιο λεπτομερείς διατάξεις αναφορικά με την εξασφάλιση της ανθεκτικότητας καθορίζονται και από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 206-1:

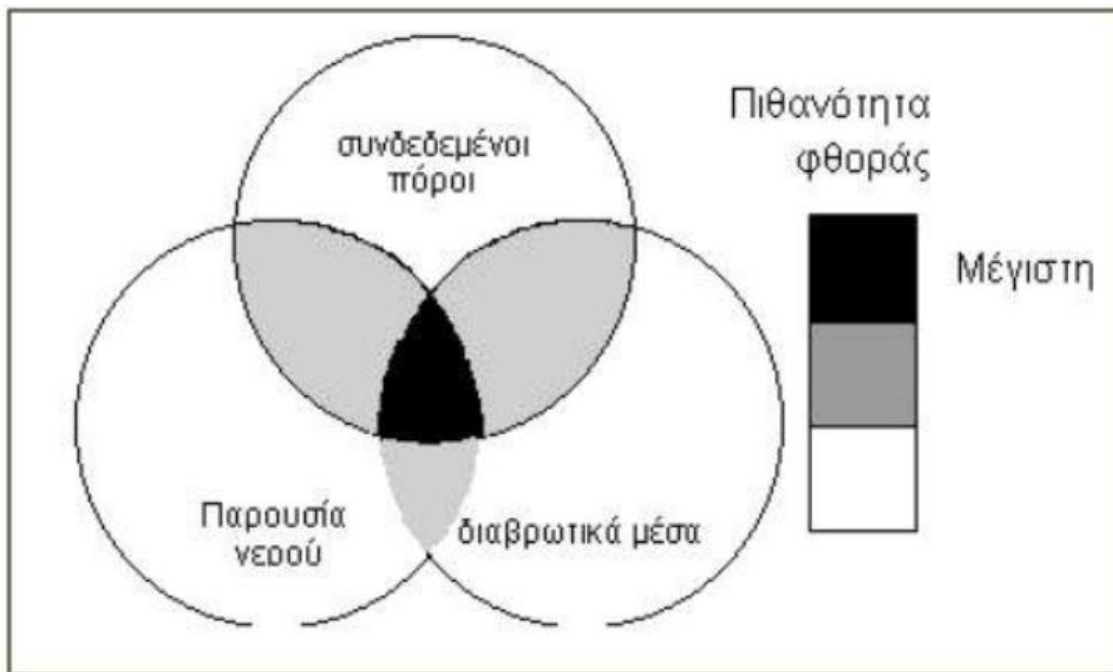
**Πίνακας 2.1: Οριακές τιμές σύνθεσης σκυροδέματος και επικάλυψης για ανθεκτικότητα**

Πίνακας Ε.Π. F.1 – Οριακές τιμές σύνθεσης, ιδιοτήτων σκυροδέματος και επικάλυψης για ανθεκτικότητα (ισχύει για όλους τους τύπους τσιμεντών πλην όπου άλλως δείχνεται)																									
Πίνακας Ε.Π. F1 - Οριακές τιμές σύνθεσης, ιδιοτήτων σκυροδέματος και επικάλυψης για ανθεκτικότητα (ισχύει για όλους τους τύπους τσιμεντών πλην όπου άλλως δείχνεται)																									
Κατηγορία έκθεσης	Κατηγορίες έκθεσης																								
	Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή προσβολής	Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης					Διάβρωση λόγω χλωριόντων												Προσβολή από ψύξη/απόψυξη				Χημική προσβολή		
							Θαλασσινό νερό																		
							Τσιμεντά II, III, IV (Εκτός CEM II / B-L + CEM II / B-L)						Τσιμεντά I (+ CEM II / B-L CEM II / B-L)			Χλωριόντα που δεν προέρχονται από θαλασσινό νερό									
Χ0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3					
1 max N/T	---	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,55	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50	0,55	0,50	0,45		
2 min κατηγορία αντοχής	C 12/15	C 20/25	C 25/30	C 25/30	C 30/37	C 25/30	C 26/32	C 25/30	C 26/32	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 30/37	C 32/40	C 35/45	C 28/35	C 25/30	C 32/40	C 25/30	C 35/45	C 30/37	C 28/35	C 30/37	C 35/45
3 min περιεκτικότητα τσιμέντο <sup>1</sup> σε kg/m <sup>3</sup>	---	280	300	300	320	330	330	330	330	350	330	330	350	330	330	350	320	300	320	300	320	320	340	360	
4 min επικάλυψη για ανθεκτικότητα <sup>2</sup> mm		25	25	35	35	45	40	45	40	50	40	40	50	35	40	50						35	35	35	
5 min περιεκτικότητα σε αέρα (%)	---	---	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	---	---	4,0	---	4,0	---	4,0 <sup>2</sup>	---	---	---
6 Άλλες απαιτήσεις	<b>Σημ.:</b> Άοπλο σκυροδέμα					<b>Σημ.:</b> Παραθαλάσσιο 1,5			<b>Σημ.:</b> Μόνιμα μέσα στη θάλασσα							Αδρανή σύμφωνα με EN12620 με ικανοποιητική αντοχή σε παγετό				Τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά <sup>3</sup>					

## 2.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τρεις βασικούς παράγοντες: το διαβρωτικό περιβάλλον, το νερό και την παρουσία συνδεδεμένων πόρων. Και οι τρεις αυτοί παράγοντες έχουν άμεση επίδραση στη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος, ενώ όσοι περισσότεροι εμφανίζονται ταυτόχρονα στο υλικό, τόσο πιο καταστροφική η επίδρασή τους. Η επιπρόσθετη φορά που επιφέρει η συνεργασία των παραγόντων αυτών φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:





**Εικόνα 2.1: Παράγοντες ανθεκτικότητας**

### 2.3 Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον

Η έκθεση του σκυροδέματος σε διαβρωτικό περιβάλλον είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες ανθεκτικότητας, και αυτός στον οποίο επικεντρώνεται η συγκεκριμένη έρευνα. Συγκεκριμένα, όταν το σκυρόδεμα βρίσκεται μέσα σε περιβάλλον το οποίο ορίζεται ως διαβρωτικό, τότε επιταχύνονται οι χημικές αντιδράσεις που επιφέρουν φθορά. Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον ορίζεται η επαφή του σκυροδέματος με το νερό και τα διαβρωτικά μέσα που περιέχει, με τον ατμοσφαιρικό αέρα και με ειδικό περιβάλλον (δηλαδή για παράδειγμα με  $\text{SO}_4^{2-}$ , αλκάλια και  $\text{CL}^-$ ). Ταυτόχρονα, η χημική διάβρωση εξαρτάται από το μηχανισμό που προκαλεί τη φθορά του σκυροδέματος και μπορεί να οφείλεται στο σχηματισμό προϊόντων που προκαλούν διόγκωση, σε αντιδράσεις ανταλλαγής μάζας ή στην υδρόλυση των συστατικών του τσιμεντοπολτού.

Η υδρόλυση των συστατικών αυτών συμβαίνει καθώς το γλυκό νερό περιέχει ιόντα ασβεστίου. Κατά την επαφή του με το σκυρόδεμα, διαλύονται τα προϊόντα ασβεστίου, οδηγώντας στην διάσπαση των λιγότερο σταθερών συστατικών του τσιμέντου και τελικά στην χαλάρωση του ιστού του σκυροδέματος. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η συνολική αντοχή του



σκυροδέματος και προκαλούνται εξανθήματα στην επιφάνεια του, ως άμεσο αποτέλεσμα της απόπλυσης του υδροξειδίου του ασβεστίου με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας.

Παράλληλα, η χημική διάβρωση του σκυροδέματος μπορεί να οφείλεται σε αντιδράσεις ανταλλαγής μάζας. Συγκεκριμένα, αυτές μπορεί να προκαλούνται από σχηματισμό διαλυτών ή αδιάλυτων αλάτων ασβεστίου. Εναλλακτικά, ενδέχεται να αποτελούν άμεσο αποτέλεσμα της επίδρασης διαλυμάτων μαγνησίου.

Την ίδια στιγμή, παράγοντας χημικής διάβρωσης του σκυροδέματος μπορεί να αποτελέσει και ο σχηματισμός προϊόντων που προκαλεί διόγκωση. Αυτός μπορεί να συμβεί με πολλούς τρόπους, ένας από τους σημαντικότερους είναι η επίδραση του θαλασσινού νερού. Για την ακρίβεια, η επίδραση που έχει το θαλασσινό νερό στο σκυρόδεμα είναι πολύπλοκη, καθώς εκτός από την επίδραση των αλάτων, προκαλεί υδροφθορά, ενώ επιδρούν και τα αλκάλια και το διαλυμένο στο νερό διοξείδιο του άνθρακα. Σχετικά με τα άλατα όμως, διαλυμένα χλωριούχα και θειικά άλατα προκαλούν αντίδραση με τα συστατικά του σκυροδέματος δημιουργώντας θειικό ασβέστιο, χλωριούχο ασβέστιο και υδροξείδιο του μαγνησίου, οδηγώντας έτσι σε φθορές. Βασικός τρόπος αντιμετώπισης αυτών αποτελεί η χρήση ποζολανικών προσμίξεων στο σκυρόδεμα, οι οποίες μειώνουν σημαντικά την απορρόφηση χλωριόντων. Εναλλακτικά, συστήνεται η αύξηση των οπλισμών χάλυβα και ο περιορισμός της διαπερατότητας του σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, η μέγιστη φθορά παρατηρείται στην παλιρροιακή ζώνη, εξαιτίας της ταυτόχρονης δράσης όλων των παραπάνω φαινομένων που προκαλεί το θαλασσινό νερό.

Ένα από αυτά τα φαινόμενα αποτελεί η ενανθράκωση, η οποία εκτός από το θαλασσινό νερό προκαλείται και από το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, το  $\text{CO}_2$  της ατμόσφαιρας αντιδρά με το  $\text{CA}(\text{OH})_2$  του σκυροδέματος, προκαλώντας παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου. Με τον τρόπο αυτό επιταχύνεται σημαντικά η διάβρωση του οπλισμού, αλλά και η επίδραση χλωριόντων.

Ταυτόχρονα, υπάρχουν και άλλοι τρόποι σχηματισμού προϊόντων που προκαλούν διόγκωση, τα οποία αποτελούν άμεσο παράγοντα χημικής διάβρωσης του σκυροδέματος. Ένα από αυτά είναι η διάβρωση, η οποία μειώνει τη διατομή των ράβδων οπλισμού, αλλά και την ολκιμότητά τους. Ακόμα, άλλοι τρόποι αποτελούν η αλκαλοπυριτική αντίδραση που προξενεί ρωγμές και διόγκωση, η επίδραση θειικών αλάτων που προκαλούν άμεσες φθορές στη δομή του σκυροδέματος, και η ενυδάτωση κρυσταλλικών  $\text{MgO}$  και  $\text{CaO}$  που οδηγεί σε ρηγμάτωση.

## 2.4 Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων

Οι μηχανισμοί που επιτρέπουν ξένες ουσίες να διεισδύσουν στο σκυρόδεμα είναι τρεις, και μπορούν να δρουν μεμονωμένα ή και ταυτόχρονα:

- Η τριχοειδής απορρόφηση, δηλαδή η είσοδος υγρών στο σκυρόδεμα εξαιτίας τριχοειδών φαινομένων
- Η διείσδυση (migration), δηλαδή η ροή ρευστών λόγω διαφοράς πίεσης
- Η διάχυση (diffusion), δηλαδή η κίνηση ιόντων και μορίων από τις περιοχές που έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση σε περιοχές με μικρότερης συγκέντρωση.

## 2.5 Τριχοειδής απορρόφηση

Πολύ σημαντική παράμετρος για το σκυρόδεμα, η οποία καθορίζει την ταχύτητα με την οποία διεισδύει το νερό σε αυτό, και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της ανθεκτικότητάς του, είναι η τριχοειδής απορρόφηση. Η σημασία της οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι αποτελεί τον πιο συχνό τρόπο διείσδυσης νερού στα δομικά υλικά, ενώ παράλληλα η παρουσία νερό στο εσωτερικό του σκυροδέματος είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες φθοράς του.

Για το λόγο αυτό σήμερα γίνεται πληθώρα πειραμάτων που στοχεύουν στον προσδιορισμό του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Ο συντελεστής αυτός είναι η παράμετρος που καθορίζει τον ρυθμό απορρόφησης υγρασίας μέσω τριχοειδών πόρων των δομικών υλικών.

Η τριχοειδής απορρόφηση, ωστόσο, δεν δημιουργεί από μόνη της κάποιο πρόβλημα στον οπλισμό. Η σημασία της ωστόσο, προκύπτει από το γεγονός ότι μειώνει την απόσταση που χρειάζεται να καλύψουν τα χλωριόντα μέσω διάχυσης για να φτάσουν στον οπλισμό του σκυροδέματος, καθιστώντας το έτσι πιο ευάλωτο.

## 2.6 Υδατοπερατότητα

Ένας ακόμα παράγοντας ανθεκτικότητας είναι η υδατοπερατότητα, η οποία καθορίζει την πιθανότητα του σκυροδέματος να αποκτήσει φθορά, μετά την ξήρανσή του. Συγκεκριμένα, ως υδατοπερατότητα χαρακτηρίζεται ο ρυθμός μεταφοράς του νερού μέσω των πόρων των

στερεών σωμάτων. Στον υπολογισμό της απαιτείται και ο συντελεστής  $K$  (cm/s). Η υδατοπερατότητα εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Πορώδες του υλικού
- Υδροστατική πίεση
- Μέση διάμετρος κενών και τριχοειδών αγγείων
- Θερμοκρασία
- Σύνθεση του νερού

Η υδατοπερατότητα διαφέρει από υλικό σε υλικό, ένα από τα οποία αξίζει να μελετηθεί είναι ο σκληρυμένος τσιμεντοπολτός. Κατά την ενυδάτωση αυτού, βασικότεροι παράγοντες είναι η συνέχεια και το μέγεθος των πόρων. Όταν οι πόροι είναι φραγμένοι με νερό, αυτό προσδίδει μικρή υδατοπερατότητα. Αντίθετα, ακόρεστοι και κενοί πόροι συνδέονται με μεγάλη υδατοπερατότητα, ιδιαίτερα αν αυτοί είναι συνδεδεμένοι. Μετά την διάστρωση, ο συντελεστής υδατοπερατότητας του σκυροδέματος βρίσκεται μεταξύ  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  cm/s, ο οποίος με την ενυδάτωση του μικραίνει. Επιθυμητό τριχοειδές πορώδες θεωρείται το 30%, ποσοστό κατά το οποίο ο συντελεστής υδατοπερατότητας είναι ίσος με περίπου  $10^{-12}$  και η ασυνέχεια του δικτύου των πόρων έχει επιτευχθεί.

Τα αδρανή του σκυροδέματος, αντιθέτως, έχουν σημαντικά χαμηλότερο πορώδες από τον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό, συνήθως περίπου 3%, ενώ σχεδόν ποτέ δεν ξεπερνούν το 10%. Παρόλα αυτά, η υδατοπερατότητά τους είναι πολύ υψηλή, εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους των τριχοειδών τους πόρων.

Τα αδρανή, συνεπώς, έχουν πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Παρόλα αυτά, η προσθήκη τους τελικό μείγμα δεν βελτιώνει ιδιαίτερα τη συνολική υδατοπερατότητα του σκυροδέματος, κυρίως λόγω της παρουσίας πληθώρας ρωγμών που σχηματίζονται μεταξύ της τσιμεντόπαστας και της επιφάνειας των αδρανών κατά τη διαδικασία της ενυδάτωσης. Οι ρωγμές αυτές οφείλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές, στη συστολή ξήρανσης, αλλά και σε εξωτερικά φορτία. Οι μικροσκοπικές αυτές ρωγμές δημιουργούν νέες διόδους για το νερό, οδηγώντας σε αύξηση της υδατοπερατότητάς του. Ωστόσο, υπάρχουν λύσεις για το ζήτημα αυτό, όπως η χρήση περισσότερου σκυροδέματος ή η σωστή επιλογή καλά διαβαθμισμένων αδρανών.

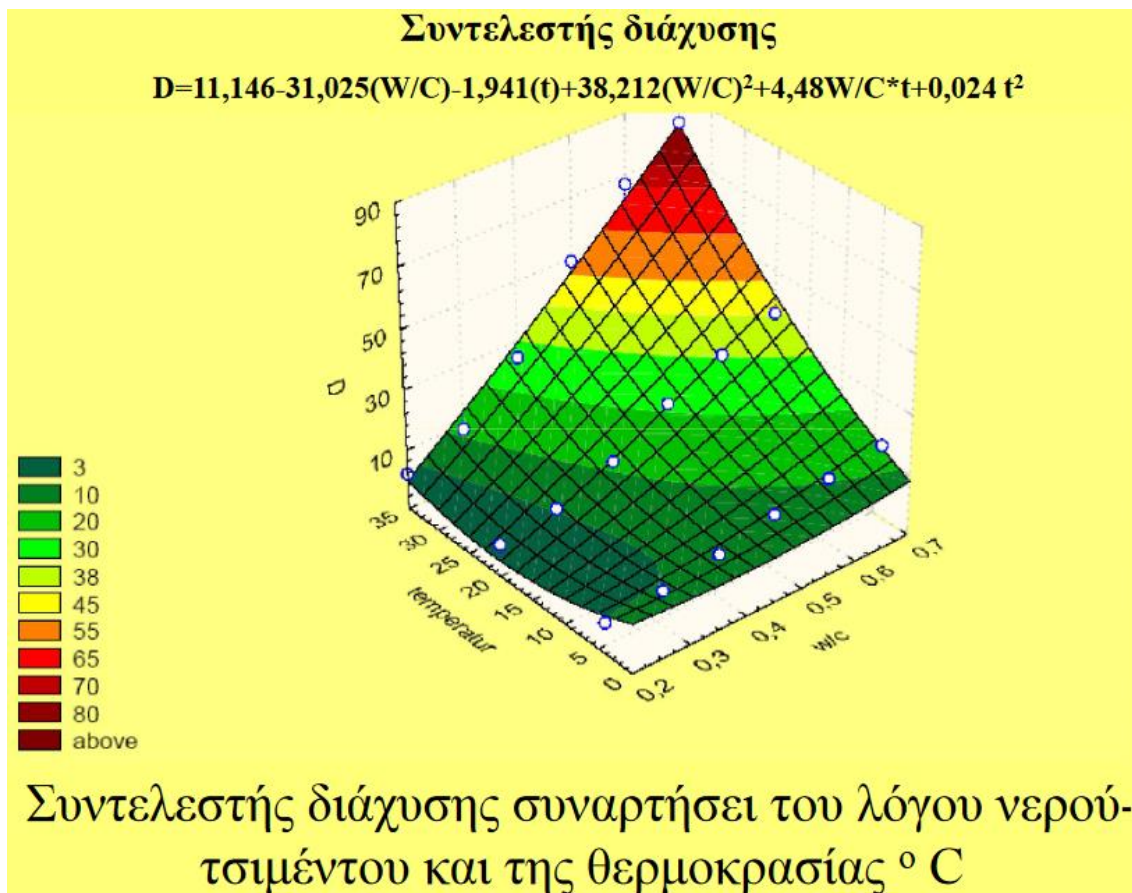
## 2.7 Μηχανισμός διείσδυσης (migration)

Η διαδικασία κίνησης ενός υγρού μέσα στο σύστημα πόρων και ρωγμών του σκυροδέματος, εξαιτίας της διαφοράς πίεσης, ονομάζεται διείσδυση. Η διείσδυση αυτή εξαρτάται άμεσα από τον βαθμό κορεσμού των πόρων, καθώς αν οι πόροι δεν είναι γεμάτοι υγρό, τότε μπορούν να αποτελέσουν δίοδο εισόδου του νερού στο σκυρόδεμα. Αντίσταση στην είσοδο αυτή μπορούν να προκαλέσουν η τριβή των τοιχωμάτων των πόρων και των ρωγμών, η στενότητα και στρεβλότητά τους, καθώς και το ιξώδες του ρευστού. Ταυτόχρονα, η πίεση του νερού μπορεί να είναι και αρνητική, προκαλώντας υγρή απορρόφηση, που δημιουργεί κλίσεις διείσδυσης και πίεσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αρνητικής πίεσης υγρού αποτελούν τα υγρά στο μη κορεσμένο σκυρόδεμα. Επίσης, συχνά η διαδικασία διείσδυσης του υγρού σε περιβάλλον μη κορεσμένο θα εξαρτηθεί και από τη διείσδυση του άλλου ρευστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα ρευστά οι πιέσεις είναι αλληλοεξαρτώμενες.

## 2.8 Μηχανισμός διάχυσης (diffusion)

Η διαδικασία μεταφοράς μιας διαλυμένης ουσίας ή ενός αερίου σε ένα ρευστό εξαιτίας της διαφορετικής συγκέντρωσης μεταξύ του εσωτερικού και της επιφάνειας ενός υλικού, ονομάζεται διάχυση. Συγκεκριμένα, περιοχές με υψηλή συγκέντρωση μιας ουσίας τείνουν να εξαπλώνονται, μέχρι να προκύψει ισορροπία. Εμπόδιο στη διαδικασία αυτή αποτελεί το μέγεθος των πόρων, η διάταξη του συστήματός τους, καθώς και η στρεβλότητα πόρων και ρωγμών. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί πως η διάχυση δέχεται επιρροή και από τις μοριακές συγκρούσεις με τα τοιχώματα, αλλά μόνο σε πολύ μικρούς πόρους. Ταυτόχρονα, άμεση επίδραση στη διάχυση ασκεί και ο βαθμός κορεσμού των πόρων και των ρωγμών. Αυτό συμβαίνει καθώς, παρότι οι τα αέρια και οι ατμοί καταφέρνουν να διαχυθούν πολύ αργά σε γεμάτους πόρους, οι διαλυμένες ουσίες απαιτούν κορεσμένο περιβάλλον προκειμένου να μπορέσουν να διαχυθούν στο σκυρόδεμα.

Ταυτόχρονα, καθοριστικός παράγοντας της διάχυσης είναι και η θερμοκρασία. Συνεπώς, η μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν στην περιοχή της κατασκευής, εξαιτίας της άμεσης σύνδεσης της διάχυσης με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί πως υψηλή περιεκτικότητα σε νερό επιβραδύνει σημαντικά τη διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα. Η επίδραση της θερμοκρασίας στη διάχυση φαίνεται λεπτομερώς στο παρακάτω διάγραμμα:



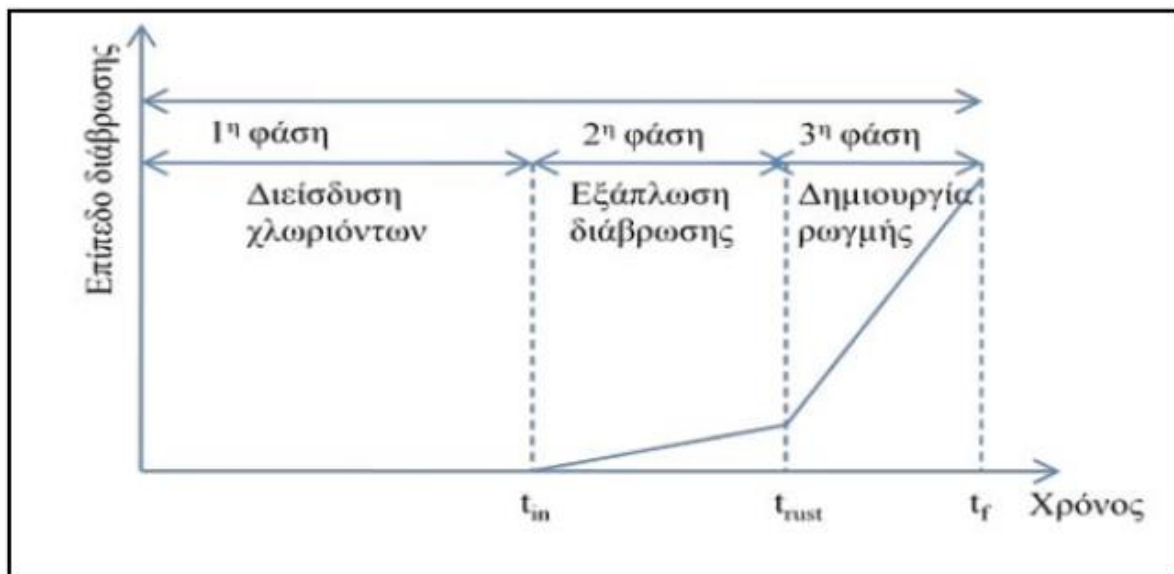
**Εικόνα 2.2:** Συντελεστής διάχυσης συναρτήσει του λόγου νερού-τσιμέντου και της θερμοκρασίας °C

## 2.9 Διείσδυση χλωριόντων

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η διείσδυση χλωριόντων, και η διάβρωση που επιφέρουν στον εξαιρετικά ευάλωτο σε αυτή χάλυβα. Όπως, είναι προφανές, ο μεγαλύτερος κίνδυνος έγκειται σε κατασκευές μέσα (γέφυρες) ή κοντά στη θάλασσα.

Συγκεκριμένα, τα χλωριόντα, που σταδιακά διαχέονται προς την επιφάνεια του σκυροδέματος από τον οπλισμό, ξεπεράσουν μια τιμή όριο, η διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού ξεκινά. Η διάβρωση οδηγεί στη δημιουργία οξειδίων του σιδήρου, τα οποία συγκεντρώνονται στη μεταβατική ζώνη μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού. Ο όγκος των οξειδίων αυτών συνεχίζει να αυξάνεται, ώσπου να καλύψει πλήρους τους κενούς πόρους.

Μετά, κάθε περαιτέρω αύξηση του όγκου αυτού προξενεί εσωτερικές τάσεις στο σκυρόδεμα, προκαλώντας ρωγμές. Η εσωτερική αυτή ρηγμάτωση του σκυροδέματος στα σημεία τομής με το χαλύβδινο οπλισμό προκαλεί μείωση συνάφειας ανάμεσα στα δύο υλικά, γεγονός που οδηγεί στη μείωση τη συνολική φέρουσα ικανότητα της κατασκευής. Η διαδικασία αυτή φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 2.1: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού εξαιτίας των χλωριόντων

Η συνολική διείσδυση χλωριόντων προσδιορίζεται από συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων  $D_{nssm}$  ( $m^2/s$ ), ο οποίος εκτιμάται από τις μεθόδους της διάχυσης και της διείσδυσης χλωριόντων μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου.

Η μέθοδος της διάχυσης, στην περίπτωση δοκιμίου από σκυρόδεμα, πραγματοποιείται σε μη σταθερές συνθήκες (not steady). Συγκεκριμένα, διατηρούνται τα δοκίμια σκυροδέματος σε επαφή με χλωριούχο διάλυμα σταθερής συγκέντρωσης και καταγράφεται η κατανομή των χλωριόντων με την πάροδο του χρόνου. Η μέθοδος αυτή συχνά αποφεύγεται, καθώς είναι εξαιρετικά χρονοβόρα.

Η διείσδυση χλωριόντων με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, αντιθέτως, είναι σαφώς πιο γρήγορη μέθοδος. Αυτό οφείλεται στην επιτάχυνση της διείσδυσης χλωριόντων στο εσωτερικό των δοκιμίων, χάρις στην εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου. Η διαδικασία αυτή προτάθηκε πρώτη φορά από τον D.Whiting το 1981, ο οποίος ήθελε να εκτιμήσει με ταχύτητα την

διαπερατότητα του σκυροδέματος στα χλωρίοντα (γνωστό ως Rapid Chloride Permeability Test). Ωστόσο, στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η πιο σύγχρονη μέθοδος NT 492.

## Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 3.1 Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή, εκτός από την αντοχή, μεγάλο ρόλο στην παραγωγή σκυροδέματος έχει και η ανθεκτικότητα, η οποία επικεντρώνεται στη διατήρηση της αντοχής και λειτουργικότητας του έργου στο πέρασμα του χρόνου. Με αυτό το σκοπό γίνονται έρευνες, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, με σκοπό την μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα, αλλά και την προσέγγιση της σύνθεσης σκυροδέματος που καλύτερα την ενσωματώνει. Για το λόγο αυτό μελετώνται ελαφρά σκυροδέματα, τα οποία αν και έχουν μειωμένη αντοχή, χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ανθεκτικότητα και εργασιμότητα, ενώ παράλληλα είναι πολύ πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Στη συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκαν ελαφρά σκυροδέματα, τα οποία αξιοποιούν ως αδρανές την κίσηρη. Στις συγκρίσεις που θα γίνουν με σχετική έρευνα στο αντικείμενο, η κίσηρης χρησιμοποιείται και σαν αδρανές, αλλά και σαν πρόσθετο, ανάλογα με την έρευνα. Ωστόσο, σαν αδρανές περιέχει μεγάλο ποσοστό από λεπτομερές υλικό, που αναμένεται να έχει την δράση που διερευνάται.

Παράλληλα, θα μελετηθούν συνθέσεις που χρησιμοποιούν πρόσθετα σε διαφορετικά ποσοστά, προκειμένου να βελτιώσουν τις ιδιότητες τους. Τα πρόσθετα αυτά είναι ο μετακαολίνης και η πυριτική παιπάλη, ενώ θα μελετηθεί εκτενώς η επίδρασή τους στην αντοχή, αλλά και στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

### 3.2 Τρέχουσα Ερευνητική Δραστηριότητα

#### 3.2.1. Κίσηρης

Ένα σημαντικό μειονέκτημα του σκυροδέματος είναι το μεγάλο του βάρος. Για να αντιμετωπιστεί ακριβώς αυτό το μειονέκτημα χρησιμοποιείται κίσηρης ως αδρανές στην παραγωγή, ώστε να δημιουργηθεί ελαφρό σκυροδέμα, το οποίο έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Η κίσηρης, σύμφωνα με την έρευνα των Kianoosh Samimi et al (2018), είναι από τα καλύτερα υλικά για την παραγωγή ελαφρού σκυροδέματος, και σίγουρα καλύτερο από το ζεόλιθο με τον οποίο έγινε άμεση σύγκριση, αφού η κίσηρης οδηγούσε σε υψηλότερες αντοχές. Ταυτόχρονα, επισημαίνουν πως τα σκυροδέματα με κίσηρη αυξάνουν σημαντικά την αντοχή τους με το χρόνο. Παράλληλα, κάνουν λόγο για την αυξημένη αντοχή τους σε οξέα, αλλά και



για την ανώτερη χημική τους σταθερότητα. Επιπλέον, η κίσηρης φαίνεται να αυξάνει την αντίσταση στην ενανθράκωση, οδηγώντας συνολικά σε βελτιωμένη ανθεκτικότητα.

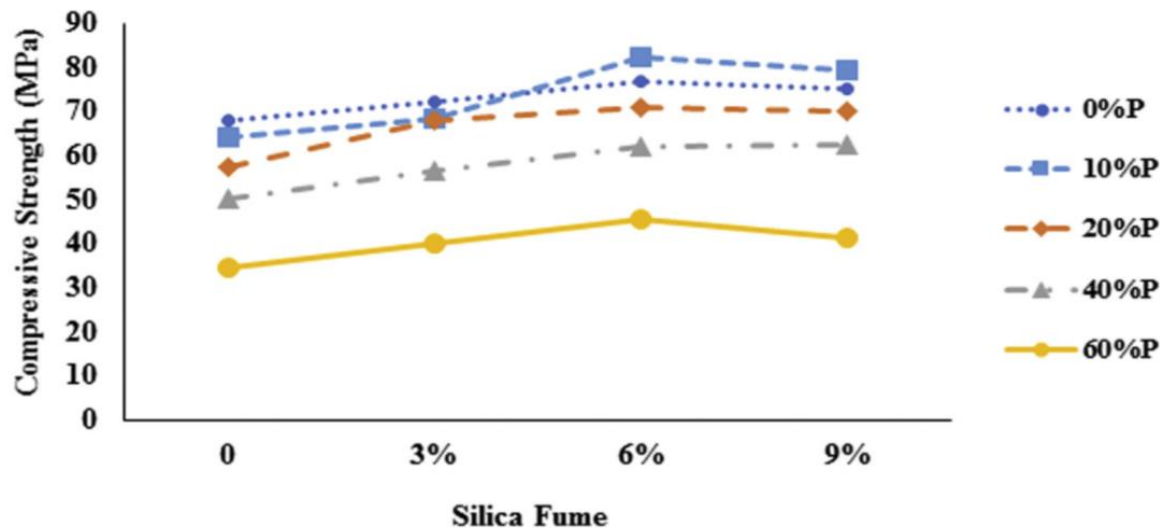
Επιπρόσθετα, λόγο για τα πλεονεκτήματα που αποφέρει η κίσηρης στην παραγωγή ελαφρού σκυροδέματος κάνουν και οι Hesam Madani et al (2018), καθώς καταγράφουν πως αν και αρχικά οδηγεί σε χαμηλότερες αντοχές, οι αντοχές αυτές πλησιάζουν το συμβατικό σκυρόδεμα με το πέρασμα του χρόνου. Αυτό συμβαίνει καθώς το ελαφρό σκυρόδεμα αυξάνει την αντοχή του σημαντικά και μετά το πέρασ των 28 ημερών. Ακόμα, επισημαίνουν πως η κίσηρης δεν βοηθά στην μείωση της υδατοαπορροφητικότητας από μόνη της, αλλά μπορεί να το πετύχει με τη χρήση συνδετικών υλικών όπως η πυριτική παιπάλη. Ταυτόχρονα, οι Quang Tran et al (2020), αναφέρουν πως σύμφωνα με την εκτενή έρευνά τους, η κίσηρης οδηγεί σε σκυροδέματα με σημαντικά αυξημένη ανθεκτικότητα. Επίσης, ο Mustafa Saridemir (2013), συμπεραίνει πως η κίσηρης συμβάλει στην δημιουργία ελαφρών σκυροδεμάτων υψηλών προδιαγραφών, αλλά παρέχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα όταν συνδυαστεί με ένα πρόσθετο, όπως η πυριτική παιπάλη.

Ωστόσο, σκυροδέματα με την κίσηρη ως αδρανές στην παραγωγή τους, όπως και όλα τα ελαφρά σκυροδέματα, έχουν και αρκετά μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, οι Bahar Demirel et al (2010), σχολιάζουν πως η κίσηρης οδηγεί σε μειωμένη αντοχή σε σχέση με τα συμβατικά σκυροδέματα. Την ίδια στιγμή, καταγράφουν πως οδηγεί σε αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης. Παράλληλα, οι Fatih Ozcan et al (2018), επισημαίνουν πως η συμμετοχή της κίσηρης προκάλεσε αύξηση του παγιδευμένου αέρα σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, ενώ κάνουν λόγο για άμεση σχέση αντοχής και ποσοστού αέρα στο σκυρόδεμα. Συμπερασματικά, οι ερευνητές οδηγούνται στο συμπέρασμα πως η κίσηρης είναι ένα από τα καλύτερα υλικά για την παραγωγή ελαφρού σκυροδέματος, το οποίο αν και υστερεί σε αντοχή σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, έχει εξαιρετική ανθεκτικότητα και εργασιμότητα.

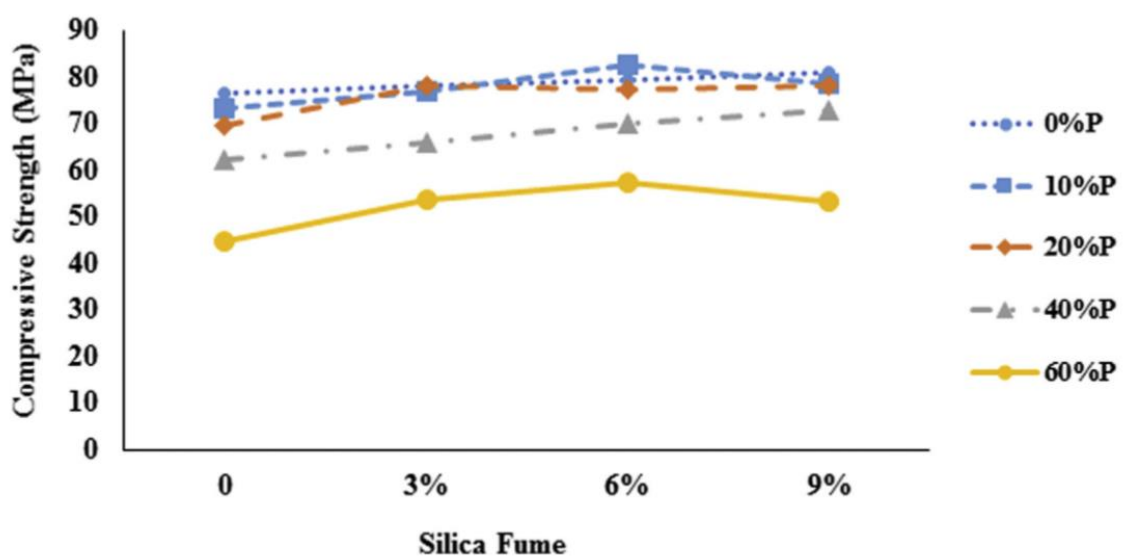
### 3.2.2. Πυριτική Παιπάλη

Με στόχο την βελτίωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση της ανθεκτικότητας και της διείσδυσης χλωριόντων, γίνεται συχνά χρήση χημικών προσθέτων. Συγκεκριμένα, η χρήση πυριτικής παιπάλης (silicafume) ως πρόσθετο στην παραγωγή σκυροδέματος έχει πολλές φορές συνδεθεί με την αύξηση της αντοχής του, καθώς και με την αύξηση της αντίστασης της κίσηρης στην διείσδυση χλωριόντων. Για παράδειγμα, οι Hesam Madani et al (2018) αναφέρουν πως ο συνδυασμός αλεσμένης κίσηρης και

πυριτικής παιπάλης πετυχαίνει την παραγωγή σκυροδέματος υψηλών προδιαγραφών, επισημαίνοντας παράλληλα πως η χρήση πυριτικής παιπάλης οδηγεί σε υψηλότερες αντοχές, αλλά και σε σημαντικά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στο διάστημα των 90 ημερών. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα και παρακάτω στους Πίνακες 3.1 και 3.2, που δείχνουν την αντοχή στις 28 και στις 30 ημέρες.

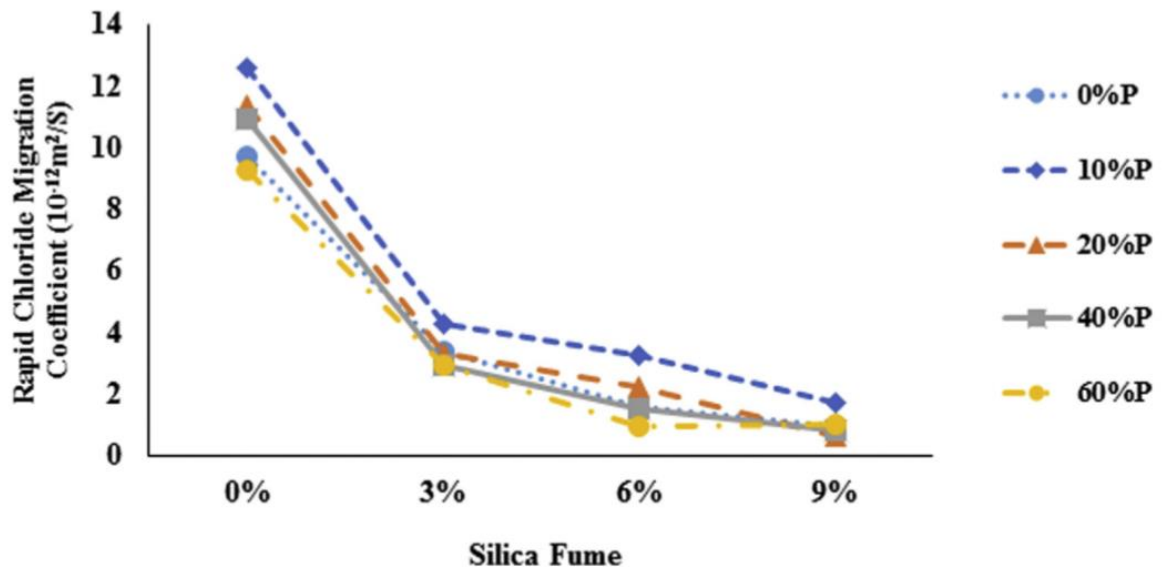


Σχήμα 3.1: Αντοχή στις 28 ημέρες (Hesam Madani et al (2018))



**Σχήμα 3.2: Αντοχή στις 90 ημέρες (Hesam Madani et al (2018))**

Την ίδια στιγμή, τονίζουν πως η πυριτική παιπάλη, ακόμα και σε πολύ μικρά ποσοστά της τάξεως του 3%, προκαλεί σημαντική μείωση στην διείσδυση χλωριόντων, ήδη από την εικοστή όγδοη ημέρα. Τα ακριβή αποτελέσματα φαίνονται και στο **Σχήμα 3.3**.



**Σχήμα 3.3: Διείσδυση χλωριόντων (Hesam Madani et al (2018))**

Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και από την έρευνα του Mustafa Saridemir το 2013, η οποία επιβεβαιώνει πως η πυριτική παιπάλη μαζί με αλεσμένη κίσηρη οδηγούν σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής. Παράλληλα, υποστηρίζει πως η ενσωμάτωση πυριτικής παιπάλης στο δείγμα αυξάνει την αντοχή, αλλά και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, ενώ διαφορετικά ποσοστά δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Η δική του έρευνα πέτυχε το βέλτιστο αποτέλεσμα με τη χρήση 15% πυριτικής παιπάλης.

Παράλληλα, εκτενή έρευνα των δυνατών πρόσθετων στο ελαφρό σκυρόδεμα έχουν κάνει και οι Kim Hung Mo et al (2017). Συγκεκριμένα, αναφορικά με την πυριτική παιπάλη, σημειώνουν και αυτοί ότι συνδράμει στην αύξηση της συνολικής αντοχής, καλύτερα μάλιστα από τα υπόλοιπα πρόσθετα που μελετήθηκαν, καθώς δείχνει εντυπωσιακά αποτελέσματα ήδη από τις 7 ημέρες, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα πρόσθετα που χρειάζονται πολύ περισσότερο χρόνο. Ταυτόχρονα, επιβεβαιώνουν πως ενισχύει σημαντικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε κάθε μορφή χημικής επιδείνωσης, ανεξάρτητα από το είδος ελαφρόπετρας. Επίσης, τονίζουν πως κρίνεται απαραίτητη η χρήση διαφορετικών ποσοστών πυριτικής

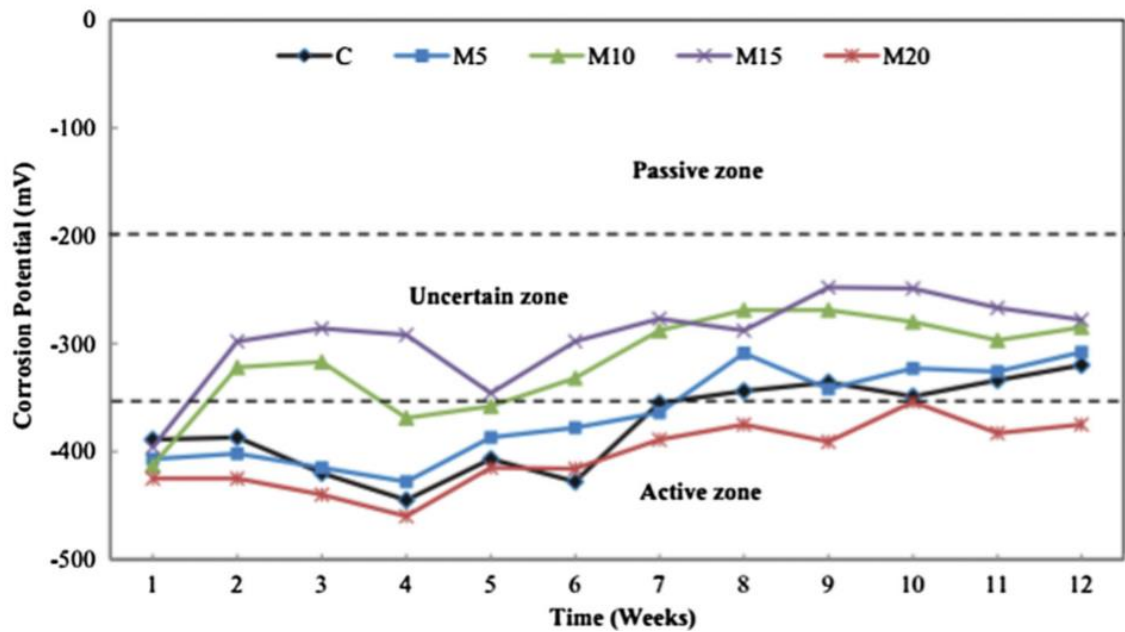
παιπάλης ανάλογα με τη δράση ανθεκτικότητας, ενώ για παράδειγμα στην διείδυση χλωριόντων αναφέρουν πως το ιδανικό αποτέλεσμα είναι με τη χρήση ως και 7% πυριτικής παιπάλης. Αυτή άλλωστε είναι και το πρόσθετο που στο τέλος ξεχώρισε η δική τους έρευνα από όλα τα υπόλοιπα.

### 3.2.3. Μετακαολίνης

Ταυτόχρονα, ένα άλλο πρόσθετο που αποσκοπεί στην βελτίωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι ο μετακαολίνης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την έρευνα των Tan Tze Haw et al (2020), η χρήση του μετακαολίνης σε ποσοστό 10% στο μείγμα προκαλούσε αύξηση της διατμητικής αντοχής κατά 33% και της καμπτικής αντοχής κατά 13% σε διάστημα 7 ημερών. Οι τιμές αυτές αυξάνονταν ακόμα περισσότερο στο διάστημα των 28 ημερών, δηλαδή κατά 49% και 10% αντίστοιχα, ενώ σχολιάζουν πως ο μετακαολίνης είχε την καλύτερη από όλα τα πρόσθετα που χρησιμοποίησαν. Ταυτόχρονα, αναφέρουν πως ο μετακαολίνης συνδέεται με αύξηση της ανθεκτικότητας, ενώ την ίδια στιγμή είναι ένα εξαιρετικά οικολογικό πρόσθετο, καθώς οδηγεί στην παραγωγή πολύ λιγότερου διοξειδίου του άνθρακα από ότι το τσιμέντο. Τέλος, επισημαίνουν πως η χρήση προσθέτων στο σκυροδέμα, και ιδιαίτερα του μετακαολίνης, συστήνεται, καθώς είναι πολύ πιο φιλικό προς το περιβάλλον, ενώ πληρούν όλες τις απαραίτητες προδιαγραφές που χρειάζεται μια απαιτητική κατασκευή.

Παράλληλα, οι Kim Hung Mo et al (2017) επιβεβαιώνουν και αυτοί τις ευεργετικές ιδιότητες του μετακαολίνης στην σύνθεση ελαφρού σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, και η δική τους έρευνα δείχνει πως ο μετακαολίνης προκαλεί αύξηση αντοχής, αρκεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρά ποσοστά. Αυτοί είχαν τα καλύτερα αποτελέσματα όταν το ποσοστό του μετακαολίνης κυμαινόταν μεταξύ 10% και 15%. Την ίδια στιγμή, κάνουν λόγο για την σημαντική συνδρομή της στην αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Καταγράφουν πως ο μετακαολίνης μειώνει σε καλό βαθμό την τριχοειδή απορρόφηση, αλλά και την διαπερατότητα. Επιπλέον, ενισχύει την θερμική μόνωση του σκυροδέματος, αφού μειώνει την μεταφορά θερμότητας. Τέλος, μειώνει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διάβρωση του σκυροδέματος, όπως δείχνει και ο

**Πίνακας 3.4.**



Σχήμα 3.4: Επίδραση του μετακαολίνη στην διάβρωση του ελαφρού σκυροδέματος (Kim Hung Mo et al (2017))

Τέλος, σε παρόμοια αποτελέσματα οδηγήθηκαν και οι Oguzhan Kelestemur et al (2015), οι οποίοι ασχολήθηκαν αποκλειστικά με την επίδραση του μετακαολίνη στο ελαφρό σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, συμπέραναν πως συνδράμει στην αύξηση της αντοχής, ενώ αυτοί κατέληξαν στο 15% ως το βέλτιστο ποσοστό μετακαολίνη. Επιπρόσθετα, επιβεβαιώνουν το συμπέρασμα των Kim Hung Mo et al., πως ο μετακαολίνης προκαλεί μείωση της τριχοειδούς απορρόφησης και της διαπερατότητας. Ακόμα, επισημαίνουν πως οδηγεί σε σημαντική αύξηση της ανθεκτικότητας, αλλά και σε μείωση της διάβρωσης με ποσοστό συμμετοχής του μετακαολίνη ως 15%, μετά από το οποίο δεν υπήρχε περαιτέρω βελτίωση. Συμπερασματικά, ο μετακαολίνης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της αντοχής και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, όταν χρησιμοποιείται στα κατάλληλα ποσοστά.

## Κεφάλαιο 4: Πειραματικό Μέρος

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται 11 διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος ως προς την ανθεκτικότητα, αλλά και την αντοχή τους. Για την ακρίβεια, εξετάζονται συνθέσεις ελαφρού σκυροδέματος, το οποίο αξιοποιεί κίσηρη ως αδρανές, αλλά και η επιρροή που ασκεί η προσθήκη μετακαολίνη και πυριτικής παιπάλης στις συνθέσεις αυτές.

Η ανθεκτικότητα, συγκεκριμένα, προσεγγίζεται από τον προσδιορισμό της διαπερατότητας σε νερό, που προκύπτει από τον υπολογισμό του ανοιχτού πορώδους, αλλά και από τον προσδιορισμό της διαπερατότητας σε χλωριόντα. Ο τελευταίος προκύπτει από τον υπολογισμό της διάχυσης χλωριόντων μέσω της μεθόδου NT 492.

Στη συνέχεια ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των αποτελεσμάτων που αξιοποιούνται για τον προσδιορισμό του πορώδους, αλλά και της διάχυσης και διείσδυσης των χλωριόντων. Η διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας έλαβε χώρα στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

### 4.2 Υλικά και συνθέσεις δοκιμών

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας, έγινε παραγωγή έντεκα (11) συνθέσεων. Από αυτές, μια αποτελούσε σύνθεση αναφοράς συμβατικού σκυροδέματος, ενώ οι υπόλοιπες δέκα (10) ήταν από ελαφρό σκυρόδεμα, χρησιμοποιώντας την κίσηρη ως αδρανές.

Συγκεκριμένα, οι διαφορές των δέκα (10) αυτών συνθέσεων ήταν η προσθήκη μετακαολίνη και πυριτικής παιπάλης, αλλά και η επιρροή των ασβεστολιθικών αδρανών (Ca). Για την ακρίβεια, δίχως ασβεστολιθικά αδρανή (Ca) δοκιμάστηκε μια σύνθεση ελαφρού σκυροδέματος με κίσηρη, δύο συνθέσεις με την προσθήκη μετακαολίνη στη θέση του τσιμέντου σε ποσοστά δέκα (10%) και είκοσι (20%) τις εκατό, και δύο συνθέσεις όπου το τσιμέντο αντικαθίσταται από πυριτική παιπάλη, πάλι σε ποσοστά ίσα με δέκα (10%) και είκοσι (20%) τις εκατό. Στη συνέχεια έγινε επανάληψη των ίδιων συνθέσεων, αλλά αυτή τη φορά με την παρουσία ασβεστολιθικών αδρανών (Ca).

Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των συνθέσεων που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας. Χρησιμοποιείται ο συμβολισμός PePu για κάθε σύνθεση από ελαφρό σκυρόδεμα με την αξιοποίηση της κίσηρης και PeCaPu για τον συμβολισμό των αντίστοιχων συνθέσεων με την παρουσία ασβεστολιθικών αδρανών (Ca). Τα πρόσθετα αναγράφονται στη συνέχεια, όταν υπάρχουν, με το συμβολισμό MK για το μετακαολίνη και SF για την πυριτική παιπάλη, ακολουθημένα από το ποσοστό συνεισφοράς τους. Έτσι, παραδείγματος χάριν, PePu MK20 είναι η σύνθεση ελαφρού σκυροδέματος, δίχως ασβεστολιθικά αδρανή, στην οποία ο μετακαολίνης αντικαθιστά το τσιμέντο σε ποσοστό της τάξεως του είκοσι τις εκατό (20%).

Πίνακας 4.1: Συνθέσεις σκυροδέματος με σταθερό λόγο N/T = 0,40

Συστατικό	Κωδικός Σύθεσης					
		PePu	PePu-MK10	PePu-SF10	PePu-MK20	PePu-SF20
C	-	400	360	360	320	320
MK	-	-	40	-	80	-
SF	-	-	-	40	-	80
Ca	-	-	-	-	-	-
Pu	-	843	843	843	843	843
Pe	-	149	149	149	149	149
SP	-	1,8	3,2	2,3	3,6	4
w/c	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Συστατικό	Κωδικός Σύθεσης					
	REF	PeCaPu	PeCaPu-MK10	PeCaPu-SF10	PeCaPu-MK20	PeCaPu-SF20
C	400	400	360	360	320	320
MK	-	-	40	-	80	-
SF	-	-	-	40	-	80
Sand	942	-	-	-	-	-
Ca	565	55	55	55	55	55
Ca (0,16mm)	377	-	-	-	-	-
Pu	-	435	435	435	435	435
Pe	-	546	546	546	546	546
SP	0,5	3,1	4	6,5	4,6	6,8
w/c	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

### 4.3 Μέτρηση θλιπτικής αντοχής

Αναπόσπαστο τμήμα της πειραματικής διαδικασίας, στην οποία υποβλήθηκαν οι συνθέσεις, αποτελεί και η μέτρηση της θλιπτικής τους αντοχής. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν υπέστησαν δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, με στόχο τον ακριβή υπολογισμό της θλιπτικής τους αντοχής ( $f_c$ ), όταν έφτασαν τις ηλικίες των 28 και 90 ημερών.

Πρώτο στάδιο της διαδικασίας αυτής, ωστόσο, αποτελεί ο προσδιορισμός της πικνότητας των δοκιμίων. Τα δοκίμια είχαν ίδιο όγκο ίσο με 1000 κυβικά εκατοστά, ενώ για



τον υπολογισμό της πυκνότητας αρκεί ο προσδιορισμός του βάρους των δοκιμίων, ο οποίος γίνεται ζυγίζοντάς τα σε μια ζυγαριά ακριβείας.

Η αντοχή σε θλίψη υπολογίζεται μέσω του παρακάτω τύπου:

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

όπου:

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

$P_{max}$ : το μέγιστο φορτίο που ασκείται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου σε Newton (N),

$bd$ : το εμβαδόν του δοκιμίου σε  $mm^2$

Στη συγκεκριμένη έρευνα, για να προσδιοριστεί η θλιπτική αντοχή έγινε χρήση της διάταξης WykyhamFarance, συνολικής δυναμικότητας 3 MN. Η διαδικασία θραύσης του δοκιμίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.1):



**Εικόνα 4.1: Διαδικασία θραύσης του δοκιμίου με σκοπό τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής  $f_c$**

## 4.4 Ανοιχτό Πορώδες

Η μελέτη της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος προϋποθέτει και την εξέταση της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος, η οποία με τη σειρά της προσδιορίζεται από τον υπολογισμό πρώτον του ανοιχτού πορώδους, αλλά και δεύτερον της τριχοειδούς απορρόφησης. Προκειμένου να υπολογιστεί το ανοιχτό πορώδες, συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα παράγωγα των κυλινδρικών δοκιμών, τα οποία κόπηκαν με ειδικό τροχό, σε διαστάσεις  $\Phi 100 \times 20$  mm. Χρησιμοποιήθηκαν δύο κύλινδροι από κάθε σύνθεση, με σκοπό την προσέγγιση πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Το ανοιχτό πορώδες ελέγχθηκε με βάση τους κανονισμούς του αμερικάνικου πρότυπου *ASTM C 642* (1997). Συγκεκριμένα, τα δοκίμια, που συντηρούνταν αποκλειστικά σε δεξαμενή νερού, όταν έφταναν την ηλικία ελέγχου, δηλαδή τις 28, τις 90 και τις 215 ημέρες, ζυγίζονταν σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Για την ακρίβεια, η πρώτη ζύγιση γινόταν σε κορεσμένο δοκίμιο, αμέσως αφού βγει από τη δεξαμενή συντήρησης, προκειμένου να προσδιοριστεί η μάζα κορεσμένου δοκιμίου  $M_{sat}$ . Η δεύτερη ζύγιση αφορά το ίδιο δοκίμιο μέσα στο νερό υπό άνωση, ώστε να προσδιοριστεί η μάζα υπό άνωση ( $M_{imm}$ ). Η τρίτη ζύγιση γίνεται αφού ακολουθήσει ξήρανση του δοκιμίου και σταθεροποίηση του βάρους του, σε περιβάλλον αέρα ( $M_{dry}$ ). Το βάρος του δοκιμίου θεωρείται σταθεροποιημένο όταν η απόκλιση βάρους του μεταξύ 24 ωρών είναι μικρότερη του 0.1%.

Η ακριβής τιμή του ανοιχτού πορώδους προκύπτει μέσω των τεσσάρων παρακάτω εξισώσεων:

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

όπου:

$V_o$ : πρόκειται για τον όγκο ανοιχτών πόρων ( $m^3$ ),

$\rho_w$ : πρόκειται για το ειδικό βάρος του νερού σε συνήθη θερμοκρασία ( $18^\circ C$ ), όπου στους υπολογισμούς θεωρείται ίσο με  $1000 \text{ kg}/m^3$ .

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

όπου

$V_\varphi$ : ο φαινόμενος όγκος ( $m^3$ )

$$d\varphi = \frac{pw \times M_{dry}}{M_{sat} - M_{imm}} \quad (4.4)$$

όπου,

$d\varphi$ : η φαινόμενη πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ )

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

όπου,

OP: το ανοιχτό πορώδες

## 4.5 Τριχοειδής απορρόφηση

Ο δεύτερος παράγοντας που απαιτείται για τη μελέτη της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος, είναι ο συντελεστής της τριχοειδούς απορρόφησης. Το πείραμα που επιτελείται για τον προσδιορισμό αυτού γίνεται με βάση την οδηγία της RILEM (TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of durability).

Συγκεκριμένα, τα δοκίμια  $\Phi 100 \times 20$  mm καλύπτονται περιμετρικά με αδιάβροχη ταινία, η οποία έχει ύψος 20 mm, με στόχο την αποφυγή απορρόφησης νερού από το πλάι. Αμέσως μετά τοποθετούνται σε δεξαμενή νερού, με τέτοιο τρόπο ώστε να βρέχεται πλήρως η πλευρά έδρασή τους, αλλά και να βρίσκεται 5mm ψηλότερα από αυτή η στάθμη του νερού. Στη συνέχεια, ακολουθούν συνεχείς μετρήσεις του βάρους του δοκιμίου σε διαφορετικούς χρόνους, προκειμένου να υπολογιστεί η τριχοειδής απορρόφηση του κάθε δοκιμίου. Στην **Εικόνα 4.2** παρατίθεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα χρόνων ζύγισης για 6 δοκίμια:



**Εικόνα 4.2: Δοκίμια κατά τη διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης**

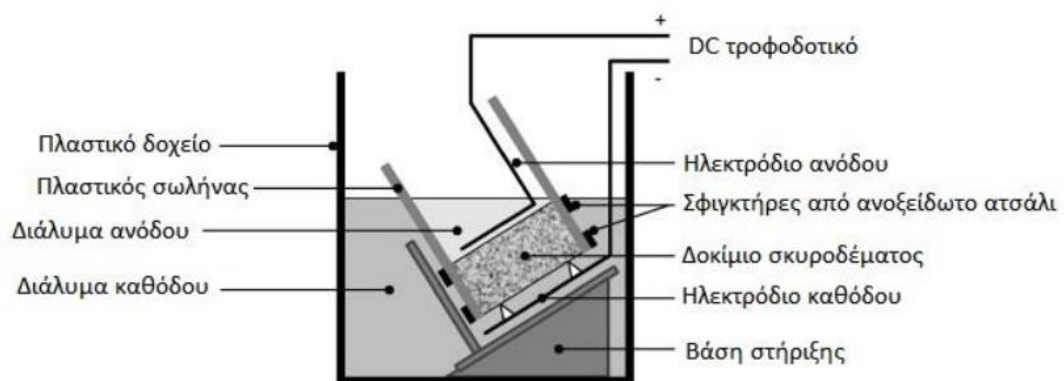
#### 4.6 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης

Μια επιπλέον παράμετρος της ανθεκτικότητας που εξετάζεται στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας αποτελεί η διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό προσδιορίζεται ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non steady state chloride migration coefficient)  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s), με βάση τους κανονισμούς της πρότυπης επιταχυνόμενης μεθόδου NordTest Build492 (1999). Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα γίνει αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του συντελεστή αυτού.

Συγκεκριμένα, για τη μέθοδο NT 492 χρησιμοποιούνται δύο κυλινδρικά δοκίμια  $\Phi 100$ , με ύψος 50 χιλιοστά το καθένα. Πριν την έναρξη του πειράματος, απαραίτητη καθίσταται η συντήρηση των δοκιμών σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) για ένα διάστημα είκοσι τεσσάρων ωρών. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, στόχος αποτελεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων (chloride migration coefficient), ο οποίος προκύπτει μέσω της εξαναγκασμένης κίνησης των χλωριόντων. Η διάταξη απεικονίζεται στις **Εικόνες 4.3, 4.4:**



Εικόνα 4.3: Ηλεκτρική διάταξη δοκιμής NT 492



Εικόνα 4.4: Διάταξη της δοκιμής NT 492

Στη συνέχεια της δοκιμής, ένα τμήμα του κυλινδρικού δοκιμίου παραμένει, κάνοντας χρήση της σωστής διάταξης ηλεκτροδίων, υπό σταθερή διαφορά δυναμικού, μεταξύ 10 και 60 V DC για ένα χρονικό διάστημα από 6 έως και 96 ώρες. Το σύνηθες, ωστόσο, είναι να παραμείνει σε αυτή την κατάσταση για 24 ώρες, όπως και έγινε και στην παρούσα έρευνα. Παράλληλα, η επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού, αλλά και η χρονική διάρκεια της δοκιμής, προσδιορίζεται με βάση το αρχικώς διερχόμενο ρεύμα που προκύπτει από μια δοκιμαστική διαφορά δυναμικού ίση με 30 V DC. Ο πίνακας που προσδιορίζει τα στοιχεία αυτά παρατίθεται εδώ:

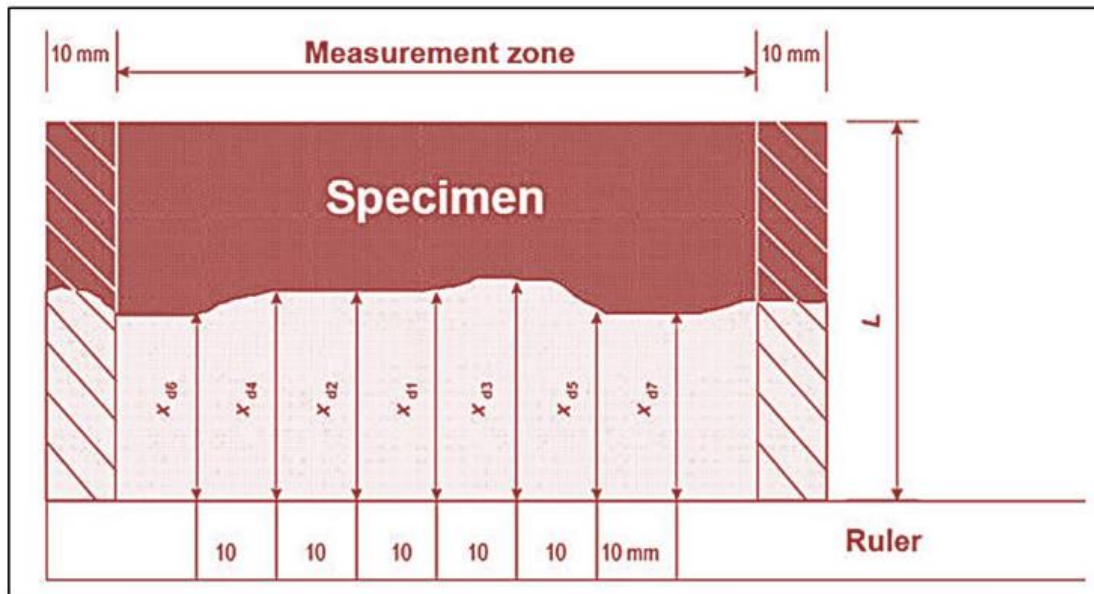
Πίνακας 4.2: Διάρκεια δοκιμής και διαφορά δυναμικού (πηγή: Nordtest Build 492 (1999))

Αρχικό ρεύμα από σταθερή διαφορά δυναμικού	Επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού (κατόπιν ρύθμισης) (V)	Πιθανό νέο ρεύμα $I_0$	Διάρκεια δοκιμής t
30 V dc (mA)		(mA)	(h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$50 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$360 \leq I_0$	10	$120 \leq I_0$	6

Όπως είναι διακριτό και από τις **Εικόνες 4.3** και **4.4**, το δοκίμιο παρατίθεται μεταξύ δύο διαφορετικών διαλυμάτων. Το διάλυμα καθόδου αποτελείται από 10% χλωριούχο νάτριο και 90% νερό βρύσης. Παράλληλα, το διάλυμα ανόδου απαρτίζεται από 0.3 N υδροξείδιο του νατρίου (NaOH). Ακολουθώντας τις προδιαγραφές της μεθόδου, καταγράφονται η θερμοκρασία που έχει το διάλυμα ανόδου, το διερχόμενο ρεύμα και η ηλεκτρική αντίσταση που έχει το δοκίμιο.

Παράλληλα, προκειμένου να προσδιοριστεί το βάθος της διείδυσης των χλωριόντων, αξιοποιείται η χρωματογραφική μέθοδος, μέσω της οποίας προσδιορίζεται και ο συντελεστής διείδυσης χλωριόντων. Για την ακρίβεια, μετά το πέρας της δοκιμής, γίνεται αξονικός διαχωρισμός του δοκιμίου σε δύο τεμάχια, μέσω διάρρηξης (**Εικόνα 4.6**). Μετά το διαχωρισμό αυτό (Εικόνα 4.7), και τα δύο μέρη δέχονται ψεκασμό από διάλυμα 0.1 M νιτρικού αργύρου AgNO<sub>3</sub>. Το διάλυμα αυτό προκαλεί την αλλαγή χρώματος της περιοχής του δοκιμίου, στην

οποία έχουν διεισδύσει τα χλωριόντα. Έτσι είναι πλέον εύκολη η μέτρηση της διείσδυσης, με τη βοήθεια ενός χάρακα. Μετρώνται συνολικά 7 σημεία σε κάθε δοκίμιο, ένα στη μέση του και μετά προχωρώντας προς τα έξω κατά ένα εκατοστό προς κάθε κατεύθυνση. Η αλλαγή χρώματος προκύπτει λόγω της χημικής αντίδρασης των χλωριόντων και του νιτρικού αργύρου, που οδηγεί σε σχηματισμό χλωριούχου αργύρου. Η διαδικασία φαίνεται και στην **Εικόνα 4.5**.



**Εικόνα 4.5:** Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης των χλωριόντων





**Εικόνα 4.6: Θραύση δοκιμίου σε διάρρηξη**



**Εικόνα 4.7: Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση του ψεκασμού με διάλυμα νιτρικού αργύρου**

Ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων (Chloride Migration Coefficient), προκύπτει από τους ακόλουθους τύπους:

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \times xd - \frac{a \times \sqrt{xd}}{t} \quad (4.6)$$

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

$$a = 2 \times \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \times \operatorname{erf}^{-1} \times \frac{1-2 \times cd}{co} \quad (4.8)$$

όπου,

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

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

F: ορίζεται ως η σταθερά του Faraday,  $F = 9.648 \times 10^4 J / (V, mol)$ ,

U: ορίζεται ως η απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V),

R: ορίζεται ως η παγκόσμια σταθερά αερίων,  $R = 8.314 J / (V, mol)$ ,

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

L: ορίζεται ως το πάχος του δοκιμίου (mm),

$xd$ : ορίζεται ως η μέση τιμή των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων (mm),

t: ορίζεται ως η διάρκεια του πειράματος (hours),

$c_d$ : ορίζεται ως η συγκέντρωση χλωριόντων που προκαλεί αλλαγή χρώματος,  $c_d = 0.07N$ ,

$c_o$ : ορίζεται ως η συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα καθόδου,  $c_o = 2N$ ,

Συγκεκριμένα στο σκυρόδεμα, ανάλογα πάντα με την τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής διείσδυσης, είναι δυνατό να κατηγοριοποιηθούν τα δοκίμια ως προς την αντίστασή που παρουσιάζουν στη διείσδυση χλωριόντων, ακολουθώντας την κατηγοριοποίηση των Nilson et al (1998), η οποία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.3: Κατηγοριοποίηση του σκυροδέματος ως προς την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων, με κριτήριο την τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής διείσδυσης

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)

Παράλληλα, στις **Εικόνες 4.8** και **4.9** φαίνεται η διαφορά μεταξύ διαφορετικών επιπέδων απορροφητικότητας (extremely high και high).



**Εικόνα 4.8: Δοκίμια με αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων extremely high**



**Εικόνα 4.9: Δοκίμια με αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων high**



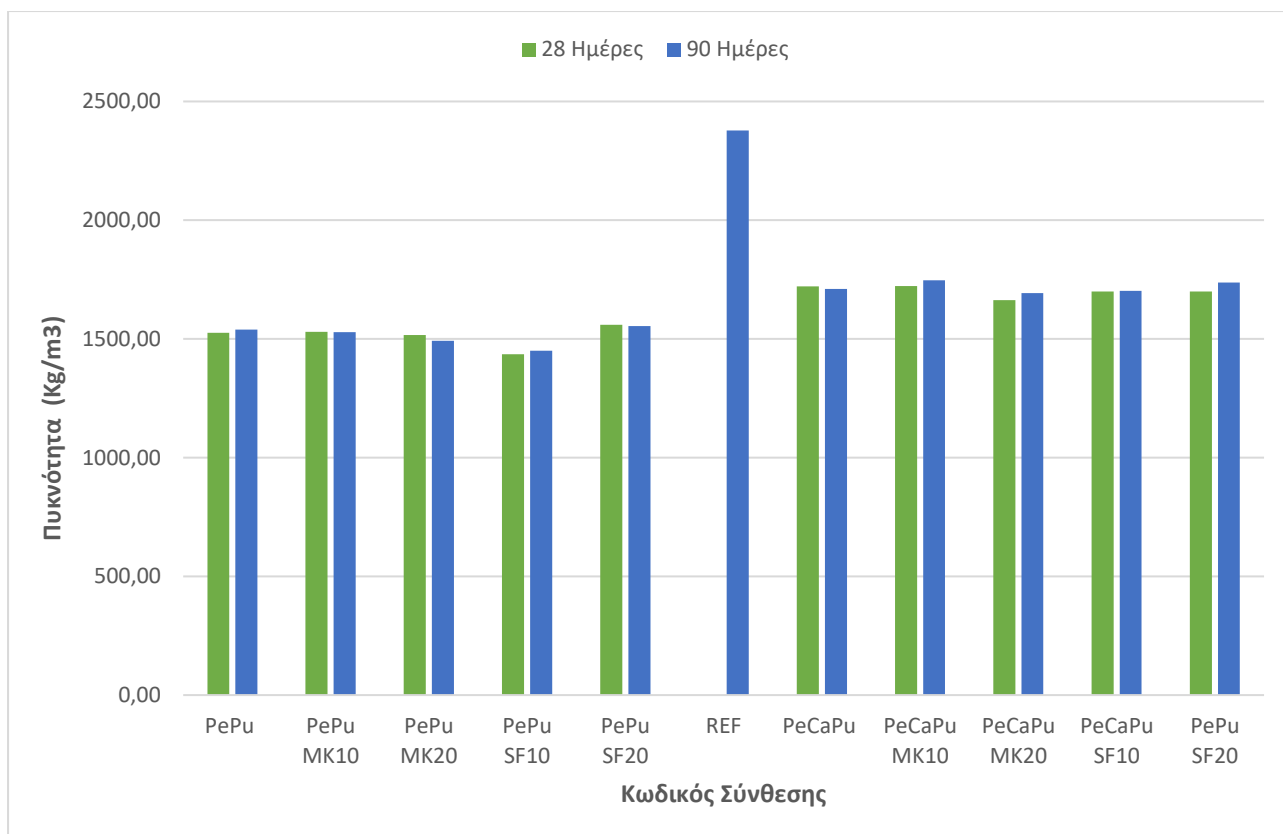
## Κεφάλαιο 5: Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

### 5.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Η πυκνότητά του σκυροδέματος, αποτελεί ένα από τα φυσικά χαρακτηριστικά του που συνδέεται άμεσα με τις υπόλοιπες ιδιότητες του, όπως η αντοχή του. Στον πίνακα 5.1 αναφέρονται οι τιμές της ξηρής πυκνότητας κάθε σύνθεσης, και η τυπική απόκλιση των τιμών τριών διαφορετικών μετρήσεων.

Πίνακας 5.1: Πυκνότητα των συνθέσεων σε ηλικία 28 και 90 ημερών

Κωδικός Σύνθεσης	Πυκνότητα (Kg/m <sup>3</sup> )			
	28 ημέρες		90 ημέρες	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
PePu	1526,33	6,80	1539,06	32,23
PePu MK10	1529,96	4,69	1528,31	11,52
PePu MK20	1516,67	17,02	1491,52	7,54
PePu SF10	1434,98	6,29	1450,30	0,00
PePu SF20	1559,16	19,32	1553,64	9,97
REF	-	0,00	2378,00	25,64
PeCaPu	1720,68	12,36	1710,83	14,39
PeCaPu MK10	1722,51	23,21	1747,31	28,46
PeCaPu MK20	1662,87	33,75	1693,27	8,18
PeCaPu SF10	1700,10	9,14	1702,24	18,05
PeCaPu SF20	1699,78	9,92	1736,91	20,27



**Σχήμα 5.1: Πυκνότητα δοκιμίων μετά από 28 και 90 ημέρες**

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, κατόπιν ωρίμανσης 28 ημερών, οι συνθέσεις PePu και PeCaPu έχουν σημαντικά μειωμένη πυκνότητα συγκριτικά με την REF. Συγκεκριμένα, η σύνθεση δίχως ασβεστολιθικά αδρανή είναι η ελαφρότερη, οδηγώντας σε δραστικά μικρότερο βάρος από το συμβατικό σκυρόδεμα.

Παράλληλα, παρατηρούμε πως όλες οι συνθέσεις χωρίς ασβεστολιθικά αδρανή χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες πυκνότητες. Η καλύτερη μεταξύ τους και πιο ελαφριά σύνθεση είναι η PePu SF10, στην οποία το 10% του τσιμέντου έχει αντικατασταθεί με πυριτική παιπάλη.

Οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή, αντιθέτως, έχουν υψηλότερη πυκνότητα, αλλά σταθερά αποτελούν σημαντική βελτίωση σε σύγκριση με τη REF. Μεταξύ τους, η πιο ελαφριά σύνθεση είναι η PeCaPu MK20, στην οποία το 20% του τσιμέντου έχει αντικατασταθεί με μετακαολίνη.

Σε διάστημα συνολικής ωρίμανσης 90 ημερών, παρατηρούνται μικρές μεταβολές σε όλες τις πυκνότητες. Σταθερά έχουν τις χαμηλότερες πυκνότητες οι συνθέσεις χωρίς την παρουσία ασβεστολιθικών αδρανών, ενώ πιο ελαφριά ανάμεσά τους παραμένει η PePu SF10.

Ταυτόχρονα, στις συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή, χαμηλότερη πυκνότητα συνεχίζει να έχει η PeCaPu MK20.

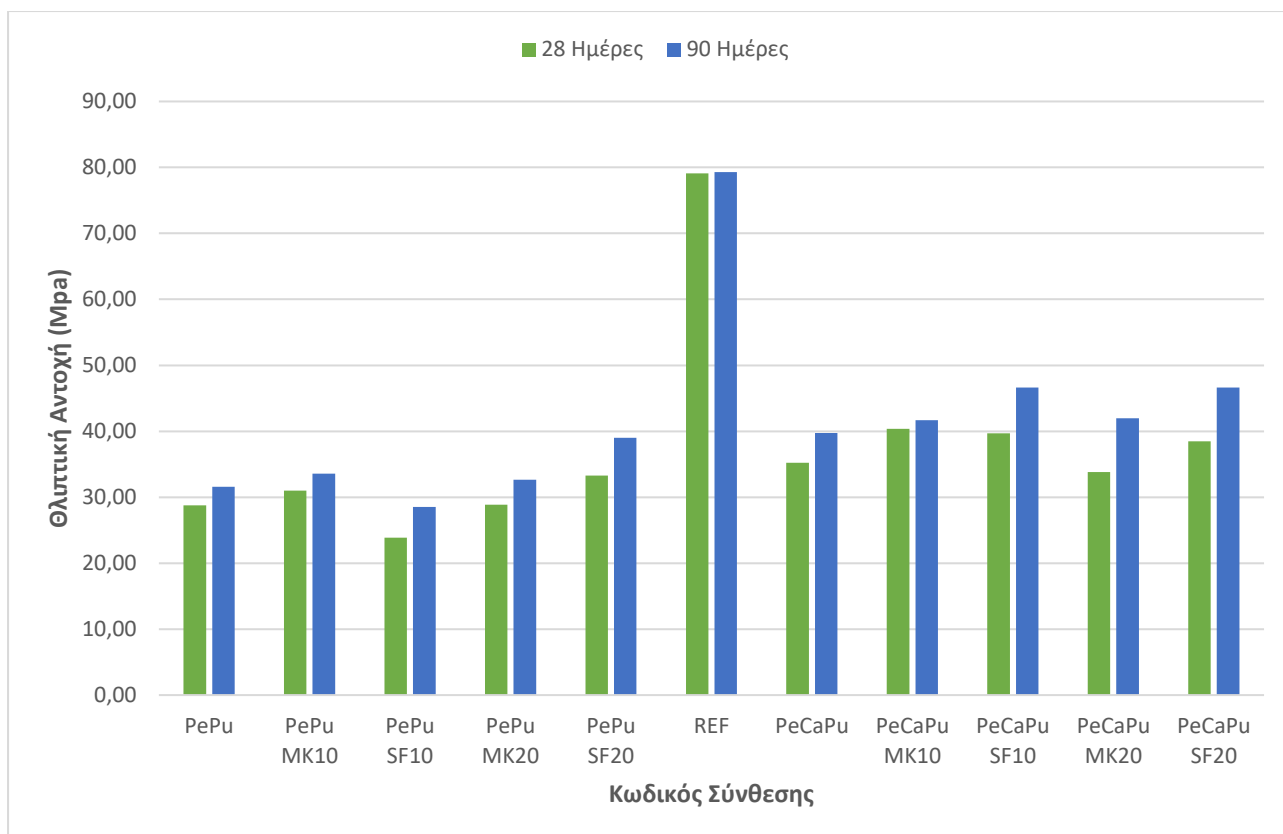
## 5.2 Θλιπτική αντοχή

Σημαντικό τμήμα της έρευνας αποτελεί η θλιπτική αντοχή, καθώς και η μεταβολές που υφίσταται ανά σύνθεση. Στον πίνακα 5.2 φαίνονται αναλυτικά οι θλιπτικές αντοχές κάθε σύνθεσης, ύστερα από ωρίμανση 28 και 90 ημερών:

**Πίνακας 5.2: Θλιπτικές αντοχές των συνθέσεων σε ηλικία 28 και 90 ημερών**

Κωδικος Σύνθεσης	Θλιπτική Αντοχή (MPa)			
	28 ημερών		90 ημερών	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
PePu	28,77	0,52	31,58	1,18
PePu MK10	30,99	1,90	33,58	1,43
PePu SF10	23,84	0,44	28,53	0,00
PePu MK20	28,85	1,84	32,66	1,21
PePu SF20	33,27	1,82	39,01	1,31
REF	79,10	1,36	79,30	3,00
PeCaPu	35,23	1,84	39,74	1,48
PeCaPu MK10	40,37	1,72	41,68	3,16
PeCaPu SF10	39,67	0,21	46,64	1,14
PeCaPu MK20	33,82	3,02	41,99	0,98
PeCaPu SF20	38,49	2,61	46,63	0,11





**Σχήμα 5.2: Θλιπτική αντοχή 28 και 90 ημερών**

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2, κατόπιν ωρίμανσης 28 ημερών, οι συνθέσεις ελαφρού σκυροδέματος PePu και PeCaPu, παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές από τη REF. Καλύτερη από τις δύο είναι η PeCaPu, καθώς διαθέτει πολύ υψηλότερη αντοχή από την PePu, αλλά και υψηλότερη πυκνότητα.

Η παρουσία προσθέτων πυριτικής παιπάλης και μετακαολίνη στις συνθέσεις δίχως ασβεστολιθικά αδρανή ήταν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ευεργετική αναφορικά με την θλιπτική αντοχή, οδηγώντας σε αυξήσεις. Τη σημαντικότερη αύξηση θλιπτικής αντοχής παρουσίασε η PePu SF20, η οποία προσέγγισε σχεδόν την αντοχή της PeCaPu.

Οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή ωφελήθηκαν εξίσου από την παρουσία των προσθέτων, τα οποία τις οδήγησαν όλες σχεδόν σε υψηλότερες θλιπτικές αντοχές. Την υψηλότερη άνοδο εμφάνισε η PeCaPu MK10, η οποία αποτελεί σημαντική βελτίωση από την PeCaPu.

Ύστερα από διάστημα συνολικής ωρίμανσης 90 ημερών, όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν αύξηση της θλιπτικής τους αντοχής, ενώ σταθερά οι συνθέσεις με παρουσία ασβεστολιθικών αδρανών διέθεταν υψηλότερες αντοχές. Καλύτερη σύνθεση από αυτές πλέον είναι οι PeCaPu SF10 και PeCaPu SF20, οι οποίες διακρίνονται από σημαντικά υψηλή

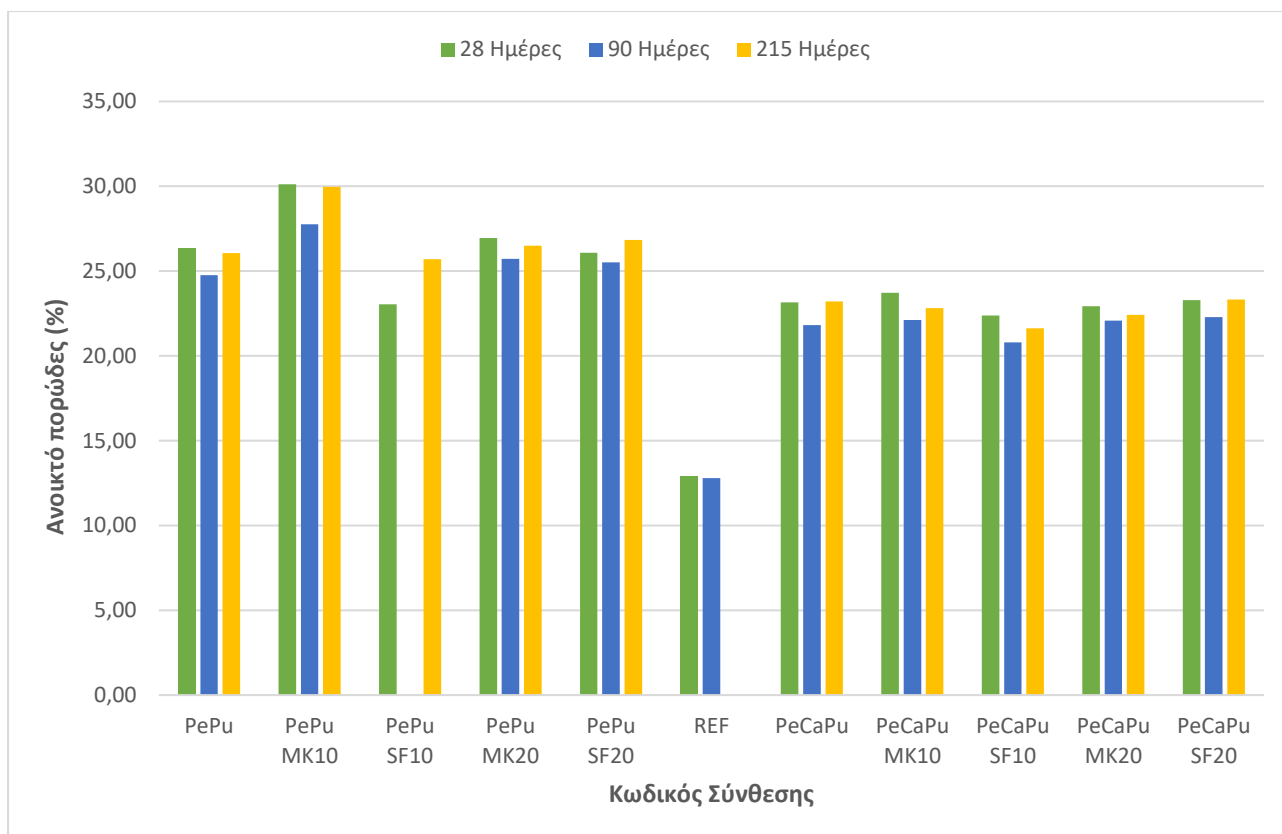
θλιπτική αντοχή, για συνθέσεις ελαφρού σκυροδέματος. Στις συνθέσεις δίχως ασβεστολιθικά αδρανή, καλύτερη παραμένει η PePu SF20.

### 5.3 Ανοιχτό πορώδες

Στις συνθέσεις έχει επίσης υπολογιστεί το ανοιχτό πορώδες, το οποίο είναι βασικός παράγοντας της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Στον πίνακα φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των συνθέσεων για διαστήματα ωρίμανσης 28, 90 και 215 ημερών.

Πίνακας 5.3: Εξέλιξη τιμών ανοικτού πορώδους (μέση τιμή και συντελεστής διακύμανσης) 28, 90 και 215 ημερών

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	28 Ημέρες		90 Ημέρες		215 Ημέρες	
	Ανοικτό πορώδες (%)	Συντελεστής Διακύμανσης CV (%)	Ανοικτό πορώδες (%)	Συντελεστής Διακύμανσης CV (%)	Ανοικτό πορώδες (%)	Συντελεστής Διακύμανσης CV (%)
PePu	26,34	-	24,76	-	26,05	-
PePu MK10	30,11	14,32	27,77	12,15	29,97	15,04
PePu SF10	23,05	12,49	-	-	25,70	1,34
PePu MK20	26,94	2,29	25,72	3,88	26,49	1,69
PePu SF20	26,08	0,99	25,51	3,05	26,83	2,99
REF	12,87	0,66	12,80	-	-	-
PeCaPu	23,16	-	21,82	-	23,21	-
PeCaPu MK10	23,71	2,40	22,11	1,37	22,81	1,75
PeCaPu SF10	22,39	3,32	20,80	4,67	21,62	6,86
PeCaPu MK20	22,92	1,01	22,07	1,18	22,41	3,45
PeCaPu SF20	23,28	0,55	22,28	2,15	23,33	0,50



**Σχήμα 5.3: Συγκριτικό Διάγραμμα Πορώδους 28, 90 και 215 ημερών**

Σε διάστημα 28 ημερών, με βάση τον Πίνακα 5.8, και οι δύο συνθέσεις ελαφρού σκυροδέματος έχουν μεγαλύτερο ποσοστό ανοιχτού πορώδους από το συμβατικό σκυρόδεμα (REF). Ελαφρώς χαμηλότερο ανοιχτό πορώδες έχει η PeCaPu, καθώς και όλες οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή, σε σύγκριση με τις αντίστοιχές τους χωρίς αυτά.

Στις συνθέσεις χωρίς την παρουσία ασβεστολιθικών αδρανών, καλύτερη είναι η PePu SF10, η οποία έχει ανοιχτό πορώδες ίσο με 23.05%. Αποτελεί με αυτό τον τρόπο σημαντική βελτίωση από την PePu, στην οποία το ανοιχτό πορώδες ισούται 26.34%.

Ταυτόχρονα, σε ορισμένες συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή υπήρχε βελτίωση με την παρουσία προσθέτων. Για την ακρίβεια, χαμηλότερο ποσοστό ανοιχτού πορώδους είχε η σύνθεση με 10% ποσοστό πυριτικής παιπάλης, η PeCaPu SF10.

Ύστερα από 90 ημέρες ωρίμανσης, καλύτερη σύνθεση από εκείνες χωρίς ασβεστολιθικά αδρανή ήταν η PePu. Παράλληλα, από τις συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή η μόνη καλύτερη της PeCaPu ήταν η PeCaPu SF10, η οποία είχε χαμηλότερο ανοιχτό πορώδες.

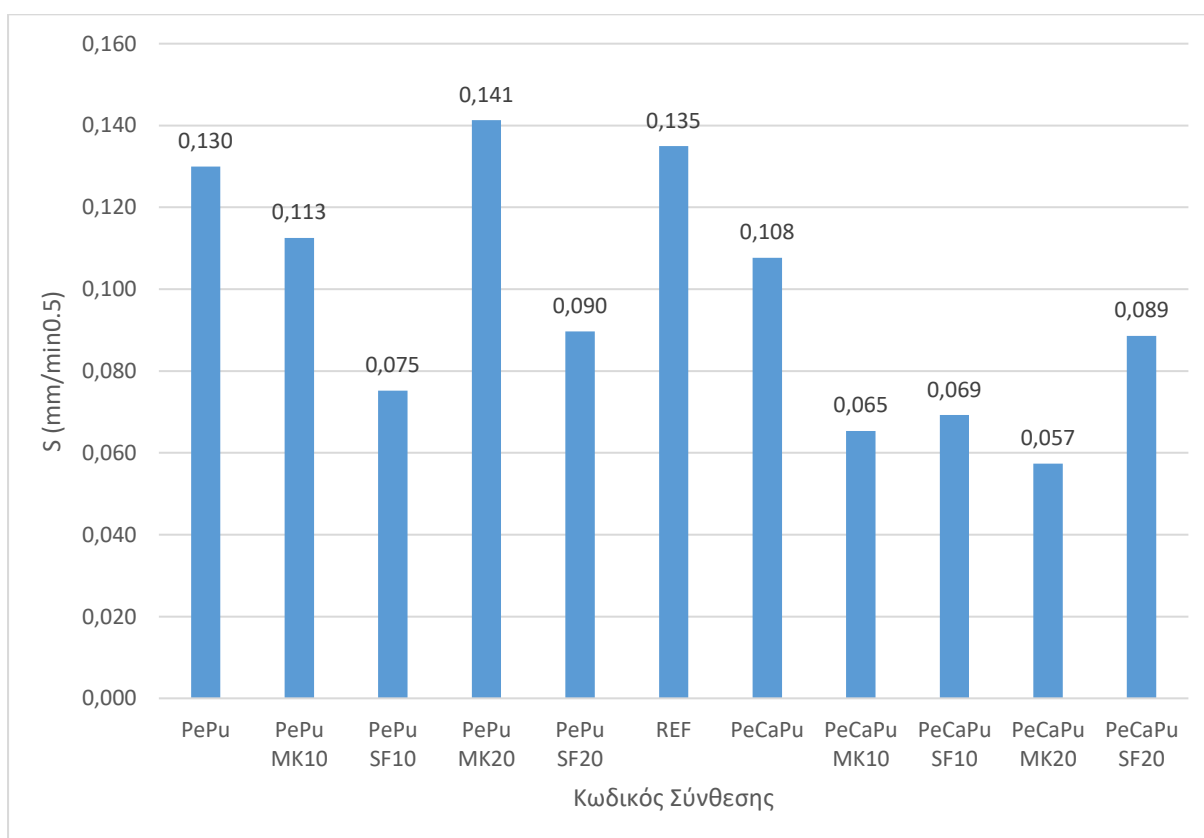
Στις 215 ημέρες, καλύτερη της PePu ήταν μόνο η PePu SF10. Παράλληλα, στις συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή όλες είχαν χαμηλότερο ανοιχτό πορώδες από την PeCaPu, εκτός από την PeCaPu SF20. Το καλύτερο αποτέλεσμα συνολικά επέφερε η PeCaPu SF10, με ανοιχτό πορώδες ίσο με 21.62%. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί πως οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή είχαν χαμηλότερο ανοιχτό πορώδες, ιδιαίτερα όσο αυξάνονταν οι μέρες ωρίμανσης.

#### 5.4 Τριχοειδής απορρόφηση

Η ανθεκτικότητα το σκυροδέματος εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, ένας πολύ σημαντικός εκ των οποίων είναι η τριχοειδής απορρόφηση. Για τον προσδιορισμό αυτής έχει υπολογιστεί ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης κάθε σύνθεσης, ως αποτέλεσμα πειραματικής διαδικασίας, ύστερα από διάστημα ωρίμανσης 28 ημερών. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά οι τιμές του συντελεστή αυτού, αλλά και η απόκλιση των συνθέσεων με μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη, από τις αντίστοιχες τους δίχως πρόσθετα (PePu και PeCaPu). Η αναλυτική διαδικασία μέσω της οποίας προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα φαίνεται στο **Παράρτημα 9.1**.

**Πίνακας 5.4: Συγκριτικός πίνακας τιμών συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης και συντελεστή διακύμανσης των τιμών**

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	S (mm/min0.5)	Διακύμανση(%)
PePu	0,130	
PePu MK10	0,113	13,40
PePu SF10	0,075	42,16
PePu MK20	0,141	8,73
PePu SF20	0,090	30,98
REF	0,135	
PeCaPu	0,108	
PeCaPu MK10	0,065	39,27
PeCaPu SF10	0,069	35,70
PeCaPu MK20	0,057	46,75
PeCaPu SF20	0,089	17,70



**Σχήμα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα τριχοειδούς απορρόφησης**

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 5.5, οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή επιφέρουν καλύτερα αποτελέσματα από τις συνθέσεις χωρίς αυτά. Συγκεκριμένα, η PePu έχει συντελεστή απορρόφησης ίσο με 0.130, ενώ η PeCaPu μόνο 0.108. Ταυτόχρονα, και οι δύο συνθέσεις εμφανίζουν καλύτερο αποτέλεσμα από τη REF. Παράλληλα, η παρουσία προσθέτων και στις δύο περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα ευεργετική στην τριχοειδή απορρόφηση των συνθέσεων.

Για την ακρίβεια, καθώς απαιτείται ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερος, είναι εύκολο να προσδιοριστούν οι συνθέσεις με τη μεγαλύτερη βελτίωση. Συγκεκριμένα, στις συνθέσεις δίχως ασβεστολιθικά αδρανή το καλύτερο αποτέλεσμα επέφερε η σύνθεση με προσθήκη πυριτικής παιπάλης κατά 10% (PePu SF10), η οποία βελτιώθηκε κατά 42.16%. Στις συνθέσεις με παρουσία ασβεστολιθικών αδρανών, το χαμηλότερο συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης είχε η σύνθεση με ποσοστό 20% μετακαολίνη (PeCaPu MK20), ο συντελεστής της οποίας μειώθηκε κατά 46.75%.

Ταυτόχρονα, παρατηρείται βελτίωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης σχεδόν σε όλες τις συνθέσεις με προσθήκη είτε μετακαολίνη, είτε πυριτικής παιπάλης. Επιπλέον, οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή εμφανίζουν καλύτερα αποτελέσματα ως προς την τριχοειδή απορρόφηση, με μέσο συντελεστή των συνθέσεων  $0.0776 \text{ mm/min}^{0.5}$ , φανερά μικρότερο από το μέσο όρο των συντελεστών των συνθέσεων δίχως ασβεστολιθικά αδρανή, που ισούται με  $0.1097 \text{ mm/min}^{0.5}$ .

Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως η προσθήκη πυριτικής παιπάλης επιφέρει αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση, ενώ η προσθήκη μετακαολίνη προκαλεί σημαντική βελτίωση μονάχα με την παρουσία ασβεστολιθικών αδρανών. Αυτό φαίνεται καθώς η πυριτική παιπάλη προκαλεί μέσο ποσοστό βελτίωσης ίσο με 36.57% στην PePu και 26.7% στην PeCaPu. Ο μετακαολίνης από την άλλη προκαλεί σημαντική βελτίωση στην PeCaPu, με μέσο ποσοστό βελτίωσης ίσο με 43.01%, ποσοστό που στην περίπτωση της PePu μειώνεται στο 2.34%.

## 5.5 Διείσδυση χλωριόντων

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες προσδιορισμού της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, ο οποίος έχει μελετηθεί εκτενώς στη συγκεκριμένη έρευνα, είναι η διείσδυση χλωριόντων. Ο τρόπος υπολογισμού της διείσδυσης αυτής στο σκυρόδεμα είναι η μέθοδος NT 492, της οποίας η αναλυτική διαδικασία υπολογισμού αποτελεσμάτων φαίνεται στο **Παράρτημα 9.2**. Τα αποτελέσματα αυτά, ύστερα από ωρίμανση των συνθέσεων κατά 28, 90

και 215 ημερών, καθώς και η κατάταξή τους με κριτήριο την ανθεκτικότητα, φαίνονται αναλυτικά στους πίνακες 5.5 και 5.6:

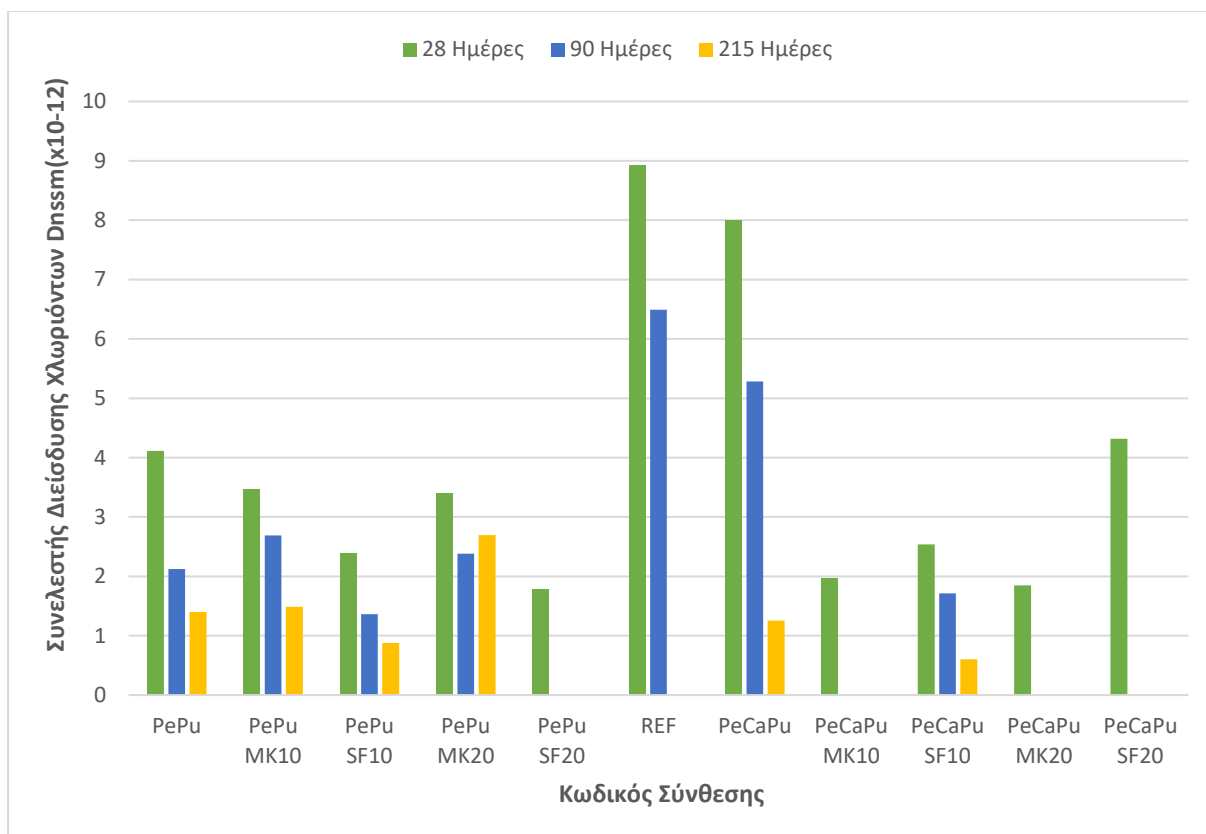
**Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα του συντελεστή διεύθυνσης σε διάστημα 28, 90 και 215 ημερών**

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	28 ημέρες		90 ημέρες		215 ημέρες	
	Dnssm (x10 <sup>-12</sup> ) m <sup>2</sup> /s	CoV (%)	Dnssm (x10 <sup>-12</sup> ) m <sup>2</sup> /s	CoV (%)	Dnssm (x10 <sup>-12</sup> ) m <sup>2</sup> /s	CoV (%)
PePu	4,11	-	2,13	-	1,40	-
PePu MK10	3,47	15,67	2,69	26,40	1,49	6,34
PePu SF10	2,38	42,06	1,36	35,93	0,88	37,19
PePu MK20	3,40	17,30	2,38	12,07	2,70	92,64
PePu SF20	1,78	56,73	-	-	-	-
REF	8,93	-	6,49	-	-	-
PeCaPu	8,00	-	5,28	-	1,25	-
PeCaPu MK10	1,97	75,38	-	-	-	-
PeCaPu SF10	2,54	68,25	1,71	67,61	0,60	51,99
PeCaPu MK20	1,85	76,88	-	-	-	-
PeCaPu SF20	4,32	45,97	-	-	-	-



Πίνακας 5.6: Κατάταξη ανθεκτικότητας των συνθέσεων

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	Κατάταξη		
	28 ημέρες	90 ημέρες	215 ημέρες
PePu	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
PePu MK10	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
PePu SF10	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
PePu MK20	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή
PePu SF20	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
REF	Υψηλή	Υψηλή	-
PeCaPu	Υψηλή	Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
PeCaPu MK10	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
PeCaPu SF10	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
PeCaPu MK20	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
PeCaPu SF20	Πολύ Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή



**Σχήμα 5.5: Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων σε διάστημα 28, 90 και 215 ημερών**

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, γίνεται ξεκάθαρη η εξαιρετική ανθεκτικότητα των συνθέσεων ελαφρού σκυροδέματος ως προς τη διείσδυση χλωριόντων. Αυτό φαίνεται καθώς με εξαίρεση την PeCaPu, η οποία σταθερά υπερτερεί της REF, όλες οι συνθέσεις χαρακτηρίζονται από καλύτερη κατάταξη ανθεκτικότητας από αυτή της σύνθεσης συμβατικού σκυροδέματος. Ταυτόχρονα, η σύνθεση χωρίς ασβεστολιθικά αδρανή, η PePu, έχει σε διάστημα 28 ημερών συντελεστή ίσο με 4.11 και κατάταξη πολύ υψηλής αντίστασης, ενώ η REF συντελεστή ίσο με 8.93 και κατάταξη οριακά υψηλή.

Παράλληλα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα, πως η προσθήκη μετακαολίνη και πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα αυξάνει σημαντικά την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων. Αυτό φαίνεται, καθώς κάθε σύνθεση με πρόσθετα εμφάνισε σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα από την αντίστοιχη της δίχως προσθήκες, και στις δύο κατηγορίες. Συγκεκριμένα, την μικρότερη βελτίωση στις 28 ημέρες είχε η Peru MK20, η οποία βελτιώθηκε κατά 17.3%, ενώ την μεγαλύτερη βελτίωση παρουσίασε η PeCaPu MK20 της οποίας ο συντελεστής μειώθηκε κατά 76.88%. Ταυτόχρονα, η καλύτερη σύνθεση σε διάστημα 28 ημερών είναι η Peru SF20, με συντελεστή ίσο με 1.78 και αντίσταση εξαιρετικά υψηλή.

Επιπλέον, οι συνθέσεις αυτές βελτιώθηκαν σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Για την ακρίβεια, από τα αποτελέσματα των 90 ημερών φαίνεται η ακόμα μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων, ενώ στις 215 ημέρες ωρίμανσης, σχεδόν όλες οι συνθέσεις βρίσκονται στην κατάταξη Extremely High. Αξίζει να σημειωθεί πως κάποιες συνθέσεις δεν έχουν συντελεστή στους πίνακες. Αυτό συμβαίνει καθώς η σύνθεση βρισκόταν στην κατάταξη Extremely High και ο συντελεστής ήταν ιδιαίτερα μικρός με αποτέλεσμα να μην κρίνεται αναγκαίο το χρονοβόρο πείραμα, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις η πειραματική διαδικασία της μεθόδου NT 492 κρατάει σημαντικά περισσότερο.

Παράλληλα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι στην διείσδυση χλωριόντων δεν υπερεβίβασε ξεκάθαρα κάποια από τις δύο κατηγορίες συνθέσεων (με ή χωρίς ασβεστολιθικά αδρανή). Ακόμα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, φαίνεται πως ο μετακαολίνης προκαλεί εξαιρετικά σημαντική βελτίωση στις συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή, αλλά σχετικά μικρή μείωση του συντελεστή στις συνθέσεις χωρίς αυτά. Αντίθετα, η πυριτική παιπάλη παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις, αν και όχι τόσο καλά όσο του μετακαολίνης στην περίπτωση των PeCaPu.

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Στην διπλωματική διερευνήθηκαν οι ιδιότητες συνθέσεων ελαφρού σκυροδέματος, αλλά και η επιρροή της προσθήκης μετακαολίνη και πυριτικής παιπάλης στην αντοχή, αλλά και ιδιαίτερα στην ανθεκτικότητα αυτού.

Ως προς την πυκνότητα, προκύπτει το συμπέρασμα πως το ελαφρό σκυρόδεμα έχει πολύ χαμηλότερη από το συμβατικό. Ταυτόχρονα, τα πρόσθετα οδηγούν σε περαιτέρω μείωση της πυκνότητας. Παράλληλα, οι συνθέσεις χωρίς την παρουσία ασβεστολιθικών αδρανών είχαν σημαντικά μικρότερη πυκνότητα από τις υπόλοιπες.

Αναφορικά με τη θλιπτική αντοχή, η πλειοψηφία των συνθέσεων ωφελήθηκαν από την παρουσία των προσθέτων. Σε διάστημα 28 ημερών, την υψηλότερη θλιπτική αντοχή εμφάνισε η σύνθεση PeCaPu MK10. Στις 90 ημέρες, καλύτερη σύνθεση ως προς την αντοχή ήταν η PeCaPu SF10, ενώ η PeCaPu SF20 ήταν σχεδόν ισοδύναμή της. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή είχαν σημαντικά υψηλότερες αντοχές, αλλά σταθερά όχι τόσο υψηλές όσο η αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος.

Ως προς το ανοιχτό πορώδες, στις 28 ημέρες, με την προσθήκη μετακαολίνη και πυριτικής παιπάλης, βελτίωση επιφέρεται σε ορισμένες συνθέσεις, η καλύτερη εκ των οποίων είναι η PePu SF10. Σε διάστημα 90 ημερών, οι συνθέσεις δίχως πρόσθετα φαίνεται να υπερτερούν, με εξαίρεση την PeCaPu SF10. Παρόλα αυτά, ύστερα από ωρίμανση 90 ημερών, μειώθηκε σημαντικά το ανοιχτό πορώδες όλων των συνθέσεων με ασβεστολιθικά αδρανή. Στις υπόλοιπες συνθέσεις, μονάχα η PePu SF10 είχε καλύτερο αποτέλεσμα από την PePu. Ταυτόχρονα, προκύπτει το συμπέρασμα πως οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή είχαν χαμηλότερο ανοιχτό πορώδες από τις υπόλοιπες, όπως ήταν αναμενόμενο καθώς τα ελαφρά αδρανή έχουν σημαντικά υψηλότερο πορώδες.

Αναφορικά με την τριχοειδή απορρόφηση, η προσθήκη μετακαολίνη και πυριτικής παιπάλης οδήγησαν σε σημαντική βελτίωση. Για την ακρίβεια, όλες οι συνθέσεις με πρόσθετα είχαν χαμηλότερο συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, εκτός από την PePu MK20. Ωστόσο, οι συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή και πάλι εμφάνιζαν χαμηλότερες τιμές συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης από τις PePu.

Ως προς τη διείδυση χλωριόντων, η αντικατάσταση τσιμέντου με πρόσθετα βελτίωσε σημαντικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, σε διάστημα ωρίμανσης 28 ημερών, κάθε σύνθεση με μετακαολίνη ή πυριτική παιπάλης παρουσίασε υψηλότερη αντίσταση στη διείδυση χλωριόντων σε σύγκριση με την αναφορά της (PePu ή PeCaPu). Αξίζει να σημειωθεί πως το καλύτερο αποτέλεσμα είχε η σύνθεση PePu SF20. Στις 90 ημέρες,

οι συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων μειώθηκαν ακόμα περισσότερο, ενώ στις 215 ημέρες όλες οι συνθέσεις με εξαίρεση την PePu MK20 είχαν κατάταξη στην υψηλότερη κατηγορία αντίστασης (Extremely High). Επίσης, δεν υπήρχε ιδιαίτερη διαφοροποίηση μεταξύ των συνθέσεων με ελαφρά και ασβεστολιθικά αδρανή, ως προς αυτή την ιδιότητα.

Αναζητώντας τη σύνθεση με τα καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά στη θλιπτική αντοχή, στις 28 ημέρες καλύτερες συνθέσεις ήταν η PeCaPu MK10 και η PeCaPu SF10. Στις 90 ημέρες, την υψηλότερη θλιπτική αντοχή είχε η PeCaPu SF10. Ως προς το ανοιχτό πορώδες, το χαμηλότερο είχαν οι συνθέσεις PeCaPu SF10 και PeCaPu MK20 και στις 28 και στις 215 ημέρες. Παράλληλα, τον καλύτερο συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης είχαν οι συνθέσεις PeCaPu MK20 και PeCaPu MK10. Επίσης, τη χαμηλότερη διείσδυση χλωριόντων εμφάνισαν σε όλα τα διαστήματα ημερών οι συνθέσεις PePu SF20 και PeCaPu MK20. Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα πως οι δύο καλύτερες συνθέσεις ήταν η PeCaPu SF10 και η PeCaPu MK20.

Συμπερασματικά, με βασικό κριτήριο την η ανθεκτικότητα, φαίνεται ότι η σύνθεση με τη συνολικά υψηλότερη ανθεκτικότητα είναι η PeCaPu MK20. Άρα, η προσθήκη μετακαολίνη βελτιώνει σημαντικά την ανθεκτικότητα του ελαφροσκυροδέματος.

## Κεφάλαιο 7: Προτάσεις Μετεξέλιξης της Ερευνητικής Εργασίας

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία θα ήταν προτεινόμενο να διερευνηθούν εκτενέστερα στο μέλλον.

Συγκεκριμένα, σε αρκετά αποτελέσματα παρατηρήθηκαν διαφορετικές επιδόσεις της πυριτικής παιπάλης και του μετακαολίνης, ανάλογα με την παρουσία ή όχι ασβεστολιθικών αδρανών στη σύνθεση. Για την ακρίβεια, στα περισσότερες μετρήσεις, ο μετακαολίνης φαίνεται να επιφέρει εξαιρετικά αποτελέσματα σε συνθέσεις με ασβεστολιθικά αδρανή, αλλά μικρή βελτίωση στις συνθέσεις ΡεΡυ. Αντίθετα, η πυριτική παιπάλη προκαλεί ικανοποιητική βελτίωση, αν και όχι εξαιρετική, σε όλες τις συνθέσεις. Ωστόσο, η κατανομή αυτή των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να είναι συμπτωματική. Συνεπώς, κρίνεται σημαντικό να μελετηθεί σε βάθος η ακριβής επίδραση των προσθέτων, ανάλογα με την παρουσία ή όχι των ασβεστολιθικών αδρανών.

Παράλληλα, καθίσταται σημαντική η εκπόνηση επιπρόσθετων μελετών που διερευνούν την επίδραση των προσθέτων στην αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Η σχετική βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι η αντικατάσταση τσιμέντου με μετακαολίνης και η πυριτική παιπάλη σε ποσοστά 10% με 20% επιφέρει εξαιρετικά ευεργετική επίδραση στο σκυρόδεμα. Βασικό εμπόδιο, ωστόσο, στη χρήση των ουσιών αυτών αυτή τη στιγμή αποτελεί η τιμή τους. Παρά το κόστος τους ωστόσο, το οποίο ενδέχεται να μειωθεί με την αύξηση της ζήτησης, η βελτίωση της ανθεκτικότητας είναι τόσο σημαντική, που αντισταθμίζει το υψηλό κόστος του σκυροδέματος με τα πρόσθετα.

## Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

1. ACI 222R, 2010. Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. s.l.:American Concrete Institute.
2. Allen, Edward; Iano, Joseph (2013). *Fundamentals of building construction : materials and methods (Sixth ed.)*. Hoboken: John Wiley & Sons. p. 314. ISBN 978-1-118-42086-7.
3. Askarian, Mahya; Fakhretaha Aval, Siavash; Joshaghani, Alireza (22 January 2019). "A comprehensive experimental study on the performance of pumice powder in self-compacting concrete (SCC)". *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. **7** (6): 340–356.
4. Badogiannis E. and Tsvilis S.,2009. Exploitation of poor Greek kaolins: durability of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31, pp.128–133.
5. Bahar Demirel , Oguzhan Kelestemur (2010). Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Safety Journal*.
6. Broomfield, 2006. *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair*. s.l.:2nd Edition. CRC Press
7. Fatih Özcan, Mehmet Emin Koç. (2018). Influence of ground pumice on compressive strength and air content of both non-air and air entrained concrete in fresh and hardened state. *Construction and building materials* 187.
8. Ferrari, L; Kaufmann, J; Winnefeld, F; Plank, J (2011). "Multi-method approach to study influence of superplasticizers on cement suspensions". *Cement and Concrete Research*.
9. Gerry Bye; Paul Livesey; Leslie Struble (2011). "Admixtures and Special Cements". *Portland Cement: Third edition*.
10. Gruber K.A., Ramlochan T., Boddy A., Hooton R.D., Thomas M.D.A., 2001. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Cement & Concrete Composites*, 23, pp. 479- 484.
11. Hamakareem, Madeh Izat. (2020) "Effect of Air Entrainment on Concrete Strength". *The Constructor*.
12. Hargreaves, David (March 2013). "The Global Cement Report 10th Edition". *International Cement Review*.
13. Hesam Madani, Mohammad Naser Norouzifar, Jamshid Rostami. (2018). The synergistic effect of pumice and silica fume on the durability and mechanical

- characteristics of eco-friendly concrete. *Construction and building materials* 174.
14. Holland, Terence C. (2005). "Silica Fume User's Manual" (PDF). *Silica Fume Association and United States Department of Transportation Federal Highway Administration Technical Report FHWA-IF-05-016*.
  15. Kakali, G.; Perraki T.; Tsvivilis S.; Badogiannis E. (2001). "Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity". *Applied Clay Science*.
  16. Kianoosh Samimi, Siham Kamali-Bernard, Ali Akbar Maghsoudi (2018). Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. *Construction and building materials* 165
  17. Kim Hung Mo, Tung-Chai Ling, U. Johnson Alengaram, Soon Poh Yap, Choon Wah Yuen. (2017). Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete. *Construction and building materials* 139.
  18. Kim MY, Yang EI & Yi ST, 2007. Evaluation of Chloride Penetration Characteristics using a Colorimetric Method in Concrete Structures. Toronto: SMiRT 19.
  19. Kosmatka, S.; Kerkhoff, B.; Panerese, W. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures (14 ed.)*. Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
  20. Li, Zongjin (2011). *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons. ISBN 9780470902431.
  21. Li L., Easterbook D., Xia J., Jin W.L., 2015. Numerical simulation of chloride penetration in concrete in rapid chloride migration tests. *Cement and Concrete Composites*, 63, pp. 113-121.
  22. Luther, M. D. 1990. "High-performance silica fume (microsilica)—Modified cementitious repair materials". 69th annual meeting of the Transportation Research Board, paper no. 890448 (January)
  23. Mehta and Monteiro. (1993) *Concrete Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ
  24. Mustafa Saridemir. (2013). Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete. *Construction and building materials* 49.
  25. NT Build 492, 1999. Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiment. Finland: Nordtest



26. Oguzhan Kelestemur, Bahar Demirel. (2015). Effect of metakaolin on the corrosion resistance of structural lightweight concrete. *Construction and building materials* 81.
27. Otsuki N, Nagataki S & Nakashita K, 1993. Evaluation of the AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. s.l.:Construction & Building Materials.
28. Papadakis VG. (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 30, pp. 291- 299). Denmark: Pergamon
29. Papadakis VG. (January 1999). Supplementary cementing materials in concrete- Activity, durability and planning. Taastrup: Final Report to European Commission, Project No. ERBFMBICT961387. Danish Technological Institute.
30. Ramezani pour A. A. and Bahrami J. H., 2012. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, 30, pp.470-479.
31. RILEM TC 116-PCD, 1999. Permeability of Concrete as a criterion of its durability, Bagnaux, France
32. Rubenstein, Madeleine (9 May 2012). *"Emissions from the Cement Industry". State of the Planet. Earth Institute, Columbia University.*
33. Sideris K. K. and Anagnostopoulos N. S., 2013. Durability of normal strength self-compacting concretes and their impact on service life of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 4, pp.491-497
34. Smil, Vaclav (2016). *Making the Modern World: Materials and Dematerialization*. Lulu Press, Inc. ISBN 978-1365581908.
35. Tan Tze Haw, Frank Hart, Ali Rashidi, Pooria Pasbakhsh. (2020). Sustainable cementitious composites reinforced with metakaolin and halloysite nanotubes for construction and building applications. *Applied Clay Science* 188.
36. Taylor PC, Whiting DA, & Nagi MA. (1999). Threshold Chloride Content for Corrosion of Steel in Concrete: A Literature Review (R&D Serial Number ed.). Portland Cement Association.
37. Quang Tran, Pratanu Ghosh. (2020). Influence of pumice on mechanical properties and durability of high performance concrete. *Construction and building materials* 249.
38. Zheng J. J., Zhou X. Z., 2007, Prediction of the chloride coefficient of concrete, *Materials and Structures*, 40, pp.693-701.
39. Αποστολόπουλος Χ, Παπαδάκης ΕΓ & Δέμης Σ., 21-23 Οκτωβρίου 2009. Διερεύνηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα

και της επακόλουθης υποβάθμισης λόγω διάβρωσης οπλισμού από τη δράση χλωριόντων. Πάφος, Κύπρος: 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ.

40. Γκαμαράζης Π. Ε. (2018). Μελέτη παραμέτρων ανθεκτικότητας σκυροδέματος με τσιμεντοειδή πρόσθετα. Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα
41. Κορόζης Η. (2015). Μοντελοποίηση της διάχυσης χλωριόντων σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
42. Μπαδογιάννης Σ., 2002. Αξιοποίηση καολίνων στην τεχνολογία σκυροδέματος. Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
43. Σίδερης Κ, 2010. Ανθεκτικότητα Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος. ISBN: 978-960-8257- 60-3 επιμ. s.l.:Τεκδοτική, ΣΕΛΚΑ - 4Μ ΕΠΕ.

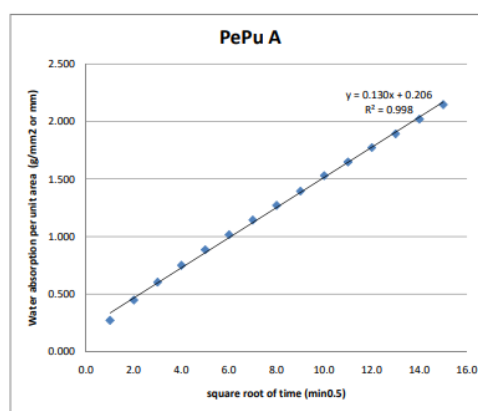
## Κεφάλαιο 9: Παράρτημα

### 9.1 Τριχοειδής απορρόφηση

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της τριχοειδής απορρόφηση, καθώς και οι σχετικοί πίνακες:

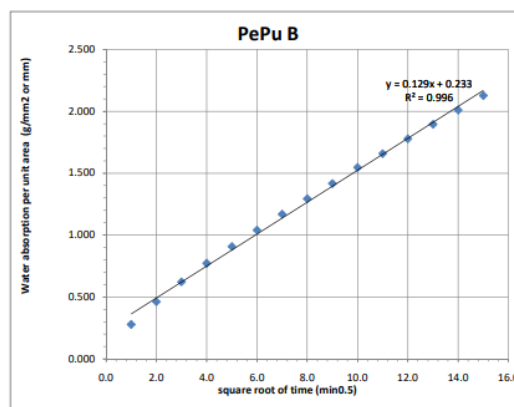
Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Σύνθεση :		PePu					
Ημερομηνία :		16-Jan-20					
W <sub>c</sub> (g) :		285.91					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	288.05	2.14	0.272611	0.2726
2	0:04:00	4	2	289.43	3.52	0.448408	0.2242
3	0:09:00	9	3	290.65	4.74	0.603822	0.2013
4	0:16:00	16	4	291.80	5.89	0.750318	0.1876
5	0:25:00	25	5	292.86	6.95	0.88535	0.1771
6	0:36:00	36	6	293.89	7.98	1.016561	0.1694
7	0:49:00	49	7	294.89	8.98	1.143949	0.1634
8	1:04:00	64	8	295.89	9.98	1.271338	0.1589
9	1:21:00	81	9	296.86	10.95	1.394904	0.1550
10	1:40:00	100	10	297.92	12.01	1.529936	0.1530
11	2:01:00	121	11	298.85	12.94	1.648408	0.1499
12	2:24:00	144	12	299.83	13.92	1.773248	0.1478
13	2:49:00	169	13	300.77	14.86	1.892994	0.1456
14	3:16:00	196	14	301.77	15.86	2.020382	0.1443
15	3:45:00	225	15	302.76	16.85	2.146497	0.1431
16	4:16:00	256	16		-285.91	-36.4217	-2.2764

Regression analysis	
R square :	0.9982
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :	0.1309
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :	0.1729



Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		B					
Σύνθεση :		PePu					
Ημερομηνία :		16-Jan-20					
W <sub>c</sub> (g) :		346.88					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	349.07	2.19	0.278981	0.2790
2	0:04:00	4	2	350.51	3.63	0.46242	0.2312
3	0:09:00	9	3	351.77	4.89	0.62293	0.2076
4	0:16:00	16	4	352.95	6.07	0.773248	0.1933
5	0:25:00	25	5	354.01	7.13	0.90828	0.1817
6	0:36:00	36	6	355.05	8.17	1.040764	0.1735
7	0:49:00	49	7	356.06	9.18	1.169427	0.1671
8	1:04:00	64	8	357.04	10.16	1.294268	0.1618
9	1:21:00	81	9	358.01	11.13	1.417834	0.1575
10	1:40:00	100	10	359.02	12.14	1.546497	0.1546
11	2:01:00	121	11	359.90	13.02	1.658599	0.1508
12	2:24:00	144	12	360.84	13.96	1.778344	0.1482
13	2:49:00	169	13	361.76	14.88	1.895541	0.1458
14	3:16:00	196	14	362.66	15.78	2.010191	0.1436
15	3:45:00	225	15	363.58	16.7	2.127389	0.1418
16	4:16:00	256	16		-346.88	-44.1885	-2.7618

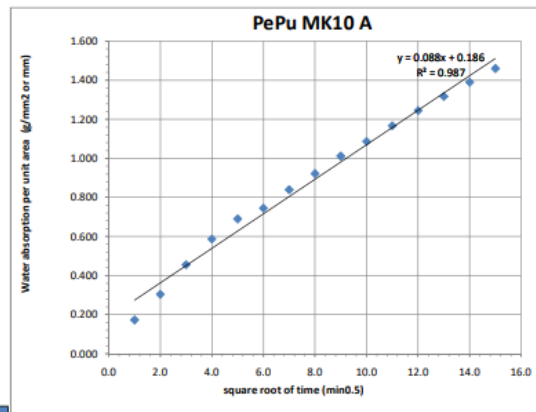
Regression analysis	
R square :	0.9965
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :	0.1290
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :	0.1758



Σχήμα 9.1: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu

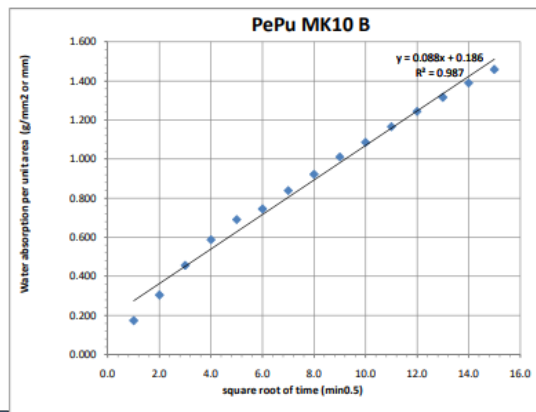
Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptionity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Σύνθεση :		PePu MK10					
Ημερομηνία :		6-Feb-20					
W <sub>s</sub> (g) :		334.72					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	337.22	-60.46	-7.70191	-7.7019
2	0:04:00	4	2	338.75	-58.93	-7.50701	-3.7535
3	0:09:00	9	3	340.22	-57.46	-7.31975	-2.4399
4	0:16:00	16	4	341.26	-56.42	-7.18726	-1.7968
5	0:25:00	25	5	342.23	-55.45	-7.06369	-1.4127
6	0:36:00	36	6	343.18	-54.50	-6.94268	-1.1571
7	0:49:00	49	7	344.07	-53.61	-6.8293	-0.9756
8	1:04:00	64	8	344.98	-52.70	-6.71338	-0.8392
9	1:21:00	81	9	345.80	-51.88	-6.60892	-0.7343
10	1:40:00	100	10	346.59	-51.09	-6.50828	-0.6508
11	2:01:00	121	11	347.44	-50.24	-6.4	-0.5818
12	2:24:00	144	12	348.30	-49.38	-6.29045	-0.5242
13	2:49:00	169	13	349.10	-48.58	-6.18854	-0.4760
14	3:16:00	196	14	349.95	-47.73	-6.08025	-0.4343
15	3:45:00	225	15	350.78	-46.90	-5.97452	-0.3983
16	4:16:00	256	16		-397.68	-50.6599	-3.1662

Regression analysis	
R square :	0.9920
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :	0.1178
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :	-1.5918



Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptionity)							
Αριθμός δοκιμίου :		B					
Σύνθεση :		PePu MK10					
Ημερομηνία :		6-Feb-20					
W <sub>s</sub> (g) :		318.67					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	321.09	-76.59	-9.75669	-9.7567
2	0:04:00	4	2	322.53	-75.15	-9.57325	-4.7866
3	0:09:00	9	3	323.82	-73.86	-9.40892	-3.1363
4	0:16:00	16	4	324.86	-72.82	-9.27643	-2.3191
5	0:25:00	25	5	325.67	-72.01	-9.17325	-1.8346
6	0:36:00	36	6	326.55	-71.13	-9.06115	-1.5102
7	0:49:00	49	7	327.38	-70.30	-8.95541	-1.2793
8	1:04:00	64	8	328.24	-69.44	-8.84586	-1.1057
9	1:21:00	81	9	328.91	-68.77	-8.76051	-0.9734
10	1:40:00	100	10	329.67	-68.01	-8.66369	-0.8664
11	2:01:00	121	11	330.43	-67.25	-8.56688	-0.7788
12	2:24:00	144	12	331.18	-66.50	-8.47134	-0.7059
13	2:49:00	169	13	331.97	-65.71	-8.3707	-0.6439
14	3:16:00	196	14	332.72	-64.96	-8.27516	-0.5911
15	3:45:00	225	15	333.47	-64.21	-8.17962	-0.5453
16	4:16:00	256	16		-397.68	-50.6599	-3.1662

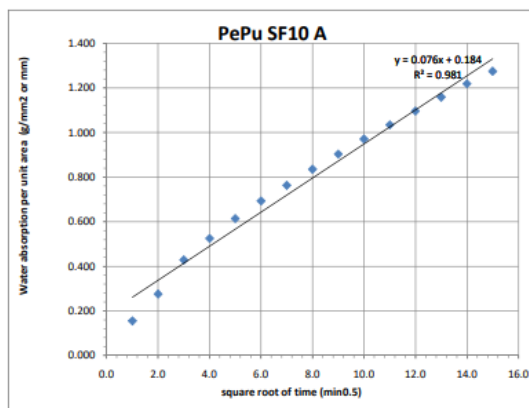
Regression analysis	
R square :	0.9915
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :	0.1073
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :	-2.0556



Σχήμα 9.2: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu MK10

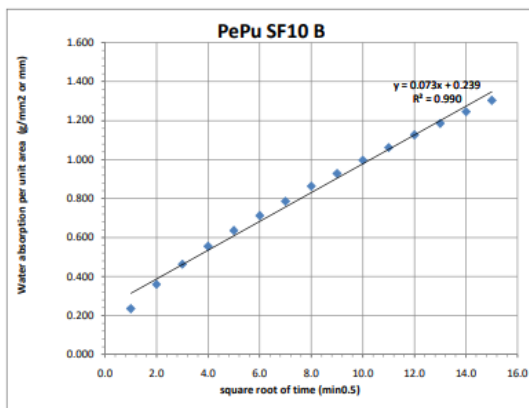
**Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)**

Αριθμός δοκιμίου :		A					
Σύνθεση :		PePu SF10					
Ημερομηνία :		31-Jan-20					
W <sub>s</sub> (g) :		291.27					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	292.48	1.21	0.15414	0.1541
2	0:04:00	4	2	293.43	2.16	0.275159	0.1376
3	0:09:00	9	3	294.63	3.36	0.428025	0.1427
4	0:16:00	16	4	295.39	4.12	0.524841	0.1312
5	0:25:00	25	5	296.09	4.82	0.614013	0.1228
6	0:36:00	36	6	296.71	5.44	0.692994	0.1155
7	0:49:00	49	7	297.26	5.99	0.763057	0.1090
8	1:04:00	64	8	297.83	6.56	0.835669	0.1045
9	1:21:00	81	9	298.36	7.09	0.903185	0.1004
10	1:40:00	100	10	298.89	7.62	0.970701	0.0971
11	2:01:00	121	11	299.39	8.12	1.034395	0.0940
12	2:24:00	144	12	299.88	8.61	1.096815	0.0914
13	2:49:00	169	13	300.37	9.10	1.159236	0.0892
14	3:16:00	196	14	300.84	9.57	1.219108	0.0871
15	3:45:00	225	15	301.28	10.01	1.275159	0.0850
16	4:16:00	256	16		-291.27	-37.1045	-2.3190
Regression analysis							
R square :							0.9813
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :							0.0765
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :							0.1108



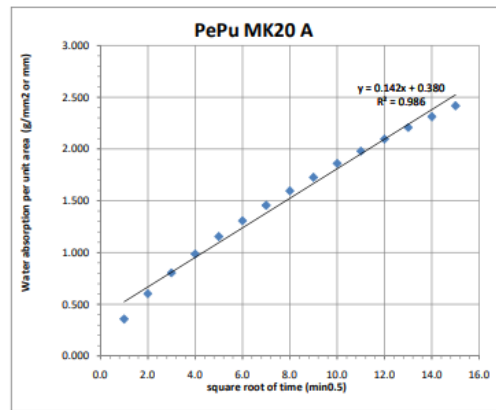
**Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)**

Αριθμός δοκιμίου :		B					
Σύνθεση :		PePu SF10					
Ημερομηνία :		31-Jan-20					
W <sub>s</sub> (g) :		278.81					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	280.65	1.84	0.234395	0.2344
2	0:04:00	4	2	281.63	2.82	0.359236	0.1796
3	0:09:00	9	3	282.44	3.63	0.46242	0.1541
4	0:16:00	16	4	283.16	4.35	0.55414	0.1385
5	0:25:00	25	5	283.80	4.99	0.635669	0.1271
6	0:36:00	36	6	284.40	5.59	0.712102	0.1187
7	0:49:00	49	7	284.97	6.16	0.784713	0.1121
8	1:04:00	64	8	285.58	6.77	0.86242	0.1078
9	1:21:00	81	9	286.09	7.28	0.927389	0.1030
10	1:40:00	100	10	286.63	7.82	0.996178	0.0996
11	2:01:00	121	11	287.14	8.33	1.061146	0.0965
12	2:24:00	144	12	287.65	8.84	1.126115	0.0938
13	2:49:00	169	13	288.11	9.30	1.184713	0.0911
14	3:16:00	196	14	288.58	9.77	1.244586	0.0889
15	3:45:00	225	15	289.04	10.23	1.303185	0.0869
16	4:16:00	256	16		-278.81	-35.5172	-2.2198
Regression analysis							
R square :							0.9904
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :							0.0739
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :							0.1222

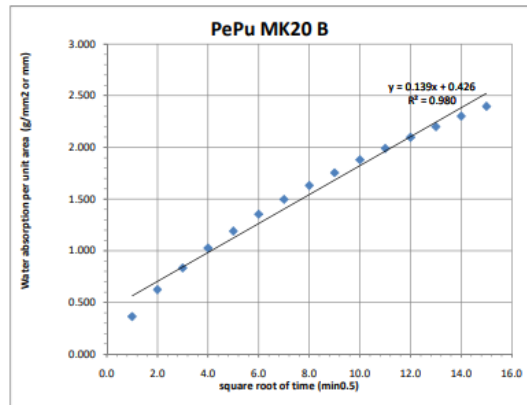


**Σχήμα 9.3: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu SF10**

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Σύνθεση :		PePu MK20					
Ημερομηνία :		16-Jan-20					
W <sub>s</sub> (g) :		288.16					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	290.96	2.80	0.356688	0.3567
2	0:04:00	4	2	292.88	4.72	0.601274	0.3006
3	0:09:00	9	3	294.46	6.30	0.802548	0.2675
4	0:16:00	16	4	295.90	7.74	0.985987	0.2465
5	0:25:00	25	5	297.22	9.06	1.15414	0.2308
6	0:36:00	36	6	298.42	10.26	1.307006	0.2178
7	0:49:00	49	7	299.59	11.43	1.456051	0.2080
8	1:04:00	64	8	300.69	12.53	1.596178	0.1995
9	1:21:00	81	9	301.71	13.55	1.726115	0.1918
10	1:40:00	100	10	302.76	14.60	1.859873	0.1860
11	2:01:00	121	11	303.70	15.54	1.979618	0.1800
12	2:24:00	144	12	304.61	16.45	2.095541	0.1746
13	2:49:00	169	13	305.49	17.33	2.207643	0.1698
14	3:16:00	196	14	306.31	18.15	2.312102	0.1652
15	3:45:00	225	15	307.14	18.98	2.417834	0.1612
16	4:16:00	256	16		-288.16	-36.7083	-2.2943
Regression analysis							
R square :							0.9868
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :							0.1429
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :							0.2171

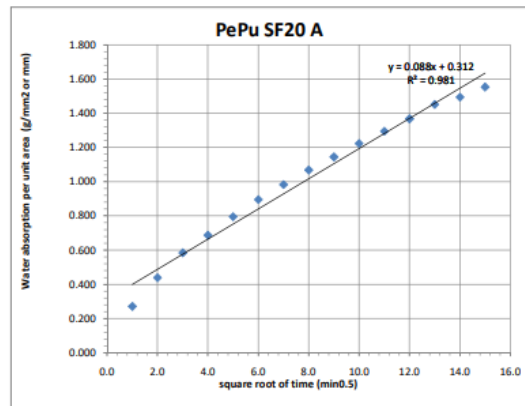


Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		B					
Σύνθεση :		PePu MK20					
Ημερομηνία :		16-Jan-20					
W <sub>s</sub> (g) :		252.46					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	255.33	2.87	0.365605	0.3656
2	0:04:00	4	2	257.37	4.91	0.625478	0.3127
3	0:09:00	9	3	259.02	6.56	0.835669	0.2786
4	0:16:00	16	4	260.53	8.07	1.028025	0.2570
5	0:25:00	25	5	261.82	9.36	1.192357	0.2385
6	0:36:00	36	6	263.10	10.64	1.355414	0.2259
7	0:49:00	49	7	264.23	11.77	1.499363	0.2142
8	1:04:00	64	8	265.28	12.82	1.633121	0.2041
9	1:21:00	81	9	266.25	13.79	1.756688	0.1952
10	1:40:00	100	10	267.23	14.77	1.881529	0.1882
11	2:01:00	121	11	268.09	15.63	1.991083	0.1810
12	2:24:00	144	12	268.94	16.48	2.099363	0.1749
13	2:49:00	169	13	269.74	17.28	2.201274	0.1693
14	3:16:00	196	14	270.54	18.08	2.303185	0.1645
15	3:45:00	225	15	271.29	18.83	2.398726	0.1599
16	4:16:00	256	16		-252.46	-32.1605	-2.0100
Regression analysis							
R square :							0.9801
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :							0.1397
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :							0.2220

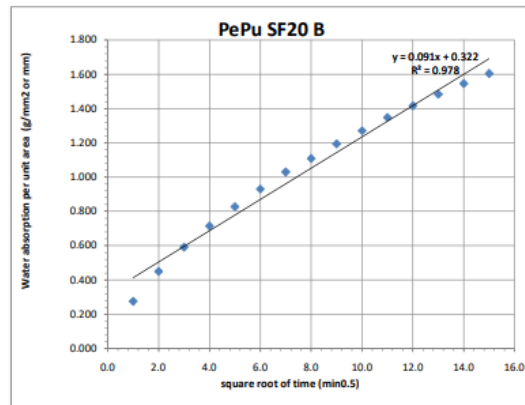


Σχήμα 9.4: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu MK20

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Ένθεση :		PePu SF20					
Ημερομηνία :		16-Jan-20					
W <sub>c</sub> (g) :		268.32					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	270.45	2.13	0.271338	0.2713
2	0:04:00	4	2	271.77	3.45	0.43949	0.2197
3	0:09:00	9	3	272.91	4.59	0.584713	0.1949
4	0:16:00	16	4	273.72	5.40	0.687898	0.1720
5	0:25:00	25	5	274.57	6.25	0.796178	0.1592
6	0:36:00	36	6	275.35	7.03	0.895541	0.1493
7	0:49:00	49	7	276.04	7.72	0.983439	0.1405
8	1:04:00	64	8	276.71	8.39	1.06879	0.1336
9	1:21:00	81	9	277.31	8.99	1.145223	0.1272
10	1:40:00	100	10	277.93	9.61	1.224204	0.1224
11	2:01:00	121	11	278.49	10.17	1.295541	0.1178
12	2:24:00	144	12	279.06	10.74	1.368153	0.1140
13	2:49:00	169	13	279.72	11.40	1.452229	0.1117
14	3:16:00	196	14	280.05	11.73	1.494268	0.1067
15	3:45:00	225	15	280.52	12.20	1.55414	0.1036
16	4:16:00	256	16		-268.32	-34.1809	-2.1363
Regression analysis							
R square :							0.9811
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :							0.0882
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :							0.1496

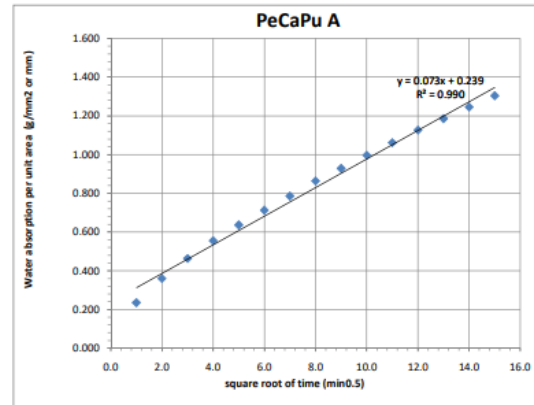


Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		B					
Ένθεση :		PePu SF20					
Ημερομηνία :		16-Jan-20					
W <sub>c</sub> (g) :		308.80					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	310.96	2.16	0.275159	0.2752
2	0:04:00	4	2	312.33	3.53	0.449682	0.2248
3	0:09:00	9	3	313.44	4.64	0.591083	0.1970
4	0:16:00	16	4	314.41	5.61	0.71465	0.1787
5	0:25:00	25	5	315.29	6.49	0.826752	0.1654
6	0:36:00	36	6	316.10	7.30	0.929936	0.1550
7	0:49:00	49	7	316.88	8.08	1.029299	0.1470
8	1:04:00	64	8	317.50	8.70	1.10828	0.1385
9	1:21:00	81	9	318.17	9.37	1.193631	0.1326
10	1:40:00	100	10	318.77	9.97	1.270064	0.1270
11	2:01:00	121	11	319.38	10.58	1.347771	0.1225
12	2:24:00	144	12	319.91	11.11	1.415287	0.1179
13	2:49:00	169	13	320.44	11.64	1.482803	0.1141
14	3:16:00	196	14	320.93	12.13	1.545223	0.1104
15	3:45:00	225	15	321.39	12.59	1.603822	0.1069
16	4:16:00	256	16		-308.80	-39.3376	-2.4586
Regression analysis							
R square :							0.9781
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :							0.0912
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :							0.1542

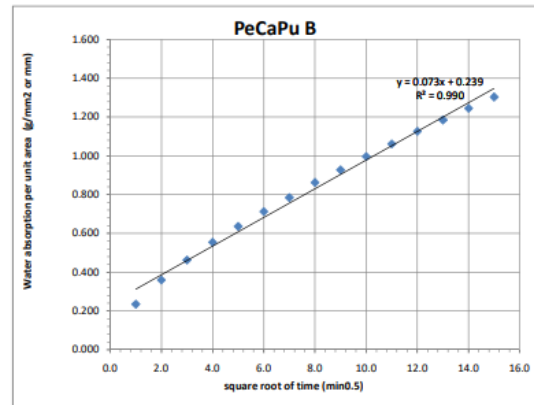


Σχήμα 9.5: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PePu SF20

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Εύθυνση :		PeCaPu					
Ημερομηνία :		31-Jan-20					
W <sub>s</sub> (g) :		377.35					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	379.04	1.69	0.215287	0.2153
2	0:04:00	4	2	379.85	2.50	0.318471	0.1592
3	0:09:00	9	3	380.90	3.55	0.452229	0.1507
4	0:16:00	16	4	381.85	4.50	0.573248	0.1433
5	0:25:00	25	5	382.74	5.39	0.686624	0.1373
6	0:36:00	36	6	383.62	6.27	0.798726	0.1331
7	0:49:00	49	7	384.43	7.08	0.901911	0.1288
8	1:04:00	64	8	385.30	7.95	1.012739	0.1266
9	1:21:00	81	9	386.17	8.82	1.123567	0.1248
10	1:40:00	100	10	386.90	9.55	1.216561	0.1217
11	2:01:00	121	11	387.68	10.33	1.315924	0.1196
12	2:24:00	144	12	388.43	11.08	1.411465	0.1176
13	2:49:00	169	13	389.13	11.78	1.500637	0.1154
14	3:16:00	196	14	389.84	12.49	1.591083	0.1136
15	3:45:00	225	15	390.51	13.16	1.676433	0.1118
16	4:16:00	256	16		-377.35	-48.0701	-3.0044
Regression analysis							
R square : 0.9970							
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) : 0.1050							
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> : 0.1346							



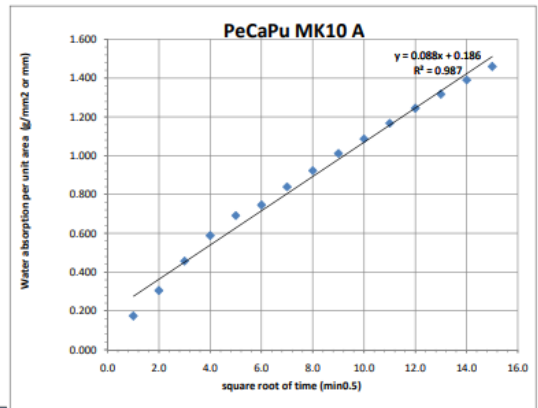
Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		B					
Εύθυνση :		PeCaPu					
Ημερομηνία :		31-Jan-20					
W <sub>s</sub> (g) :		351.80					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	353.45	1.65	0.210191	0.2102
2	0:04:00	4	2	354.52	2.72	0.346497	0.1732
3	0:09:00	9	3	355.54	3.74	0.476433	0.1588
4	0:16:00	16	4	356.53	4.73	0.602548	0.1506
5	0:25:00	25	5	357.44	5.64	0.718471	0.1437
6	0:36:00	36	6	358.34	6.54	0.833121	0.1389
7	0:49:00	49	7	359.30	7.50	0.955414	0.1365
8	1:04:00	64	8	360.16	8.36	1.064968	0.1331
9	1:21:00	81	9	360.98	9.18	1.169427	0.1299
10	1:40:00	100	10	361.86	10.06	1.281529	0.1282
11	2:01:00	121	11	362.61	10.81	1.37707	0.1252
12	2:24:00	144	12	363.41	11.61	1.478981	0.1232
13	2:49:00	169	13	364.15	12.35	1.573248	0.1210
14	3:16:00	196	14	364.92	13.12	1.671338	0.1194
15	3:45:00	225	15	365.63	13.83	1.761783	0.1175
16	4:16:00	256	16		-351.80	-44.8153	-2.8010
Regression analysis							
R square : 0.9970							
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) : 0.1103							
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> : 0.1406							



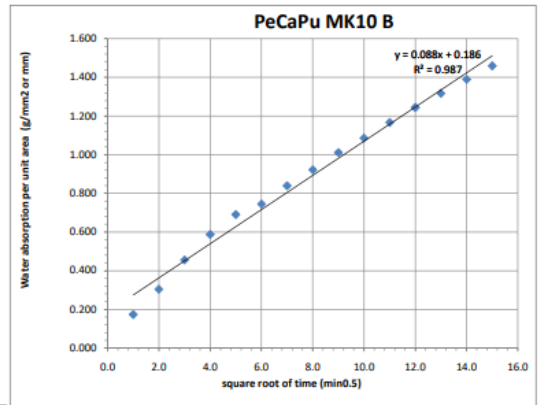
Σχήμα 9.6: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu



Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Σύνθεση :		PeCaPu MK10					
Ημερομηνία :		6-Feb-20					
W <sub>s</sub> (g) :		371.35					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	373.02	1.67	0.212739	0.2127
2	0:04:00	4	2	374.04	2.69	0.342675	0.1713
3	0:09:00	9	3	374.43	3.08	0.392357	0.1308
4	0:16:00	16	4	375.34	3.99	0.50828	0.1271
5	0:25:00	25	5	376.22	4.87	0.620382	0.1241
6	0:36:00	36	6	376.44	5.09	0.648408	0.1081
7	0:49:00	49	7	376.77	5.42	0.690446	0.0986
8	1:04:00	64	8	377.15	5.80	0.738854	0.0924
9	1:21:00	81	9	377.70	6.35	0.808917	0.0899
10	1:40:00	100	10	378.08	6.73	0.857325	0.0857
11	2:01:00	121	11	378.58	7.23	0.921019	0.0837
12	2:24:00	144	12	379.06	7.71	0.982166	0.0818
13	2:49:00	169	13	379.52	8.17	1.040764	0.0801
14	3:16:00	196	14	379.98	8.63	1.099363	0.0785
15	3:45:00	225	15	380.45	9.10	1.159236	0.0773
16	4:16:00	256	16	-371.35	-47.3057	-2.9566	0.1095

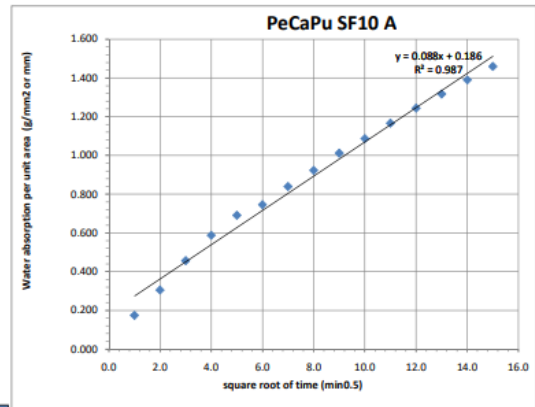


Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		B					
Σύνθεση :		PeCaPu MK10					
Ημερομηνία :		6-Feb-20					
W <sub>s</sub> (g) :		366.02					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	367.57	1.55	0.197452	0.1975
2	0:04:00	4	2	368.52	2.50	0.318471	0.1592
3	0:09:00	9	3	369.15	3.13	0.398726	0.1329
4	0:16:00	16	4	369.85	3.83	0.487898	0.1220
5	0:25:00	25	5	370.37	4.35	0.55414	0.1108
6	0:36:00	36	6	370.87	4.85	0.617834	0.1030
7	0:49:00	49	7	371.38	5.36	0.682803	0.0975
8	1:04:00	64	8	371.89	5.87	0.747771	0.0935
9	1:21:00	81	9	372.39	6.37	0.811465	0.0902
10	1:40:00	100	10	372.87	6.85	0.872611	0.0873
11	2:01:00	121	11	373.35	7.33	0.933758	0.0849
12	2:24:00	144	12	373.85	7.83	0.997452	0.0831
13	2:49:00	169	13	374.35	8.33	1.061146	0.0816
14	3:16:00	196	14	374.83	8.81	1.122293	0.0802
15	3:45:00	225	15	375.33	9.31	1.185987	0.0791
16	4:16:00	256	16	-366.02	-46.6268	-2.9142	0.1068

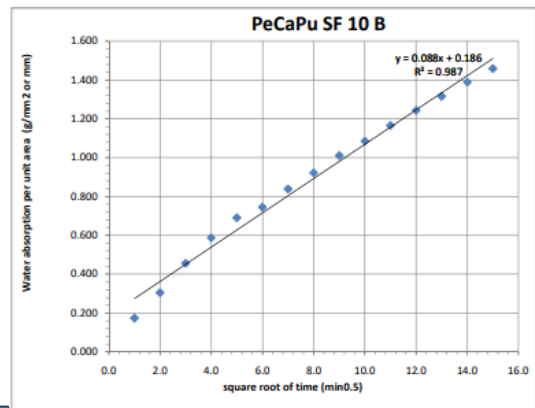


Σχήμα 9.7: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu MK10

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)								
Αριθμός δοκιμίου :		A						
Σύνθεση :		PeCaPu SF10						
Ημερομηνία :		6-Feb-20						
W <sub>0</sub> (g) :		397.68						
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	l (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )	
1	0:01:00	1	1	399.14	1.46	0.185987	0.1860	
2	0:04:00	4	2	400.08	2.40	0.305732	0.1529	
3	0:09:00	9	3	400.92	3.24	0.412739	0.1376	
4	0:16:00	16	4	401.74	4.06	0.517197	0.1293	
5	0:25:00	25	5	402.32	4.64	0.591083	0.1182	
6	0:36:00	36	6	402.90	5.22	0.664968	0.1108	
7	0:49:00	49	7	403.55	5.87	0.747771	0.1068	
8	1:04:00	64	8	404.04	6.36	0.810191	0.1013	
9	1:21:00	81	9	404.56	6.88	0.876433	0.0974	
10	1:40:00	100	10	405.01	7.33	0.933758	0.0934	
11	2:01:00	121	11	405.47	7.79	0.992357	0.0902	
12	2:24:00	144	12	405.93	8.25	1.050955	0.0876	
13	2:49:00	169	13	406.37	8.69	1.107006	0.0852	
14	3:16:00	196	14	406.83	9.15	1.165605	0.0833	
15	3:45:00	225	15	407.19	9.51	1.211465	0.0808	
16	4:16:00	256	16		-397.68	-50.6599	-3.1662	
							Regression analysis	
							R square :	0.9841
							S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :	0.0708
							S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg.</sub> :	0.1107

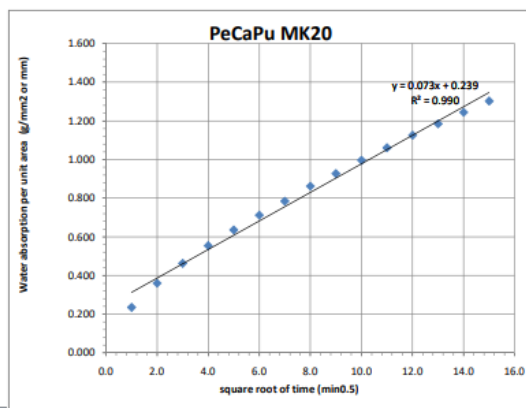


Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)								
Αριθμός δοκιμίου :		B						
Σύνθεση :		PeCaPu SF10						
Ημερομηνία :		6-Feb-20						
W <sub>0</sub> (g) :		394.29						
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	l (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )	
1	0:01:00	1	1	395.80	-1.88	-0.23949	-0.2395	
2	0:04:00	4	2	396.76	-0.92	-0.1172	-0.0586	
3	0:09:00	9	3	397.51	-0.17	-0.02166	-0.0072	
4	0:16:00	16	4	398.26	0.58	0.073885	0.0185	
5	0:25:00	25	5	398.75	1.07	0.136306	0.0273	
6	0:36:00	36	6	399.33	1.65	0.210191	0.0350	
7	0:49:00	49	7	399.90	2.22	0.282803	0.0404	
8	1:04:00	64	8	400.42	2.74	0.349045	0.0436	
9	1:21:00	81	9	400.88	3.20	0.407643	0.0453	
10	1:40:00	100	10	401.32	3.64	0.463694	0.0464	
11	2:01:00	121	11	401.83	4.15	0.528662	0.0481	
12	2:24:00	144	12	402.29	4.61	0.587261	0.0489	
13	2:49:00	169	13	402.69	5.01	0.638217	0.0491	
14	3:16:00	196	14	403.17	5.49	0.699363	0.0500	
15	3:45:00	225	15	403.53	5.85	0.745223	0.0497	
16	4:16:00	256	16		-397.68	-50.6599	-3.1662	
							Regression analysis	
							R square :	0.9881
							S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :	0.0677
							S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg.</sub> :	0.0131

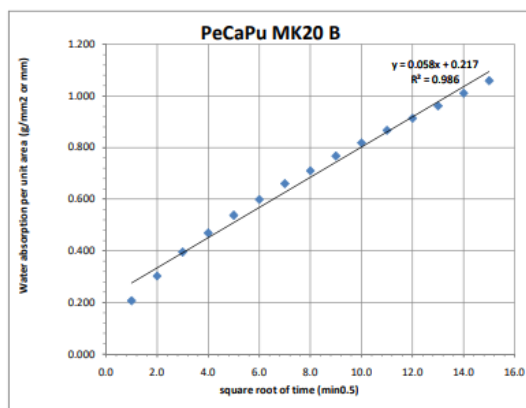


Σχήμα 9.8: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu SF10

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Εύθυνση :		PeCaPu MK20					
Ημερομηνία :		31-Jan-20					
W <sub>s</sub> (g) :		406.52					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	l (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	407.84	1.32	0.168153	0.1682
2	0:04:00	4	2	408.69	2.17	0.276433	0.1382
3	0:09:00	9	3	409.47	2.95	0.375796	0.1253
4	0:16:00	16	4	410.01	3.49	0.444586	0.1111
5	0:25:00	25	5	410.56	4.04	0.51465	0.1029
6	0:36:00	36	6	411.00	4.48	0.570701	0.0951
7	0:49:00	49	7	411.47	4.95	0.630573	0.0901
8	1:04:00	64	8	411.88	5.36	0.682803	0.0854
9	1:21:00	81	9	412.26	5.74	0.73121	0.0812
10	1:40:00	100	10	412.63	6.11	0.778344	0.0778
11	2:01:00	121	11	412.97	6.45	0.821656	0.0747
12	2:24:00	144	12	413.33	6.81	0.867516	0.0723
13	2:49:00	169	13	413.69	7.17	0.913376	0.0703
14	3:16:00	196	14	414.13	7.61	0.969427	0.0692
15	3:45:00	225	15	414.32	7.80	0.993631	0.0662
16	4:16:00	256	16	-406.52	-51.786	-3.2366	0.0952

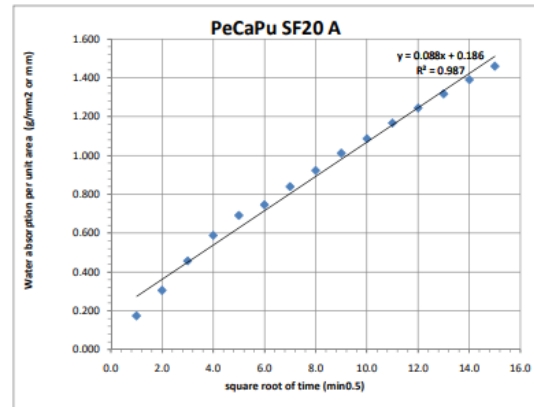


Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)							
Αριθμός δοκιμίου :		B					
Εύθυνση :		PeCaPu MK20					
Ημερομηνία :		31-Jan-20					
W <sub>s</sub> (g) :		414.13					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	l (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	415.75	1.62	0.206369	0.2064
2	0:04:00	4	2	416.50	2.37	0.301911	0.1510
3	0:09:00	9	3	417.23	3.10	0.394904	0.1316
4	0:16:00	16	4	417.81	3.68	0.46879	0.1172
5	0:25:00	25	5	418.35	4.22	0.53758	0.1075
6	0:36:00	36	6	418.83	4.70	0.598726	0.0998
7	0:49:00	49	7	419.31	5.18	0.659873	0.0943
8	1:04:00	64	8	419.70	5.57	0.709554	0.0887
9	1:21:00	81	9	420.15	6.02	0.766879	0.0852
10	1:40:00	100	10	420.55	6.42	0.817834	0.0818
11	2:01:00	121	11	420.93	6.80	0.866242	0.0787
12	2:24:00	144	12	421.30	7.17	0.913376	0.0761
13	2:49:00	169	13	421.67	7.54	0.96051	0.0739
14	3:16:00	196	14	422.06	7.93	1.010191	0.0722
15	3:45:00	225	15	422.44	8.31	1.058599	0.0706
16	4:16:00	256	16	-414.13	-52.7554	-3.2972	0.1023

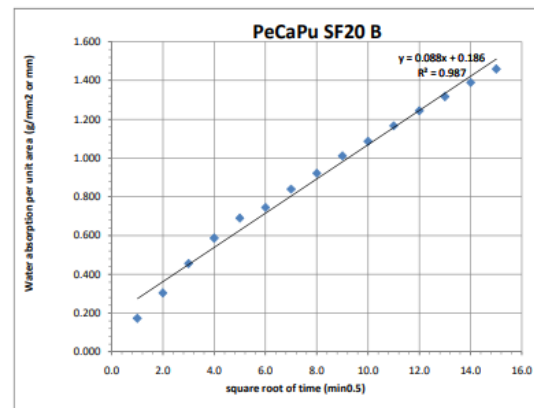


Σχήμα 9.9: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu MK20

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptionity)							
Αριθμός δοκιμίου :		A					
Εύνηση :		PeCaPu SF20					
Ημερομηνία :		6-Feb-20					
W <sub>s</sub> (g) :		395.59					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	l (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	396.95	1.36	0.173248	0.1732
2	0:04:00	4	2	397.98	2.39	0.304459	0.1522
3	0:09:00	9	3	399.17	3.58	0.456051	0.1520
4	0:16:00	16	4	400.20	4.61	0.587261	0.1468
5	0:25:00	25	5	401.01	5.42	0.690446	0.1381
6	0:36:00	36	6	401.44	5.85	0.745223	0.1242
7	0:49:00	49	7	402.18	6.59	0.83949	0.1199
8	1:04:00	64	8	402.83	7.24	0.922293	0.1153
9	1:21:00	81	9	403.53	7.94	1.011465	0.1124
10	1:40:00	100	10	404.12	8.53	1.086624	0.1087
11	2:01:00	121	11	404.75	9.16	1.166879	0.1061
12	2:24:00	144	12	405.36	9.77	1.244586	0.1037
13	2:49:00	169	13	405.93	10.34	1.317197	0.1013
14	3:16:00	196	14	406.50	10.91	1.389809	0.0993
15	3:45:00	225	15	407.05	11.46	1.459873	0.0973
16	4:16:00	256	16		-395.59	-50.3936	-3.1496
Regression analysis							
R square :							0.9873
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :							0.0883
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :							0.1234



Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptionity)							
Αριθμός δοκιμίου :		B					
Εύνηση :		PeCaPu SF20					
Ημερομηνία :		6-Feb-20					
W <sub>s</sub> (g) :		396.79					
A/A	T(h)	T(min)	t <sup>0.5</sup>	W (gr)	dW (g)	l (mm)	S (mm/min <sup>0.5</sup> )
1	0:01:00	1	1	398.62	1.83	0.233121	0.2331
2	0:04:00	4	2	399.67	2.88	0.366879	0.1834
3	0:09:00	9	3	400.53	3.74	0.476433	0.1588
4	0:16:00	16	4	401.68	4.89	0.62293	0.1557
5	0:25:00	25	5	402.63	5.84	0.743949	0.1488
6	0:36:00	36	6	402.91	6.12	0.779618	0.1299
7	0:49:00	49	7	403.67	6.88	0.876433	0.1252
8	1:04:00	64	8	404.35	7.56	0.963057	0.1204
9	1:21:00	81	9	405.08	8.29	1.056051	0.1173
10	1:40:00	100	10	405.71	8.92	1.136306	0.1136
11	2:01:00	121	11	406.32	9.53	1.214013	0.1104
12	2:24:00	144	12	406.94	10.15	1.292994	0.1077
13	2:49:00	169	13	407.52	10.73	1.366879	0.1051
14	3:16:00	196	14	408.11	11.32	1.442038	0.1030
15	3:45:00	225	15	408.71	11.92	1.518471	0.1012
16	4:16:00	256	16		-396.79	-50.5465	-3.1592
Regression analysis							
R square :							0.9904
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) :							0.0889
S (mm/min <sup>0.5</sup> ) <sub>avg</sub> :							0.1343



Σχήμα 9.10: Υπολογισμοί τριχοειδούς απορρόφησης PeCaPu SF20

## 9.2 Διείσδυση χλωριόντων

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά όλος οι τιμές και οι παράγοντες που καταγράφηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψει ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων σύμφωνα με τη μέθοδο NT 492:

Πίνακας 9.1: Πρώτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΙΟΡΘ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΗΛΙΚΙΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	Wδικτ	NaCl	ΔΙΑΛΥΜΑ
			ΗΛΙΚΙΑ	ΣΚΥΡΟΔ	ΕΛΕΓΧΟΥ	ΔΙΟΡΘ		ΕΛΕΓΧΟΥ			ΚΑΘΟΔΟΥ
			ημέρες			ημέρες			gr	gr	%
REF-A	ΔΝ	LWC-00A.UW.28	28	09-10-19	06-11-19	28	LWC-00A.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
REF-B	ΔΝ	LWC-00A.UW.28	28	09-10-19	06-11-19	28	LWC-00A.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF10	ΔΝ	LWC-07A.UW.21	FALSE	20-11-19	11-12-19	21	LWC-07A.UW.FALSE	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF10	ΔΝ	LWC-08A.UW.21	FALSE	20-11-19	11-12-19	21	LWC-08A.UW.FALSE	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu	ΔΝ	LWC-09C.UW.41	28	27-11-19	07-01-20	41	LWC-09C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu	ΔΝ	LWC-010C.UW.41	28	27-11-19	07-01-20	41	LWC-010C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK20	ΔΝ	LWC-011C.UW.35	28	04-12-19	08-01-20	35	LWC-011C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK20	ΔΝ	LWC-012C.UW.35	28	04-12-19	08-01-20	35	LWC-012C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF20	ΔΝ	LWC-013C.UW.29	28	11-12-19	09-01-20	29	LWC-013C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF20	ΔΝ	LWC-014C.UW.29	28	11-12-19	09-01-20	29	LWC-014C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu	ΔΝ	LWC-015C.UW.30	28	11-12-19	10-01-20	30	LWC-015C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu	ΔΝ	LWC-016C.UW.30	28	11-12-19	10-01-20	30	LWC-016C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK20	ΔΝ	LWC-017C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-017C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK20	ΔΝ	LWC-018C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-018C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF20	ΔΝ	LWC-019C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-019C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF20	ΔΝ	LWC-020C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-020C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK10	ΔΝ	LWC-021C.UW.28	28	18-12-19	15-01-20	28	LWC-021C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK10	ΔΝ	LWC-022C.UW.28	28	18-12-19	15-01-20	28	LWC-022C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF10	ΔΝ	LWC-023C.UW.29	28	18-12-19	16-01-20	29	LWC-023C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF10	ΔΝ	LWC-024C.UW.29	28	18-12-19	16-01-20	29	LWC-024C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK10	ΔΝ	LWC-025C.UW.30	28	18-12-19	17-01-20	30	LWC-025C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu -MK10	ΔΝ	LWC-026C.UW.30	28	18-12-19	17-01-20	30	LWC-026C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%

Πίνακας 9.2: Δεύτερο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών

Wαπιον	NaOH	ΔΙΑΛΥΜΑ	ΔΟΚΙΜ	ΔΟΚΙΜ	ΔΟΚΙΜ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΩΡΑ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ
		ΑΝΟΔΟΥ	ΤΑΣΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΕΝΑΡΞΗΣ	ΕΝΑΡΞΗΣ	ΤΑΣΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R	ΕΙΔ.ΑΝΤ. ρ	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ
gr	gr	%	V	A	W			V	A	W = VA	Ω	Ωm	°C
365.00	4.84	1.31%	29.00	0.099	2.871	06-11-19	11:37	20.00	0.066	1.320	303	71	20.2
365.00	4.84	1.31%	29.70	0.089	2.643	06-11-19	11:30	24.70	0.074	1.828	334	60	18.8
365.00	4.84	1.31%	29.10	0.030	0.873	11-12-19	12:00	34.50	0.035	1.208	986	186	17.4
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.029	0.870	11-12-19	12:06	39.99	0.039	1.560	1025	174	17.8
365.00	4.84	1.31%	29.80	0.031	0.924	07-01-20	11:21	34.90	0.039	1.361	895	154	11.7
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.035	1.050	07-01-20	11:20	35.00	0.042	1.470	833	133	11.4
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.027	0.810	08-01-20	12:14	40.20	0.038	1.528	1058	171	18.1
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.029	0.870	08-01-20	12:14	39.99	0.039	1.560	1025	172	18.2
365.00	4.84	1.31%	29.90	0.015	0.449	09-01-20	12:43	39.98	0.023	0.920	1738	299	21.0
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.016	0.480	09-01-20	12:41	40.30	0.039	1.572	1033	190	29.4
365.00	4.84	1.31%	29.50	0.076	2.242	10-01-20	13:07	24.80	0.066	1.637	376	68	24.0
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.078	2.340	10-01-20	13:06	25.00	0.064	1.600	391	68	24.0
365.00	4.84	1.31%	30.70	0.019	0.583	13-01-20	11:01	49.40	0.033	1.630	1497	265	18.9
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.017	0.510	13-01-20	11:03	49.98	0.032	1.599	1562	278	18.7
365.00	4.84	1.31%	29.80	0.017	0.507	13-01-20	11:24	49.70	0.031	1.541	1603	287	24.8
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.018	0.540	13-01-20	11:27	39.99	0.032	1.280	1250	257	24.0
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.025	0.750	15-01-20	11:52	39.98	0.035	1.399	1142	202	20.4
365.00	4.84	1.31%	29.90	0.020	0.598	15-01-20	11:55	39.80	0.028	1.114	1421	238	19.6
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.026	0.780	16-01-20	12:18	40.50	0.035	1.418	1157	195	19.2
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.023	0.690	16-01-20	12:17	39.99	0.033	1.320	1212	201	19.2
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.025	0.750	17-01-20	12:41	39.99	0.035	1.400	1143	195	18.7
365.00	4.84	1.31%	30.40	0.029	0.882	17-01-20	12:36	39.90	0.035	1.397	1140	193	18.9

**Πίνακας 9.3: Τρίτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών**

ΗΜ/ΜΙΑ ΛΗΞΗΣ	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				ΦΟΡΤΙΟ ΦΡΑΥΣΗΣ
		ΤΑΞΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R	ΕΙΔ.ΑΝΤ. ρ	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ		ΘΕΣΗ Α	ΘΕΣΗ Β	ΘΕΣΗ Γ		
		V	A	W = VA	Ω	Ωm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	kN
07-11-19	11:37	20.00	0.057	1.140	351	83	19.5	100.00	34.00	33.00	33.00	33.33	17.49
07-11-19	11:30	26.20	0.067	1.755	391	70	19.6	100.00	44.00	44.50	43.50	44.00	24.24
12-12-19	12:00	35.90	0.026	0.933	1381	260	15.5	100.00	42.00	41.50	41.50	41.67	14.67
12-12-19	12:06	39.99	0.048	1.920	833	142	16.8	100.00	46.50	46.00	46.00	46.17	17.59
08-01-20	11:21	34.50	0.039	1.346	885	152	18.4	100.00	46.00	46.00	45.00	45.67	15.58
08-01-20	11:20	34.98	0.059	2.064	593	94	19.2	100.00	50.00	50.00	48.00	49.33	19.72
09-01-20	12:14	41.80	0.045	1.881	929	150	20.9	100.00	48.00	49.00	49.00	48.67	15.93
09-01-20	12:14	39.98	0.048	1.919	833	140	21.6	100.00	46.50	47.00	47.00	46.83	16.63
10-01-20	12:41	50.30	0.030	1.509	1677	288	22.6	100.00	46.00	45.50	45.50	45.67	17.86
10-01-20	12:43	39.98	0.027	1.079	1481	273	23.4	100.00	43.00	43.00	42.00	42.67	17.94
11-01-20	13:07	24.98	0.063	1.574	397	71	23.6	100.00	44.00	43.00	44.00	43.67	16.27
11-01-20	13:06	25.10	0.066	1.657	380	66	23.0	100.00	45.00	45.00	45.00	45.00	17.75
14-01-20	11:01	48.70	0.046	2.240	1059	188	24.1	100.00	44.00	45.00	44.00	44.33	17.40
14-01-20	11:03	49.98	0.052	2.599	961	171	24.8	100.00	44.50	44.00	44.00	44.17	17.82
14-01-20	11:24	45.30	0.031	1.404	1461	262	19.4	100.00	43.50	44.00	44.00	43.83	16.67
14-01-20	11:28	39.60	0.054	2.138	733	151	31.4	100.00	39.10	37.75	37.84	38.23	11.29
16-01-20	11:52	39.99	0.037	1.480	1081	191	18.7	100.00	44.00	45.00	44.00	44.33	16.91
16-01-20	11:52	35.90	0.030	1.077	1197	200	17.9	100.00	46.00	47.00	48.00	47.00	14.91
17-01-20	12:18	40.40	0.042	1.697	962	162	17.9	100.00	46.50	47.00	46.00	46.50	19.07
17-01-20	12:17	39.99	0.037	1.480	1081	179	17.9	100.00	47.10	48.10	47.00	47.40	21.30
18-01-20	12:41	39.99	0.038	1.520	1052	180	17.9	100.00	46.00	46.00	46.00	46.00	13.30
18-01-20	12:36	41.20	0.043	1.772	958	162	17.9	100.00	46.00	46.00	47.00	46.33	18.36

**Πίνακας 9.4: Τέταρτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών**

ΕΦΕΛΚ ΑΝΤΟΧΗ	Xd7	Xd5	Xd3	Xd1	Xd2	Xd4	Xd6	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜ/ΣΙΑ	ΜΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ	Qm: ΜΕΣΟ ΗΛ.ΦΟΡΤΙΟ
	-30	-20	-10	0	10	20	30	ώρες	sec	°C	A	A	C = As
3.34	26.00	27.50	27.50	25.00	28.00	26.00	24.00	24.00	86400	19.85	0.062	0.006	5314
3.51	30.50	29.00	30.00	31.00	31.00	31.00	30.50	24.00	86400	19.20	0.071	0.005	6091
2.24	8.00	7.00	6.50	6.50	6.75	7.75	8.50	24.00	86400	16.45	0.031	0.006	2635
2.43	10.00	10.00	10.00	7.50	7.00	7.50	7.50	24.00	86400	17.30	0.044	0.006	3758
2.17	13.50	10.50	9.50	11.50	8.00	8.00	10.00	24.00	86400	15.05	0.039	0.000	3370
2.54	12.50	12.00	11.00	15.00	16.00	12.00	12.00	24.00	86400	15.30	0.051	0.012	4363
2.08	10.50	8.50	11.00	10.50	9.50	8.50	8.00	24.00	86400	19.50	0.042	0.005	3586
2.26	14.00	14.00	13.00	10.50	13.00	10.50	10.00	24.00	86400	19.90	0.044	0.006	3758
2.49	5.50	5.50	6.50	6.75	4.00	5.25	5.25	23.97	86280	21.80	0.027	0.005	2286
2.68	9.00	7.50	6.50	5.00	7.75	8.00	6.00	24.03	86520	26.40	0.033	0.008	2855
2.37	16.50	16.00	15.00	16.50	18.00	19.00	16.00	24.00	86400	23.80	0.065	0.002	5573
2.51	19.50	16.50	12.50	15.50	15.50	16.00	15.50	24.00	86400	23.50	0.065	0.001	5616
2.50	9.00	9.25	8.00	8.25	8.25	8.50	6.50	24.00	86400	21.50	0.040	0.009	3413
2.57	6.50	7.50	7.75	8.00	8.00	7.00	8.00	24.00	86400	21.75	0.042	0.014	3629
2.42	7.00	6.00	8.00	7.50	5.50	4.00	8.00	24.00	86400	22.10	0.031	0.000	2678
1.88	19.50	17.00	18.00	19.00	17.50	11.00	10.00	24.02	86460	27.70	0.043	0.016	3718
2.43	6.50	7.50	6.75	7.38	6.00	7.50	7.50	24.00	86400	19.55	0.036	0.001	3110
2.02	6.00	7.50	6.50	7.25	6.75	5.00	6.75	23.95	86220	18.75	0.029	0.001	2500
2.61	8.00	7.50	7.00	8.25	9.50	9.50	9.50	24.00	86400	18.55	0.039	0.005	3326
2.86	8.00	8.25	8.50	7.50	8.00	9.00	9.50	24.00	86400	18.55	0.035	0.003	3024
1.84	12.00	14.00	1.00	10.50	11.00	10.50	13.00	24.00	86400	18.30	0.037	0.002	3154
2.52	13.00	12.00	14.00	13.00	12.00	11.50	11.00	24.00	86400	18.40	0.039	0.006	3370



Πίνακας 9.5: Πέμπτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 28 ημερών

Qm: ΜΕΣΟ ΗΛ.ΦΟΡΤΙΟ	ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ Dnssm	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ Dnssm	ΕΒΑΛ Dchlor
Ah	mm	mm	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$	$\text{mm}^2/\text{yr}$	Resistance
0.64	7.00	0.82	1.42	45	Extremely High
0.66	7.00	1.19	1.31	41	Extremely High
0.80	7.14	1.18	2.08	65	Extremely High
0.95	7.73	1.44	2.17	69	Extremely High
0.77	7.29	1.78	1.62	51	Extremely High
0.89	13.29	1.04	3.14	99	Very High
0.64	5.54	0.91	1.58	50	Extremely High
0.79	7.11	1.35	1.97	62	Extremely High
0.85	12.68	0.49	4.60	145	Very High
0.99	17.14	0.64	5.97	188	High
0.95	8.25	0.89	1.95	62	Extremely High
1.01	7.54	0.59	1.75	55	Extremely High
0.74	6.57	1.48	1.50	47	Extremely High
1.03	16.00	3.86	4.32	136	Very High
0.86	7.02	0.61	1.99	63	Extremely High
0.69	6.54	0.83	1.95	61	Extremely High
0.61	10.33	0.90	2.10	66	Extremely High
0.66	6.61	0.43	1.32	42	Extremely High
0.68	8.68	0.87	2.58	81	Very High
0.64	9.08	0.30	2.79	88	Very High

Πίνακας 9.6: Πρώτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΙΟΡΘ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΗΛΙΚΙΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	Wδικτ	NaCl	ΔΙΑΛΥΜΑ
			ΗΛΙΚΙΑ	ΣΚΥΡΟΔ	ΕΛΕΓΧΟΥ	ήμερες		ΕΛΕΓΧΟΥ			gr
			ήμερες				ΔΙΟΡΘ	ώρες			
PePu - SF10	ΔΝ	LWC-07A.UW.90	90	20-11-19	18-02-20	90	LWC-07A.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF10	ΔΝ	LWC-08A.UW.90	90	20-11-19	18-02-20	90	LWC-08A.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu	ΔΝ	LWC-09C.UW.90	90	27-11-19	25-02-20	90	LWC-09C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu	ΔΝ	LWC-010C.UW.90	90	27-11-19	25-02-20	90	LWC-010C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK20	ΔΝ	LWC-011C.UW.90	90	04-12-19	03-03-20	90	LWC-011C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK20	ΔΝ	LWC-012C.UW.90	90	04-12-19	03-03-20	90	LWC-012C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF20	ΔΝ	LWC-013C.UW.29	28	11-12-19	09-01-20	29	LWC-013C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF20	ΔΝ	LWC-014C.UW.29	28	11-12-19	09-01-20	29	LWC-014C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu	ΔΝ	LWC-015C.UW.30	28	11-12-19	10-01-20	30	LWC-015C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu	ΔΝ	LWC-016C.UW.93	90	11-12-19	13-03-20	93	LWC-016C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK20	ΔΝ	LWC-017C.UW.86	90	18-12-19	13-03-20	86	LWC-017C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK20	ΔΝ	LWC-018C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-018C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF20	ΔΝ	LWC-019C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-019C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF20	ΔΝ	LWC-020C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-020C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK10	ΔΝ	LWC-021C.UW.28	28	18-12-19	15-01-20	28	LWC-021C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK10	ΔΝ	LWC-022C.UW.28	28	18-12-19	15-01-20	28	LWC-022C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF10	ΔΝ	LWC-023C.UW.87	90	18-12-19	14-03-20	87	LWC-023C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF10	ΔΝ	LWC-024C.UW.87	90	18-12-19	14-03-20	87	LWC-024C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK10	ΔΝ	LWC-025C.UW.88	90	18-12-19	15-03-20	88	LWC-025C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu -MK10	ΔΝ	LWC-026C.UW.88	90	18-12-19	15-03-20	88	LWC-026C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%

**Πίνακας 9.7: Δεύτερο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών**

Ψαππιον	NaOH	ΔΙΑΛΥΜΑ	ΔΟΚΙΜ	ΔΟΚΙΜ	ΔΟΚΙΜ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΩΡΑ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ
		ΑΝΟΔΟΥ	ΤΑΣΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΕΝΑΡΞΗΣ	ΕΝΑΡΞΗΣ	ΤΑΣΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R	ΕΙΔ.ΑΝΤ. ρ	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ
gr	gr	%	V	A	W			V	A	W = VA	Ω	Ωm	°C
365.00	4.84	1.31%	29.30	0.080	2.344	18-02-20	11:28	60.20	0.020	1.204	3010	499	16.2
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.010	0.300	18-02-20	11:26	59.98	0.022	1.320	2726	498	17.9
365.00	4.84	1.31%	30.20	0.020	0.604	25-02-20	13:16	40.30	0.028	1.128	1439	246	17.5
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.025	0.750	25-02-20	13:21	39.99	0.036	1.440	1111	200	17.4
365.00	4.84	1.31%	29.70	0.016	0.475	03-03-20	13:15	50.00	0.028	1.400	1786	329	19.3
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.019	0.570	03-03-20	13:17	49.99	0.032	1.600	1562	282	19.1
365.00	4.84	1.31%	29.90	0.015	0.449	09-01-20	12:43	39.98	0.023	0.920	1738	299	21.0
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.016	0.480	09-01-20	12:41	40.30	0.039	1.572	1033	190	29.4
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.028	0.840	10-01-20	13:11	35.00	0.035	1.225	1000	165	21.1
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.032	0.960	13-03-20	13:15	35.00	0.039	1.365	897	159	21.4
365.00	4.84	1.31%	30.70	0.019	0.583	13-03-20	11:01	49.40	0.033	1.630	1497	265	18.9
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.017	0.510	13-01-20	11:03	49.98	0.032	1.599	1562	278	18.7
365.00	4.84	1.31%	29.80	0.017	0.507	13-01-20	11:24	49.70	0.031	1.541	1603	287	24.8
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.018	0.540	13-01-20	11:27	39.99	0.032	1.280	1250	257	24.0
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.025	0.750	15-01-20	11:52	39.98	0.035	1.399	1142	202	20.4
365.00	4.84	1.31%	29.90	0.020	0.598	15-01-20	11:55	39.80	0.028	1.114	1421	238	19.6
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.011	0.330	14-03-20	13:24	60.00	0.024	1.440	2500	435	22.3
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.010	0.300	14-03-20	13:24	60.00	0.022	1.320	2727	466	22.3
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.019	0.570	15-03-20	13:49	40.00	0.026	1.040	1538	267	22.1
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.018	0.540	15-03-20	13:49	39.99	0.025	1.000	1600	268	21.8

**Πίνακας 9.8: Τρίτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών**

ΗΜ/ΝΙΑ	ΩΡΑ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΜΗΚΟΣ	ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				ΦΟΡΤΙΟ
ΛΗΞΗΣ	ΛΗΞΗΣ	ΤΑΣΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R	ΕΙΔ.ΑΝΤ. ρ	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΘΕΣΗ Α	ΘΕΣΗ Β	ΘΕΣΗ Γ		ΘΡΑΥΣΗΣ
		V	A	W = VA	Ω	Ωm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	kN
19-02-20	11:28	58.00	0.033	1.914	1758	292	17.6	100.00	47.00	47.00	48.00	47.33	17.20
19-02-20	11:26	59.98	0.033	1.979	1818	332	18.9	100.00	43.00	43.00	43.00	43.00	15.51
26-02-20	13:16	34.50	0.039	1.346	885	151	20.0	100.00	46.00	46.00	46.00	46.00	17.20
26-02-20	13:21	39.98	0.043	1.719	930	167	19.2	100.00	43.50	43.50	44.00	43.67	17.05
04-03-20	13:15	49.40	0.036	1.778	1372	253	20.7	100.00	42.00	43.00	43.00	42.67	12.87
04-03-20	13:17	49.99	0.042	2.100	1190	215	21.7	100.00	44.00	43.50	43.00	43.50	13.58
10-01-20	12:41	50.30	0.030	1.509	1677	288	22.6	100.00	46.00	45.50	45.50	45.67	17.86
10-01-20	12:43	39.98	0.027	1.079	1481	273	23.4	100.00	43.00	43.00	42.00	42.67	17.94
11-01-20	13:11	34.98	0.036	1.259	972	161	20.3	100.00	46.50	47.00	49.00	47.50	22.10
14-03-20	13:17	35.00	0.043	1.505	814	144	20.7	100.00	45.00	44.00	44.00	44.33	17.60
14-03-20	11:01	48.70	0.046	2.240	1059	188	24.1	100.00	44.00	45.00	44.00	44.33	17.40
14-01-20	11:03	49.98	0.052	2.599	961	171	24.8	100.00	44.50	44.00	44.00	44.17	17.82
14-01-20	11:24	45.30	0.031	1.404	1461	262	19.4	100.00	43.50	44.00	44.00	43.83	16.67
14-01-20	11:28	39.60	0.054	2.138	733	151	31.4	100.00	39.10	37.75	37.84	38.23	11.29
16-01-20	11:52	39.99	0.037	1.480	1081	191	18.7	100.00	44.00	45.00	44.00	44.33	16.91
16-01-20	11:52	35.90	0.030	1.077	1197	200	17.9	100.00	46.00	47.00	48.00	47.00	14.91
15-03-20	13:24	60.00	0.027	1.620	2222	386	22.2	100.00	46.00	45.00	44.50	45.17	17.51
15-03-20	13:24	60.00	0.033	1.980	1818	310	22.5	100.00	46.00	46.00	46.00	46.00	18.69
16-03-20	13:49	40.00	0.031	1.240	1290	224	22.4	100.00	45.00	46.00	45.00	45.33	15.57
16-03-20	13:49	39.98	0.028	1.119	1428	239	22.1	100.00	47.00	47.00	46.50	46.83	18.33



Πίνακας 9.9: Τέταρτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών

ΕΦΕΛΚ	Xd7	Xd5	Xd3	Xd1	Xd2	Xd4	Xd6	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΜΕΣΗ	ΜΕΣΗ	ΤΥΠΙΚΗ	Qm: ΜΕΣΟ
	ΑΝΤΟΧΗ	-30	-20	-10	0	10	20	30	ΔΟΚΙΜΗΣ	ΔΟΚΙΜΗΣ	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ	ΕΝΤΑΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ
MPa	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	ώρες	sec	°C	A	A	C = As
2.31	7.50	8.00	8.00	6.50	6.50	6.00	6.50	24.00	86400	16.90	0.027	0.009	2290
2.30	4.50	8.00	7.50	6.50	7.50	7.50	7.50	24.00	86400	18.40	0.028	0.008	2376
2.38	9.00	6.00	8.00	7.00	5.50	7.50	7.00	24.00	86400	18.75	0.034	0.008	2894
2.49	9.50	8.00	6.00	5.75	7.38	9.00	8.50	24.00	86400	18.30	0.040	0.005	3413
1.92	9.00	4.50	6.00	6.50	7.00	9.00	9.00	24.00	86400	20.00	0.032	0.006	2765
1.99	12.50	12.00	14.50	14.00	14.50	12.50	13.00	24.00	86400	20.40	0.037	0.007	3197
2.49	5.50	5.50	6.50	6.75	4.00	5.25	5.25	23.97	86280	21.80	0.027	0.005	2286
2.68	9.00	7.50	6.50	5.00	7.75	8.00	6.00	24.03	86520	26.40	0.033	0.008	2855
2.96	12.50	13.00	13.50	12.75	12.75	12.00	12.25	24.00	86400	20.70	0.036	0.001	3067
2.53	18.00	18.00	17.25	17.00	16.75	16.50	16.50	24.03	86520	21.05	0.041	0.003	3547
2.50	9.00	9.25	8.00	8.25	8.25	8.50	6.50	24.00	86400	21.50	0.040	0.009	3413
2.57	6.50	7.50	7.75	8.00	8.00	7.00	8.00	24.00	86400	21.75	0.042	0.014	3629
2.42	7.00	6.00	8.00	7.50	5.50	4.00	8.00	24.00	86400	22.10	0.031	0.000	2678
1.88	19.50	17.00	18.00	19.00	17.50	11.00	10.00	24.02	86460	27.70	0.043	0.016	3718
2.43	6.50	7.50	6.75	7.38	6.00	7.50	7.50	24.00	86400	19.55	0.036	0.001	3110
2.02	6.00	7.50	6.50	7.25	6.75	5.00	6.75	23.95	86220	18.75	0.029	0.001	2500
2.47	9.50	11.00	10.00	9.50	10.00	12.00	10.33	24.00	86400	22.25	0.026	0.002	2203
2.59	6.75	7.00	7.00	7.00	6.25	6.00	6.25	24.00	86400	22.40	0.028	0.008	2376
2.19	7.00	8.50	9.25	8.50	8.50	9.50	9.50	24.00	86400	22.25	0.029	0.004	2462
2.49	8.50	9.50	9.00	9.25	9.13	9.08	9.08	24.00	86400	21.95	0.027	0.002	2290

Πίνακας 9.10: Πέμπτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 90 ημερών

Qm: ΜΕΣΟ	ΜΕΣΗ	ΤΥΠΙΚΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ	EVAL
ΗΛ.ΦΟΡΤΙΟ	ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ	Dnssm	Dnssm	Dchlor
Ah	mm	mm	$\times 10^{-12} m^2/s$	mm <sup>2</sup> /yr	Resistance
0.64	7.00	0.82	1.42	45	Extremely High
0.66	7.00	1.19	1.31	41	Extremely High
0.80	7.14	1.18	2.08	65	Extremely High
0.95	7.73	1.44	2.17	69	Extremely High
0.77	7.29	1.78	1.62	51	Extremely High
0.89	13.29	1.04	3.14	99	Very High
0.64	5.54	0.91	1.58	50	Extremely High
0.79	7.11	1.35	1.97	62	Extremely High
0.85	12.68	0.49	4.60	145	Very High
0.99	17.14	0.64	5.97	188	High
0.95	8.25	0.89	1.95	62	Extremely High
1.01	7.54	0.59	1.75	55	Extremely High
0.74	6.57	1.48	1.50	47	Extremely High
1.03	16.00	3.86	4.32	136	Very High
0.86	7.02	0.61	1.99	63	Extremely High
0.69	6.54	0.83	1.95	61	Extremely High
0.61	10.33	0.90	2.10	66	Extremely High
0.66	6.61	0.43	1.32	42	Extremely High
0.68	8.68	0.87	2.58	81	Very High
0.64	9.08	0.30	2.79	88	Very High

Πίνακας 9.11: Πρώτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΙΟΡΘ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΗΛΙΚΙΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΔΙΟΡΘ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	Wδίκτ	NaCl	ΔΙΑΛΥΜΑ
			ΗΛΙΚΙΑ	ΣΚΥΡΟΔ	ΕΛΕΓΧΟΥ	ημέρες		ΕΛΕΓΧΟΥ	gr	gr	%
			ημέρες								
PePu - SF10	ΔΝ	LWC-07A.UW.215	360	20-11-19	22-06-20	215	LWC-07A.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF10	ΔΝ	LWC-08A.UW.215	360	20-11-19	22-06-20	215	LWC-08A.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu	ΔΝ	LWC-09C.UW.215	360	27-11-19	29-06-20	215	LWC-09C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu	ΔΝ	LWC-010C.UW.215	360	27-11-19	29-06-20	215	LWC-010C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK20	ΔΝ	LWC-011C.UW.215	360	04-12-19	06-07-20	215	LWC-011C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK20	ΔΝ	LWC-012C.UW.215	360	04-12-19	06-07-20	215	LWC-012C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF20	ΔΝ	LWC-013C.UW.29	28	11-12-19	09-01-20	29	LWC-013C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - SF20	ΔΝ	LWC-014C.UW.29	28	11-12-19	09-01-20	29	LWC-014C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu	ΔΝ	LWC-015C.UW.217	360	11-12-19	15-07-20	217	LWC-015C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu	ΔΝ	LWC-016C.UW.217	360	11-12-19	15-07-20	217	LWC-016C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK20	ΔΝ	LWC-017C.UW.86	90	18-12-19	13-03-20	86	LWC-017C.UW.90	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK20	ΔΝ	LWC-018C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-018C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF20	ΔΝ	LWC-019C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-019C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF20	ΔΝ	LWC-020C.UW.26	28	18-12-19	13-01-20	26	LWC-020C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK10	ΔΝ	LWC-021C.UW.28	28	18-12-19	15-01-20	28	LWC-021C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - MK10	ΔΝ	LWC-022C.UW.28	28	18-12-19	15-01-20	28	LWC-022C.UW.28	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF10	ΔΝ	LWC-023C.UW.217	360	18-12-19	22-07-20	217	LWC-023C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PeCaPu - SF10	ΔΝ	LWC-024C.UW.217	360	18-12-19	22-07-20	217	LWC-024C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu - MK10	ΔΝ	LWC-025C.UW.218	360	18-12-19	23-07-20	218	LWC-025C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%
PePu -MK10	ΔΝ	LWC-026C.UW.218	360	18-12-19	23-07-20	218	LWC-026C.UW.360	24	10000.00	1111.11	10.00%

Πίνακας 9.12: Δεύτερο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών

Wαπιον	NaOH	ΔΙΑΛΥΜΑ	ΔΟΚΙΜ	ΔΟΚΙΜ	ΔΟΚΙΜ	ΗΜ/ΝΙΑ	ΩΡΑ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ	ΑΡΧΙΚΗ
		ΑΝΟΔΟΥ	ΤΑΣΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΕΝΑΡΞΗΣ	ΕΝΑΡΞΗΣ	ΤΑΣΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R	ΕΙΔ.ΑΝΤ. ρ	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ
gr	gr	%	V	A	W			V	A	W = VA	Ω	Ωm	°C
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.001	0.027	22-06-20	14:12	59.98	0.019	1.140	3157	595	27.7
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.013	0.390	22-06-20	14:07	60.00	0.027	1.620	2222	384	27.9
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.014	0.420	29-06-20	11:27	50.00	0.025	1.250	2000	333	29.5
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.018	0.540	29-06-20	11:28	50.00	0.031	1.550	1613	332	28.7
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.014	0.420	06-07-20	11:52	60.00	0.029	1.740	2069	358	31.3
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.010	0.300	06-07-20	11:52	59.98	0.024	1.440	2499	405	31.4
365.00	4.84	1.31%	29.90	0.015	0.449	09-01-20	12:43	39.98	0.023	0.920	1738	299	21.0
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.016	0.480	09-01-20	12:41	40.30	0.039	1.572	1033	190	29.4
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.014	0.420	15-07-20	11:35	60.00	0.030	1.800	2000	312	27.6
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.014	0.420	15-07-20	11:35	59.98	0.032	1.919	1874	340	27.3
365.00	4.84	1.31%	30.70	0.019	0.583	13-03-20	11:01	49.40	0.033	1.630	1497	265	18.9
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.017	0.510	13-01-20	11:03	49.98	0.032	1.599	1562	278	18.7
365.00	4.84	1.31%	29.80	0.017	0.507	13-01-20	11:24	49.70	0.031	1.541	1603	287	24.8
365.00	4.84	1.31%	29.98	0.018	0.540	13-01-20	11:27	39.99	0.032	1.280	1250	257	24.0
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.025	0.750	15-01-20	11:52	39.98	0.035	1.399	1142	202	20.4
365.00	4.84	1.31%	29.90	0.020	0.598	15-01-20	11:55	39.80	0.028	1.114	1421	238	19.6
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.090	2.700	22-07-20	11:10	59.98	0.018	1.080	3332	569	29.5
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.090	2.700	22-07-20	11:10	60.00	0.018	1.080	3333	609	29.7
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.010	0.300	23-07-20	11:34	59.98	0.021	1.260	2856	514	30.0
365.00	4.84	1.31%	30.00	0.090	2.700	23-07-20	11:34	60.00	0.019	1.140	3158	539	29.9

Πίνακας 9.13: Τρίτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών

ΗΜ/ΝΙΑ ΛΗΞΗΣ	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΤΕΛΙΚΗ	ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ				ΦΟΡΤΙΟ
		ΤΑΣΗ	ΕΝΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R	ΕΙΔ.ΑΝΤ. ρ	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ		ΘΕΣΗ Α	ΘΕΣΗ Β	ΘΕΣΗ Γ	ΘΡΑΥΣΗΣ	
		V	A	W = VA	Ω	Ωm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	kN
23-06-20	14:12	59.98	0.022	1.320	2726	514	25.7	100.00	41.00	42.00	42.00	41.67	13.07
23-06-20	14:07	60.00	0.034	2.040	1765	305	26.1	100.00	45.50	45.50	45.50	45.50	18.24
30-06-20	11:27	50.00	0.032	1.600	1563	260	27.0	100.00	48.00	46.00	47.50	47.17	19.73
30-06-20	11:28	49.97	0.031	1.549	1612	332	27.1	100.00	38.00	37.50	39.00	38.17	14.71
07-07-20	11:52	59.98	0.043	2.579	1395	242	30.5	100.00	46.00	45.00	45.00	45.33	19.01
07-07-20	11:52	59.97	0.031	1.859	1935	313	28.8	100.00	49.00	48.50	48.00	48.50	14.35
10-01-20	12:41	50.30	0.030	1.509	1677	288	22.6	100.00	46.00	45.50	45.50	45.67	17.86
10-01-20	12:43	39.98	0.027	1.079	1481	273	23.4	100.00	43.00	43.00	42.00	42.67	17.94
16-07-20	11:35	60.00	0.032	1.920	1875	293	27.3	100.00	51.00	50.00	50.00	50.33	20.87
16-07-20	11:35	59.97	0.035	2.099	1713	311	26.8	100.00	43.00	44.00	43.00	43.33	17.98
14-03-20	11:01	48.70	0.046	2.240	1059	188	24.1	100.00	44.00	45.00	44.00	44.33	17.40
14-01-20	11:03	49.98	0.052	2.599	961	171	24.8	100.00	44.50	44.00	44.00	44.17	17.82
14-01-20	11:24	45.30	0.031	1.404	1461	262	19.4	100.00	43.50	44.00	44.00	43.83	16.67
14-01-20	11:28	39.60	0.054	2.138	733	151	31.4	100.00	39.10	37.75	37.84	38.23	11.29
16-01-20	11:52	39.99	0.037	1.480	1081	191	18.7	100.00	44.00	45.00	44.00	44.33	16.91
16-01-20	11:52	35.90	0.030	1.077	1197	200	17.9	100.00	46.00	47.00	48.00	47.00	14.91
23-07-20	18:00	59.98	0.018	1.080	3332	569	27.5	100.00	45.00	46.00	47.00	46.00	14.63
23-07-20	18:00	60.00	0.018	1.080	3333	609	27.5	100.00	43.00	43.00	43.00	43.00	18.69
24-07-20	11:34	59.99	0.018	1.080	3333	599	27.1	100.00	43.50	44.00	43.50	43.67	13.65
24-07-20	11:34	59.97	0.019	1.139	3156	539	27.4	100.00	46.00	46.00	46.00	46.00	15.97

Πίνακας 9.14: Τέταρτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών

ΕΦΕΛΚ ΑΝΤΟΧΗ	Xd7	Xd5	Xd3	Xd1	Xd2	Xd4	Xd6	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜ/ΣΙΑ	ΜΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ	Qm: ΜΕΣΟ ΗΛ.ΦΟΡΤΙΟ
	-30	-20	-10	0	10	20	30	ώρες	sec	°C	A	A	C = As
2.00	4.00	5.50	2.00	5.00	5.00	4.50	4.50	24.00	86400	26.70	0.021	0.002	1771
2.55	5.50	6.00	5.00	3.50	5.00	5.00	5.00	24.00	86400	27.00	0.031	0.005	2635
2.66	6.50	6.00	5.00	5.00	8.00	7.00	7.00	24.00	86400	28.25	0.029	0.005	2462
2.45	6.50	6.50	6.50	5.75	5.75	4.50	7.00	24.00	86400	27.90	0.031	0.000	2678
2.67	12.50	12.50	14.50	14.75	14.50	14.50	15.75	24.00	86400	30.90	0.036	0.010	3110
1.88	11.00	11.00	9.50	12.50	9.50	11.00	10.00	24.00	86400	30.10	0.028	0.005	2376
2.49	5.50	5.50	6.50	6.75	4.00	5.25	5.25	23.97	86280	21.80	0.027	0.005	2286
2.68	9.00	7.50	6.50	5.00	7.75	8.00	6.00	24.03	86520	26.40	0.033	0.008	2855
2.64	5.00	7.50	6.00	6.00	7.00	6.00	5.50	24.00	86400	27.45	0.031	0.001	2678
2.64	6.50	4.50	5.50	6.50	6.50	7.00	6.00	24.00	86400	27.05	0.034	0.002	2894
2.50	9.00	9.25	8.00	8.25	8.25	8.50	6.50	24.00	86400	21.50	0.040	0.009	3413
2.57	6.50	7.50	7.75	8.00	8.00	7.00	8.00	24.00	86400	21.75	0.042	0.014	3629
2.42	7.00	6.00	8.00	7.50	5.50	4.00	8.00	24.00	86400	22.10	0.031	0.000	2678
1.88	19.50	17.00	18.00	19.00	17.50	11.00	10.00	24.02	86460	27.70	0.043	0.016	3718
2.43	6.50	7.50	6.75	7.38	6.00	7.50	7.50	24.00	86400	19.55	0.036	0.001	3110
2.02	6.00	7.50	6.50	7.25	6.75	5.00	6.75	23.95	86220	18.75	0.029	0.001	2500
2.02	5.00	5.00	5.50	5.00	5.00	4.50	5.00	24.83	89400	28.50	0.018	0.000	1609
2.77	1.00	1.00	1.50	1.50	2.00	3.00	1.00	24.83	89400	28.60	0.018	0.000	1609
1.99	8.00	9.50	9.50	9.50	9.00	9.00	6.50	24.00	86400	28.55	0.020	0.002	1685
2.21	4.50	5.00	7.00	7.50	5.00	7.00	7.00	24.00	86400	28.65	0.019	0.000	1642

Πίνακας 9.15: Πέμπτο τμήμα αναλυτικών αποτελεσμάτων μεθόδου NT 492 σε διάστημα 215 ημερών

Qm: ΜΕΣΟ ΗΛ.ΦΟΡΤΙΟ	ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ Dnssm	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ Dnssm	EVAL Dchlor
Ah	mm	mm	$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$	$\text{mm}^2/\text{yr}$	Resistance
0.49	4.36	1.14	0.78	25	Extremely High
0.73	5.00	0.76	0.98	31	Extremely High
0.68	6.36	1.11	1.57	50	Extremely High
0.74	6.07	0.83	1.23	39	Extremely High
0.86	14.14	1.21	3.02	95	Very High
0.66	10.64	1.07	2.38	75	Extremely High
0.64	5.54	0.91	1.58	50	Extremely High
0.79	7.11	1.35	1.97	62	Extremely High
0.74	6.14	0.85	1.35	43	Extremely High
0.80	6.07	0.84	1.16	37	Extremely High
0.95	8.25	0.89	1.95	62	Extremely High
1.01	7.54	0.59	1.75	55	Extremely High
0.74	6.57	1.48	1.50	47	Extremely High
1.03	16.00	3.86	4.32	136	Very High
0.86	7.02	0.61	1.99	63	Extremely High
0.69	6.54	0.83	1.95	61	Extremely High
0.45	5.00	0.29	0.96	30	Extremely High
0.45	1.57	0.73	0.24	8	Extremely High
0.47	8.71	1.11	1.73	55	Extremely High
0.46	6.14	1.25	1.25	39	Extremely High

