



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ | «ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»



Διαπερατότητα αυτοσυμπκνούμενου σκυροδέματος με μετακαολίνη

Βούκια Δήμητρα
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων: Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης | Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη μεταπτυχιακή μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν σε αυτήν την πορεία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας κ. Μπαδογιάννη Ευστράτιο, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την αμέριστη βοήθεια καθώς και την πολύτιμη καθοδήγησή του, συμβάλλοντας με την άρτια επιστημονική του κατάρτιση στην εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης στο διδακτικό και ερευνητικό προσωπικό του εργαστηρίου «Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας» της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη βοήθεια και την υλικοτεχνική υποστήριξη που μας παρείχαν για τη διεξαγωγή σημαντικού τμήματος του πειραματικού μέρους, στον κ. Σφήκα Ιωάννη, υποψήφιο Διδάκτορα στον Τομέα Δομοστατικής, για την πολύτιμη βοήθεια του στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, όπως επίσης και στον κ. Χ. Λεπτοκαρίδη, προιστάμενο του εργαστηρίου ελέγχου ποιότητας σκυροδέματος της Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, καθώς και το προσωπικό του εργαστηρίου για τη συνδρομή τους στην πειραματική μελέτη των δοκιμών σκυροδέματος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Τρέζο Κωνσταντίνο, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και κ. Τσιβιλή Σωτήριο, Αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για τη στήριξή τους, με κάθε δυνατό τρόπο, στη μέχρι τώρα πορεία μου.

*Η ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής συγχρηματοδοτήθηκε μέσω του Έργου «Υποτροφίες ΙΚΥ» από πόρους του ΕΠ «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση», του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (ΕΚΤ) του ΕΣΠΑ, 2007–2013.

Βούκια Δήμητρα
e-mail: dimitra.voukia@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από τις μηχανικές του ιδιότητες, όσο και από τις ιδιότητες ανθεκτικότητάς του. Η βελτίωση των ιδιοτήτων αυτών μπορεί να επιτευχθεί σε σημαντικό βαθμό μέσω της χρήσης πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών στο σκυρόδεμα. Τα υλικά αυτά, λόγω της ποζολανικής τους δράσης, αλλά και της λειτουργίας τους ως φυσικά πληρωτικά μέσα, συντελούν στην παρασκευή σκυροδέματος, με συμπαγή και συνεκτική δομή, μειωμένη διαπερατότητα και αυξημένη μηχανική αντοχή. Ανάμεσα στα ποικίλα τσιμεντοειδή υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος, όπως η πυριτική παιπάλη, η σκωρία υψικαμίνων και η ιπτάμενη τέφρα, ανήκει και ο μετακαολίνη, ένα υλικό με αυξανόμενη εφαρμογή στη βιομηχανία σκυροδέματος.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη των ιδιοτήτων ανθεκτικότητας μιγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, τα οποία περιέχουν μετακαολίνη. Συνολικά εξετάστηκαν 9 διαφορετικές συνθέσεις ΑΣΣ (4 στις οποίες έγινε αντικατάσταση τσιμέντου με μετακαολίνη σε διάφορα ποσοστά, 4 στις οποίες έγινε αντικατάσταση φίλλερ με μετακαολίνη σε διάφορα ποσοστά και 1 χωρίς την προσθήκη μετακαολίνη), καθώς και 2 συνθέσεις συμβατικού σκυροδέματος, σε δοκίμια ηλικίας 360 ημερών.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, πραγματοποιείται μια θεωρητική διερεύνηση της έννοιας της ανθεκτικότητας, των παραγόντων που την επηρεάζουν, καθώς και των βασικών μηχανισμών φθοράς και διείσδυσης των διαβρωτικών μέσων στο σκυρόδεμα. Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες του μετακαολίνη, η δράση του και η χρήση του στην παραγωγή σκυροδέματος. Τέλος, επιχειρείται μια ανασκόπηση στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και έρευνα που έχει συντελεστεί μέχρι σήμερα, σε θέματα σχετικά με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε επιμέρους δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων ανθεκτικότητας, και ειδικότερα της διαπερατότητας, των μιγμάτων ΑΣΣ που εξετάζονται. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν: η τριχοειδής απορρόφηση (S), το ανοικτό πορώδες (OP), η υδατοπερατότητα (w_{p120}/w_{p500}) και η διαπερατότητα σε αέρα (K), ενώ ακολούθησε και ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων κάθε επιμέρους σύνθεσης. Τέλος, επιχειρείται η συσχέτιση των παραγόντων ανθεκτικότητας που εξετάστηκαν μεταξύ τους, καθώς και η εξέταση της επίδρασης του χρόνου συντήρησης στις ιδιότητες της ανθεκτικότητας και στην θλιπτική αντοχή.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι ότι η χρήση του MK, ως πρόσθετο συστατικό του ΑΣΣ, είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση όλων των ιδιοτήτων που σχετίζονται με τη διαπερατότητα του ΑΣΣ και οι οποίες μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Μάλιστα καταγράφηκε βελτίωση των ιδιοτήτων, ανέξαρτητα του είδους αντικατάστασης (τσιμέντου ή φίλλερ) από MK, και για ποσοστά αντικατάστασης που κυμαίνονταν μέχρι 28%.

ABSTRACT

The performance of concrete is determined to a great extent not only by its mechanical, but also by its durability properties. The improvement of these properties can be achieved by replacement of Portland cement by supplementary cementitious materials, which due to their pozzolanic behavior and filling effect, can lead to the production of a more consistent and compact concrete, which exhibits reduced permeability and enhanced mechanical properties. Among the various cementitious materials used for the production of concrete, such as silica fume, granulate blast-furnace slag and fly ash, belongs metakaolin (MK), a recent material with growing implementation in the concrete industry.

The aim of this dissertation is to assess the durability properties of different Self-Compacting Concrete (SCC) mixtures, which contain metakaolin. In total, 9 different mixtures of SCC (4 mixtures in which cement has been substituted in various percentages with metakaolin, 4 mixtures in which limestone has been substituted in various percentages with metakaolin, as well as 1 mixture without the incorporation of metakaolin) were examined. Additionally, 2 typical Normally Vibrated Concrete (NVC) mixtures were examined too. The specimens used for the purposes of this research were water-cured for 360 days.

In the first part of this dissertation, a theoretical study on the durability of concrete is performed, along with the presentation of the mostly influencing factors, as well as the governing deterioration mechanisms in concrete, as viewed through bibliographic research. Furthermore, the basic properties of metakaolin, its effect and also its use in concrete, are presented. Towards the end of this part, a literature review of the research conducted until recently, on topics related to the subject of this thesis, is attempted.

In the second part of this dissertation, the experimental procedure implemented for each durability test, which was conducted in the SCC mixtures under examination, with respect to the permeability properties, is presented analytically. In more detail, the phenomena that were investigated are: the sorptivity (S), the open porosity (OP), the water permeability (w_{p120}/w_{p500}), as well as the air permeability (K) of the SCC mixtures, whereas the compressive strength (f_c) of the specimens of each mixture, was also evaluated. Finally, the correlation between the various durability properties, which were examined, is considered, along with the study of the influence of the curing period of concrete specimens on the durability properties and the compressive strength.

The main conclusions drawn in this dissertation are that, the incorporation of MK in SCC resulted in the improvement of all the properties related to the permeability of SCC, and which were examined in this study. More specifically, it can be said that, irrespective of the material (cement or limestone) replaced with MK, an improvement of these properties can be observed for replacement percentages ranging up to 28%.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Leistung des Betons wird in einem hohen Maß, nicht nur von seinen mechanischen Eigenschaften, sondern auch von seiner Widerstandsfähigkeit bestimmt. Die Verbesserung dieser Eigenschaften kann durch den teilweisen Ersatz von Portland-Zement durch Zuschlagstoffe erreicht werden. Diese Zusatzstoffe können, wegen ihrer starken puzzolanischen Aktivität und ihrer wesentlichen Beitrag zu der Verbesserung der Porenstruktur des Zementsteins, zu der Herstellung von Beton führen, das eine bessere Kohäsion, eine verringerte Durchlässigkeit und auch eine höhere Festigkeit ausweisen kann. Unter den verschiedenen Zuschlagstoffen, die dem Zement beigemischt werden können, wie zum Beispiel Silicastaub, Hüttensand und Flugasche, gehört Metakaolin (MK), ein relativ neues Material mit allmählich zunehmendem Einsatz in der Betonindustrie.

Wesentliche Zielstellung dieser Meisterarbeit ist es die Eigenschaften, in Bezug auf die Widerstandsfähigkeit von unterschiedlichen Selbstverdichtender Beton (SVB) Mischungen, die Metakaolin enthalten, zu beurteilen. Insgesamt, wurden 9 unterschiedliche Mischungen aus SVB (4 Mischungen in denen Zement durch Metakaolin, in verschiedenen Prozentsätzen, ersetzt worden war, 4 Mischungen in denen Kalkstein durch Metakaolin, in verschiedenen Prozentsätzen ersetzt worden war und 1 Mischung ohne Metakaolin), und 2 Normalbeton Mischungen, untersucht. Die verwendeten Probekörper, wurden über einen Zeitraum von 360 Tagen unter Wasser gelagert.

Im ersten Teil dieser Dissertation wurde eine theoretische Auseinandersetzung mit verschiedenen Themen bezüglich der Widerstandsfähigkeit von Beton geführt, und danach wurden die bedeutendsten Faktoren und die hauptsächlichen Mechanismen, die für die Verschlechterung des Betons verantwortlich sind, präsentiert. Weiterhin, wurden die grundlegenden Eigenschaften von Metakaolin, sein Anwendungsbereich und seine Auswirkungen auf die Betoneigenschaften, beschrieben. Am Ende des ersten Teils, wird die bis vor kurzem für die Themenbereiche dieser Masterarbeit relevante Fachliteratur dargestellt.

Im zweiten Teil dieser Dissertation wurden die angewendeten Prüfverfahren zur Untersuchung der Widerstandsfähigkeit der SVB Mischungen, analytisch präsentiert. Genauer gesagt, wurden die folgenden Phänomene überprüft: die Sorptivität (S), die offene Porosität (OP), die Wasserdurchlässigkeit (w_{p120}/w_{p500}) und die Luftdurchlässigkeit (K). Des Weiteren, wurde die Druckfestigkeit der Probekörper jeder SVB Mischung geprüft. Abschließend, wurde die Korrelation zwischen den verschiedenen Widerstandsfähigkeit-Parametern untersucht und der Einfluss der Nachbehandlungsdauer der Probekörper auf die Widerstandsfähigkeit berücksichtigt.

Hauptsächliche Schlussfolgerung dieser Dissertation ist es dass, der Ersatz sowohl von Portlandzement, als auch von Kalkstein, durch Metakaolin, zur wesentlichen Verbesserung aller Eigenschaften des SVB, bezüglich seiner Durchlässigkeit, führen kann, und zwar für Prozentsätze, die bis 28% variieren.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	9
1.1	Γενικά.....	9
1.2	Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	10
1.2.1	Το νερό ως παράγοντας φθοράς.....	12
1.2.2	Συνδεδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα.....	14
1.2.3	Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	16
1.3	Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων.....	16
1.3.1	Τριχοειδής απορρόφηση (Sorptivity).....	17
1.3.2	Υδατοπερατότητα (Waterpermeability).....	18
1.3.3	Διαπερατότητα σε αέρα (Air permeability).....	20
1.3.4	Ενανθράκωση (Carbonation).....	22
2	ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ.....	28
2.1	Ο Μετακαολίνης και η χρήση του στο σκυρόδεμα.....	28
3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	31
3.1	Γενικά.....	31
3.2	Τρέχουσαερευνητική εργασία - μελέτη και αποτελέσματα.....	31
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	39
4.1	Συνθέσεις – Σκοπός πειραμάτων.....	39
4.2	Τριχοειδής απορρόφηση και πορώδες.....	42
4.2.1	Σκοπός του πειράματος.....	42
4.2.2	Προετοιμασία των δοκιμίων.....	42
4.2.3	Πειραματική διαδικασία.....	42
4.2.4	Υπολογισμός πορώδους.....	44
4.3	Υδατοπερατότητα.....	45
4.3.1	Σκοπός του πειράματος.....	45
4.3.2	Προετοιμασία των δοκιμίων.....	46
4.3.3	Υδατοπερατότητα με τη διάταξη GWT-4000.....	46
4.3.4	Υδατοπερατότητα κατά BSEN 12390-8:2000.....	51
4.4	Διαπερατότητα σε αέρα.....	55
4.4.1	Σκοπός του πειράματος.....	55
4.4.2	Προετοιμασία των δοκιμίων.....	55
4.4.3	Πειραματική διάταξη.....	55
4.4.4	Πειραματική διαδικασία.....	58
4.5	Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής.....	61
4.5.1	Σκοπός του πειράματος.....	61
4.5.2	Προετοιμασία των δοκιμίων.....	61
4.5.3	Πειραματική διαδικασία.....	61
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	63
5.1	Τριχοειδής απορρόφηση (S).....	63
5.2	Ανοικτό πορώδες (OP).....	67
5.3	Υδατοπερατότητα με τη διάταξη GWT – 4000 (wp120).....	70
5.4	Υδατοπερατότητα κατά BSEN 12390-8:2000 (wp500).....	80
5.5	Διαπερατότητα σε αέρα (gp).....	83
5.6	Θλιπτική αντοχή (fc).....	87
5.7	Συσχέτιση παραμέτρων ανθεκτικότητας.....	90

5.7.1	Συσχέτιση του παράγοντα ανθεκτικότητας S με τους παράγοντες ανθεκτικότητας OP / c_{w120} / lnT / K και την θλιπτική αντοχή (f_c)	91
5.7.2	Συσχέτιση του παράγοντα ανθεκτικότητας OP με τους παράγοντες ανθεκτικότητας c_{w120} / lnT / K και την θλιπτική αντοχή (f_c).....	98
5.7.3	Συσχέτιση του παράγοντα ανθεκτικότητας c_{w120} με τους παράγοντες ανθεκτικότητας lnT / K και την θλιπτική αντοχή (f_c)	104
5.7.4	Συσχέτιση του παράγοντα ανθεκτικότητας K με την θλιπτική αντοχή (f_c).....	107
5.8	Επίδραση του χρόνου συντήρησης στις ιδιότητες ανθεκτικότητας και στην θλιπτική αντοχή	108
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	119
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123

1 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.1 Γενικά

Κάθε κατασκευή από σκυρόδεμα οφείλει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε αντοχή και λειτουργικότητα κατά τη διάρκεια της προκαθορισμένης ή αναμενόμενης διάρκειας ζωής της. Πιο συγκεκριμένα, το σκυρόδεμα οφείλει να ανθίσταται στις δυσμενείς επιδράσεις του περιβάλλοντος (φυσικές ή χημικές) στις οποίες αναμένεται να εκτεθεί κατά τη διάρκεια του χρόνου. Η ικανότητα αυτή του σκυροδέματος αναφέρεται ως ανθεκτικότητα (durability).

Ο μεγάλος χρόνος ζωής μιας κατασκευής θεωρείται συνώνυμο της ανθεκτικότητας. Καθώς η ανθεκτικότητα μιας κατασκευής είναι πλήρως εξαρτώμενη από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί μονομερώς ως έννοια. Οπότε είναι σύνηθες να γίνεται μια γενική αναφορά στο περιβάλλον όταν την ορίζουμε. Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών (διαβρωτικών μέσων) που συνιστούν το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται. Εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος, με μείωση της μηχανικής του αντοχής αλλά και με απώλεια μάζας. Όλοι οι μηχανισμοί προσβολής του σκυροδέματος περιλαμβάνουν σύνθετες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα πόρων του και η πλειοψηφία των προβλημάτων ανθεκτικότητας οφείλεται στην ταυτόχρονη δράση δύο ή περισσοτέρων παραγόντων, όπως αναλύεται στη συνέχεια. Επομένως, είναι συχνά δύσκολο να απομονωθούν και να μελετηθούν οι παράγοντες αυτοί, διότι ο υπερισχύων μηχανισμός μπορεί να είναι δυσδιάκριτος.

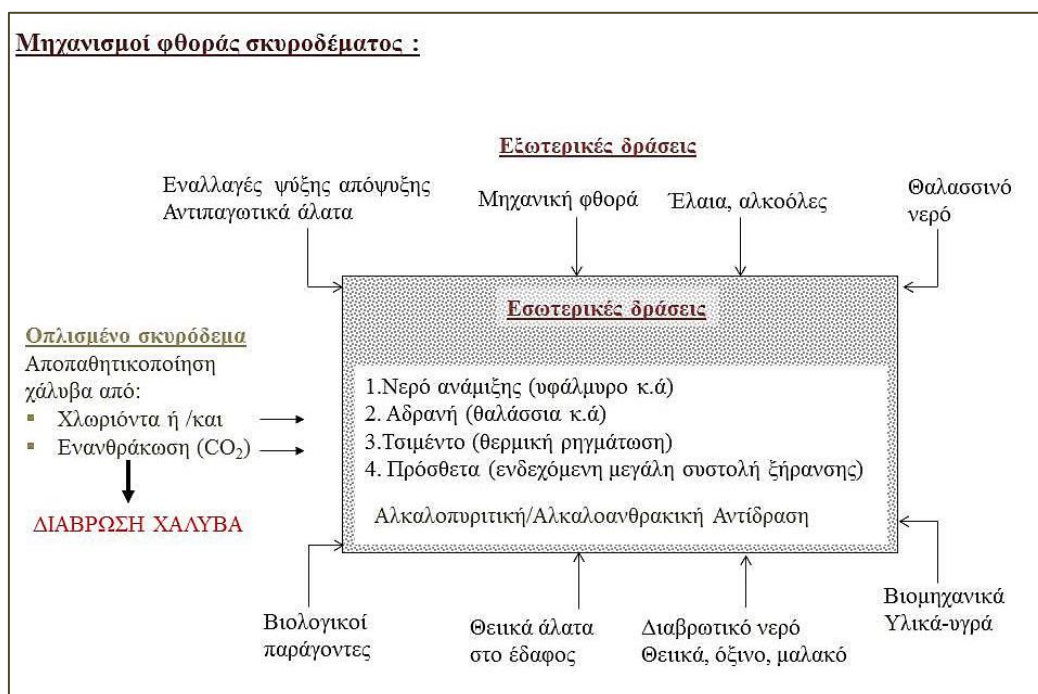
Μέχρι προσφάτως, η έρευνα στην τεχνολογία τσιμέντου και σκυροδέματος επικεντρωνόταν στην επίτευξη υψηλότερων χαρακτηριστικών αντοχής των υλικών, δεδομένης της επικρατούσας αντίληψης ότι ένα σκυρόδεμα υψηλής αντοχής αποτελεί παράλληλα και ανθεκτικό σκυρόδεμα. Ωστόσο, είναι πλέον γνωστό ότι για αρκετές κατηγορίες δράσεων, όχι μόνο η αντοχή αλλά και η ανθεκτικότητα οφείλουν να λαμβάνονται υπόψη και να καθορίζονται σαφώς κατά τη φάση σχεδιασμού της κατασκευής, δίχως να παραγνωρίζεται κανένας από τους δύο αυτούς παράγοντες. Επιπροσθέτως, ενώ το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται, διαστρώνεται και συντηρείται κατάλληλα μπορεί να είναι ανθεκτικό κάτω από τις περισσότερες συνθήκες φυσικού και βιομηχανικού περιβάλλοντος, είναι δυνατό συχνά να εμφανίζονται και περιπτώσεις πρόωμης φθοράς των κατασκευών. Επομένως, προκύπτει η αναγκαιότητα για τον έλεγχο και τον προσδιορισμό των παραγόντων που είναι υπεύθυνοι για την έλλειψη ανθεκτικότητας.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το ζήτημα της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος δεν αντιμετωπίζεται σε επαρκή βαθμό από τους διάφορους κανονισμούς, υπό την υπόθεση ότι το

σκυρόδεμα θα ανθίσταται στους διαφόρους μηχανισμούς διάβρωσης αν διαθέτει υψηλή ποιότητα, όπως αυτή εκφράζεται με τη μηχανική αντοχή και υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται ορισμένες απαιτήσεις για το πάχος επικάλυψης του οπλισμού.

1.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας

Οι βασικές αιτίες μείωσης της ανθεκτικότητας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα μπορεί να οφείλονται είτε σε εξωτερικούς είτε σε εσωτερικούς παράγοντες (μέσα στη μάζα του σκυροδέματος) και μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή μηχανικές (Σχήμα 1). Η μηχανική φθορά μπορεί να οφείλεται σε κρούση, τριβή/απότριψη, διάβρωση ή σπηλαίωση. Οι χημικοί παράγοντες φθοράς περιλαμβάνουν την αλκαλοπυριτική αντίδραση και τις αλκαλοανθρακικές αντιδράσεις (alkali-carbonate reactions), ενώ οι εξωτερικοί παράγοντες χημικής φθοράς μπορεί να οφείλονται στη δράση επιθετικών ιόντων, όπως χλωριόντων, θεικών αλάτων, ανθρακικού οξέως καθώς επίσης και ποικίλων φυσικών ή βιομηχανικών υγρών και αερίων. Οι φυσικές αιτίες μείωσης της ανθεκτικότητας περιλαμβάνουν την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών ή διαφορές λόγω της θερμικής διόγκωσης μεταξύ των αδρανών και του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Μία ακόμη αιτία μείωσης της ανθεκτικότητας αποτελεί η επίδραση του παγετού στο σκυρόδεμα (εναλλαγή ψύξης-απόψυξης) με ή χωρίς τη χρήση αντιπαγωτικών αλάτων.



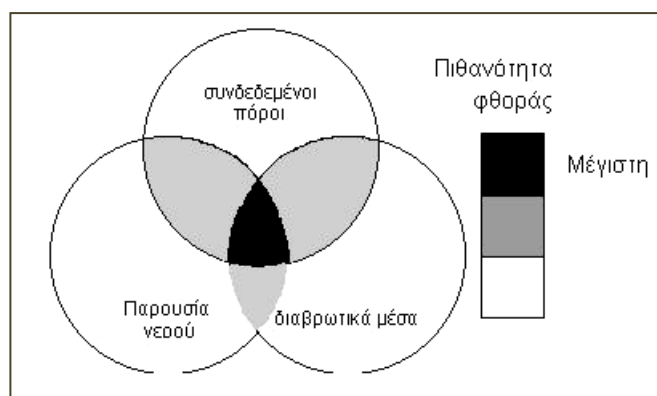
Σχήμα 1: Μηχανισμοί φθοράς σκυροδέματος (Κόλιας, 2010-2011).

Οι τρεις κατηγορίες ρευστών που σχετίζονται άμεσα με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι το νερό (με ή χωρίς την παρουσία διαβρωτικών μέσων), το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 και το οξυγόνο O_2 . Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ευκολία με την οποία τα ρευστά αυτά εισέρχονται και μεταφέρονται στο σκυρόδεμα, δηλαδή από τη δομή της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως διαπερατότητα (permeability) του σκυροδέματος. Με την αυστηρή έννοια του όρου η διαπερατότητα αναφέρεται στη ροή διαμέσου ενός πορώδους μέσου, η οποία μπορεί να οφείλεται λ.χ. στη διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο συστημάτων (π.χ. αέρα εγκλωβισμένο στους πόρους – ατμοσφαιρικού αέρα). Ωστόσο, η κίνηση των διαφόρων ρευστών μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί όχι μόνο διαμέσου ροής σε πορώδες μέσο, αλλά και μέσω διάχυσης και απορρόφησης. Επομένως, η ευρύτερη έννοια που χαρακτηρίζει το φαινόμενο είναι η διεισδυτικότητα (penetrability), ωστόσο ο όρος διαπερατότητα (permeability) έχει επικρατήσει και θα χρησιμοποιείται για να περιγράψει γενικότερα την κίνηση των ρευστών μέσω του σκυροδέματος, εξαιρουμένων των περιπτώσεων όπου για λόγους σαφήνειας, θα γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των επιμέρους διαφορετικών κατηγοριών ροής. Ας σημειωθεί ότι η ικανότητα μεταφοράς ρευστού του υλικού αλλάζει διαρκώς, λόγω των κύκλων συστολοδιαστολής των πόρων και μικρορωγμών και λόγω των συνεχών φυσικοχημικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ του εισερχόμενου ρευστού και των ορυκτών της τσιμεντόπαστας.

Συνοψίζοντας, οι βασικοί παράγοντες που φαίνεται να ρυθμίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι:

- Η παρουσία νερού, καθαρού ή με επιθετικά ιόντα, όπως το διοξείδιο του άνθρακα ή το οξυγόνο
- Η παρουσία συνδεδεμένων πόρων στο σκυρόδεμα
- Η έκθεση σε συνθήκες διαβρωτικού περιβάλλοντος

Πρέπει να τονιστεί ότι οι παράγοντες αυτοί δρουν κατά συνεργιστικό τρόπο. Όταν ένας παράγοντας υπάρχει μόνος του, χωρίς την παρουσία των υπολοίπων, τότε δεν υπάρχει κίνδυνος φθοράς. Όταν δύο παράγοντες συνυπάρχουν η πιθανότητα φθοράς αυξάνεται. Όταν και οι τρεις παράγοντες συνυπάρχουν ο κίνδυνος φθοράς μεγιστοποιείται. Επίσης, η απουσία ενός από τους τρεις παράγοντες δύναται να απαλείφει πλήρως τον κίνδυνο φθοράς του σκυροδέματος, αφού π.χ. ανεξάρτητα πόσο πορώδες είναι το σκυρόδεμα, χωρίς νερό δεν φθείρεται σε περιβάλλον διαβρωτικών μέσων όπως SO_4^{2-} , Cl^- , γιατί απλούστατα, απουσία νερού, τα ιόντα αυτά δεν μπορούν να εισέλθουν στους πόρους του σκυροδέματος για να προκαλέσουν τη φθορά του.

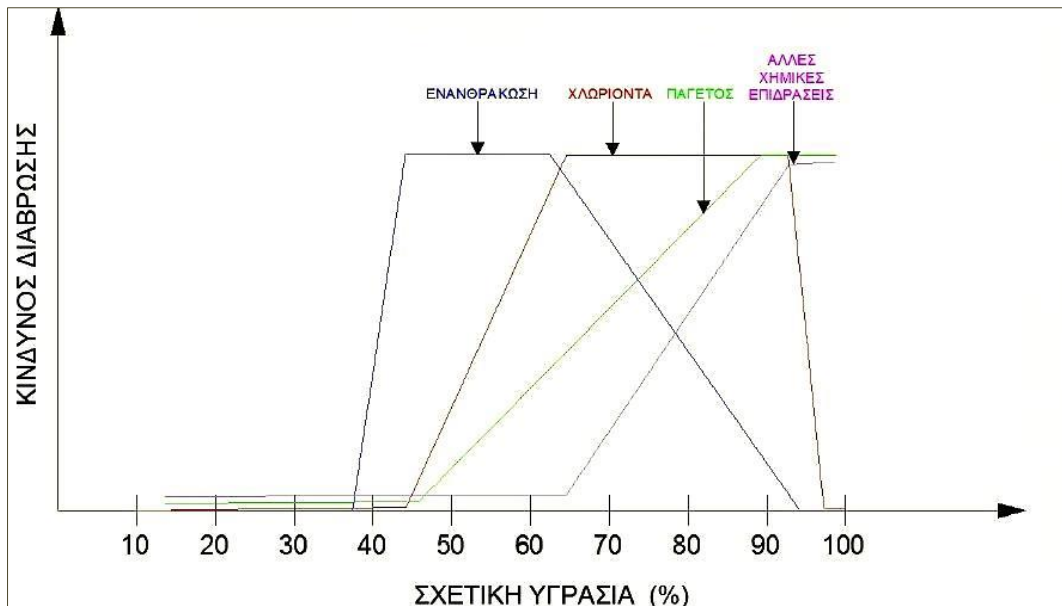


Σχήμα 2: Πιθανότητα φθοράς σκυροδέματος συναρτήσει της δράσης των παραγόντων ανθεκτικότητας (Μπαδογιάννης, 2002).

1.2.1 Το νερό ως παράγοντας φθοράς

Το σκυρόδεμα, μεταξύ άλλων υλικών στη φύση, είναι ευαίσθητο στις φυσικές και χημικές διαδικασίες φθοράς που σχετίζονται με το νερό. Τα μόρια του νερού είναι πολύ μικρά και επομένως είναι σε θέση να διεισδύουν μέσα σε εξαιρετικά λεπτούς πόρους ή κοιλοότητες.

Σημειώνεται ότι σημασία συνήθως έχει η περιεχόμενη υγρασία στο σκυρόδεμα και όχι η ατμοσφαιρική υγρασία. Υπό σταθερές συνθήκες οι δύο τιμές αυτές της υγρασίας συμπίπτουν, αλλά υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες το σκυρόδεμα συγκρατεί υγρασία με μεγαλύτερη ευκολία από ότι τη χάνει. Αυξημένη υγρασία, προκαλεί γέμισμα των μεγαλύτερων πόρων με νερό, μειώνοντας έτσι το διατιθέμενο χώρο των πόρων για διάχυση των αερίων. Η διαπερατότητα του σκυροδέματος έναντι αερίων μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της υγρασίας και γίνεται πολύ μικρή έως μηδενική στην περίπτωση του κορεσμένου σκυροδέματος. Ο κίνδυνος φθοράς από κάποια συγκεκριμένη επίδραση, μπορεί να γίνεται μέγιστος για διαφορετικά κάθε φορά όρια υγρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3: Κίνδυνος διάβρωσης ανάλογα με τη σχετική υγρασία (Κόλιας, 2010-2011).

Το νερό παρουσιάζει την αξιοσημείωτη ικανότητα να διαλύει τις περισσότερες ουσίες από οποιοδήποτε άλλο γνωστό υγρό, ιδιότητα η οποία οφείλεται στην παρουσία πολλών ιόντων και αερίων σε μερικές περιπτώσεις, τα οποία με την σειρά τους συντελούν στην πρόκληση χημικής αποσύνθεσης των στερεών υλικών.

Επίσης το νερό έχει την υψηλότερη θερμότητα εξάτμισης ανάμεσα στα κοινά υγρά επομένως, σε συνήθεις θερμοκρασίες έχει την τάση να υφίσταται σε υγρή μορφή μέσα σε ένα πορώδες υλικό, παρά να εξατμίζεται και να αφήνει το υλικό ξηρό. Επιπλέον, στα πορώδη στερεά, οι εσωτερικές μετακινήσεις της υγρασίας και οι δομικοί μετασχηματισμοί του νερού, είναι γνωστό ότι προκαλούν πολλών τύπων αλλαγές που οδηγούν σε διάσπαση της μάζας του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, η πήξη του νερού σε πάγο, ο σχηματισμός μιας διατεταγμένης δομής του νερού μέσα σε λεπτούς πόρους, η ανάπτυξη οσμωτικής πίεσης λόγω των διαφορών στη συγκέντρωση ιόντων, και η σταδιακή ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων λόγω διαφορικών πιέσεων εξάτμισης, μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλές εσωτερικές τάσεις.

Οι τάσεις αυτές με τη σειρά τους οδηγούν στη δημιουργία εσωτερικών ρωγμών και γενικότερα κενών με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του υλικού. Είναι σαφές πως το νερό αποτελεί στοιχείο του μηχανισμού φθοράς του σκυροδέματος και ο ρόλος του ως παράγοντας που επηρεάζει την ανθεκτικότητα είναι δεδομένος. Το γεγονός ότι το νερό αποτελεί “κοινό σημείο τομής” των μηχανισμών φθοράς, βρίσκεται σε συμφωνία με την θεώρηση ότι όλοι οι παράγοντες της ανθεκτικότητας είναι στενά εξαρτημένοι μεταξύ τους, και το νερό αποτελεί τον συνδετικό τους κρίκο.

Οι τρόποι, με τους οποίους το νερό επηρεάζει την ανθεκτικότητα, συνοψίζονται ως εξής:

- Επηρεάζει το πορώδες, αφού ο υψηλός λόγος w/c αυξάνει την παρουσία τριχοειδών πόρων
- Αποτελεί την αιτία διάχυσης των διαβρωτικών μέσων στους πόρους του σκυροδέματος
- Αποτελεί τον διαλύτη των διαβρωτικών μέσων
- Συμμετέχει στην αντίδραση της διάβρωσης του οπλισμού και στην καταστροφή της παθητικής του προστασίας
- Συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και στην ενανθράκωση

Εκτός των παραπάνω περιπτώσεων, το νερό είναι ο βασικός παράγοντας που διαμορφώνει την αντοχή του σκυροδέματος στη δοκιμή ψύξης-απόψυξης και γενικότερα την ανθεκτικότητα σε έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Μια απλή θεώρηση του μηχανισμού φθοράς του σκυροδέματος από τους κύκλους ψύξης-απόψυξης αναφέρεται στη διόγκωση του νερού που υπάρχει στους πόρους του σκυροδέματος, καθώς αυτό μετατρέπεται σε πάγο. Η αύξηση του όγκου του νερού προκαλεί τάσεις στο εσωτερικό του σκυροδέματος που οδηγούν στη δημιουργία εσωτερικών ρωγμών και γενικότερα κενών τα οποία μειώνουν την αντοχή του υλικού.

1.2.2 Συνδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα

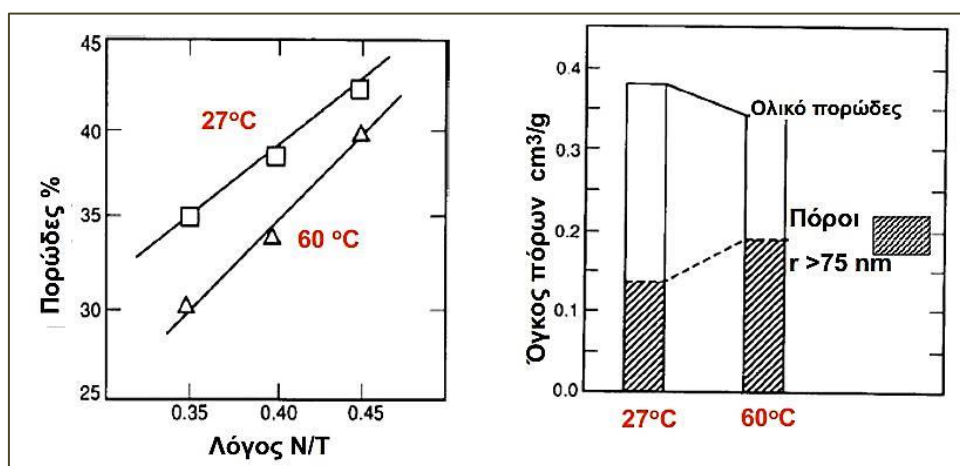
Η μεταφορά και η κίνηση των ρευστών μέσα στο σκυρόδεμα σχετίζεται με το πορώδες στη μάζα του τσιμεντοπολτού αλλά και στη διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη τσιμεντοπολτού και αδρανών. Η ροή ξεκινά από την επιφάνεια του υλικού και, συνεπώς, οι πόροι της επιφάνειας του τσιμέντου και της τσιμεντόπαστας, καθορίζουν το ρυθμό μεταφοράς μάζας και διαβρωτικών μέσων.

Το πορώδες εκφράζει το συνολικό ποσοστό των πόρων στο συνολικό όγκο και όχι το είδος τους, επομένως δεν μπορεί να υπάρξει οποιαδήποτε αναλογική σχέση μεταξύ συνολικού πορώδους και διαπερατότητας. Η σχέση τους χαρακτηρίζεται ως ποιοτική αφού οι πόροι δεν συντελούν στην αύξηση της διαπερατότητας όταν είναι ασυνεχείς και καλύπτονται από προσροφημένο νερό, ή έχουν μικρό άνοιγμα. Πόροι οι οποίοι σχετίζονται με τη διαπερατότητα του σκυροδέματος είναι εκείνοι με διάμετρο τουλάχιστον 120-160 nm. Βέβαια το αυξημένο πορώδες στο σκυρόδεμα αυξάνει την πιθανότητα με την πάροδο του χρόνου να αποκτήσουν οι πόροι συνέχεια και να δημιουργηθούν “κανάλια ροής” των ρευστών. Αυτό συμβαίνει γιατί τόσο η καταπόνηση της κατασκευής όσο και οι θερμοκρασιακές μεταβολές ευνοούν την ανάπτυξη τοπικών εφελκυστικών τάσεων, οι οποίες μπορεί να διευρύνουν τους πόρους και να προκαλέσουν την σύνδεση τους. Γενικά η σύνδεση των πόρων εννοείται όταν:

- Υπάρχουν μικρορωγμές στη δομή του τσιμέντου, που προέρχονται είτε από μηχανική καταπόνηση είτε από θερμοκρασιακές μεταβολές
- Λόγω κακής συντήρησης μετά τη διάστρωση του σκυροδέματος εννοείται το φαινόμενο της εξίδρωσης και η ταυτόχρονη δημιουργία πόρων κατά την άνοδο του νερού στην επιφάνεια.

- Παρατηρείται περιορισμένη ομοιογένεια του σκυροδέματος λόγω χαμηλής εργασιμότητας σε συνδυασμό με κακή ή ανεπαρκή μηχανική συμπίκνωση.

Ένας επιπρόσθετος παράγοντας που επηρεάζει το ολικό πορώδες του σκυροδέματος, αλλά και το είδος και την κατανομή των πόρων σε αυτό, είναι η θερμοκρασία. Ο τρόπος επιρροής της φαίνεται στο Σχήμα 4. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνεται το ολικό πορώδες του σκυροδέματος, αλλά αυξάνεται ο όγκος των πόρων με ακτίνα μεγαλύτερη από 75 nm, που είναι και οι πόροι που σχετίζονται περισσότερο με τη διαπερατότητα του σκυροδέματος.



Σχήμα 4: Επιρροή της θερμοκρασίας στο πορώδες και τον όγκο των πόρων του σκυροδέματος (Κόλιας, 2010-2011).

Όσον αφορά την διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη, αυτή καταλαμβάνει το 1/3 έως 1/2 του συνολικού όγκου της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας στο σκυρόδεμα και όπως είναι γνωστό χαρακτηρίζεται από διαφορετική μικροδομή. Η περιοχή αυτή αποτελεί επίσης την περιοχή έναρξης των μικρορωγμών. Επομένως, θεωρητικά μπορεί να αναμένεται ότι η διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη θα συμβάλλει στη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Ωστόσο, όπως απέδειξε ο **Larbi (1993, p.69)**, παρά το υψηλό πορώδες της ζώνης αυτής, η διαπερατότητα του σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από τον όγκο που καταλαμβάνει ο σκληρυμένος τσιμεντοπολτός, που αποτελεί και τη μοναδική συνεχή φάση στο σκυρόδεμα. Ενισχυτικά στην άποψη αυτή, λειτουργεί το γεγονός ότι η διαπερατότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού δεν είναι μικρότερη από αυτή του αντίστοιχου σκυροδέματος. Από την άλλη πλευρά, η κίνηση των ρευστών δυσχεραίνεται από την παρουσία των αδρανών, εφόσον υπάρχει μικρότερη ενεργή περιοχή για την πραγματοποίηση της ροής. Οι **Delagrave et al. (1997)** σε πειράματά τους απέδειξαν ότι τα αδρανή μεταβάλλουν τη μικροδομή και επομένως επηρεάζονται οι συντελεστές μεταφοράς μάζας των κονιαμάτων. Ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων λ.χ βρέθηκε ότι μειωνόταν με αύξηση του κλάσματος των αδρανών. Από την άλλη πλευρά, υπήρξε μια αύξηση των

συντελεστών μεταφοράς μάζας του κλάσματος της πάστας, αύξηση που μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία πολυάριθμων διεπιφανειακών μεταβατικών ζωνών. Η παρουσία των αδρανών φαίνεται ωστόσο να είναι πιο ουσιώδης από την επιρροή της διεπιφανειακής μεταβατικής ζώνης, η ύπαρξη διασυνδέσεων στην οποία δε βρέθηκε ότι οδηγεί σε σημαντική αύξηση του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων. Σε ανάλογα αποτελέσματα κατέληξαν και οι **Zheng και Zhou (2007)** οι οποίοι παρουσίασαν ένα τριφασικό σύνθετο μοντέλο για την πρόβλεψη του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων. Μετά από επιβεβαίωση του μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα, βρέθηκε ότι ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα μειώνεται όσο αυξάνεται το κλάσμα των αδρανών και η μέγιστη διάμετρος των αδρανών, αλλά αυξάνεται με την αύξηση του πάχους της διεπιφανειακής μεταβατικής ζώνης.

Τα αδρανή μπορεί επίσης να περιέχουν πόρους, ωστόσο αυτοί είναι συνήθως ασυνεχείς. Επιπροσθέτως, τα αδρανή καλύπτονται από την τσιμεντόπαστα, επομένως δεν αναμένεται το δικό τους σύστημα πόρων να συμβάλλει σημαντικά στη διαπερατότητα του σκυροδέματος.

1.2.3 Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον

Το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το σκυρόδεμα είναι ένας από τους προφανείς παράγοντες που επηρεάζει την ανθεκτικότητα του. Ένα βεβαρημένο με ρύπους περιβάλλον αναμένεται να μειώσει το χρόνο ζωής μιας κατασκευής επιταχύνοντας την φθορά της. Η αλληλεξάρτηση του με τους άλλους παράγοντες φθοράς έχει ήδη αναλυθεί (§1.2). Επιπροσθέτως, δε θα πρέπει να αγνοείται η επίδραση της θερμοκρασίας, καθώς η αύξησή της επιταχύνει τις χημικές αντιδράσεις. Σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C διπλασιάζει την ταχύτητα της αντιδράσεως.

Όλα αυτά λοιπόν πρέπει να συνεκτιμούνται, έτσι ώστε κατά τη μελέτη μιας κατασκευής, να λαμβάνεται μέριμνα με σκοπό την αποφυγή πρόωρης φθοράς, και να ικανοποιείται ο σχεδιασμένος χρόνος ζωής της κατασκευής.

1.3 Μηχανισμοί διείδυσης διαβρωτικών μέσων

Όπως αναφέρθηκε, η κίνηση των διαφόρων ρευστών μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί όχι μόνο διαμέσου ροής σε πορώδες μέσο, αλλά και μέσω διάχυσης και απορρόφησης. Συγκεκριμένα, η μεταφορά υγρών και αερίων μέσω πορωδών σωμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τριχοειδή αναρρόφηση (πχ Cl^- μέσα στο νερό), με διάχυση υγρών και ιόντων μέσα σε υγρά (Cl^- , SO_4^{2+}), με διάχυση αερίων (O_2 , CO_2) και ατμών (μετακίνηση υγρασίας), καθώς και με ροή υπό πίεση. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται οι κυριότεροι μηχανισμοί και τα φαινόμενα που συνδέονται με τη διείδυση των διαβρωτικών ουσιών μέσα στο σκυρόδεμα, οι σχέσεις από τις οποίες διέπονται καθώς και οι σημαντικότεροι παράγοντες που τους επηρεάζουν.

1.3.1 Τριχοειδής απορρόφηση (Sorptivity)

Οι τριχοειδείς πόροι (~100 nm) παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαπερατότητα του σκυροδέματος αφού ουσιαστικά είναι τα “κανάλια ροής” των ρευστών στο εσωτερικό του. Η μεταφορά νερού μέσω των τριχοειδών πόρων είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς νερού στο σκυρόδεμα και αποτελεί ένδειξη της διαπερατότητάς του, που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανθεκτικότητα.

Μέσω του πειράματος της τριχοειδούς απορρόφησης (sorptivity test) προσδιορίζεται ο ρυθμός απορρόφησης νερού, μέσω τριχοειδούς ανύψωσης, ενός πρισματικού δοκιμίου από σκυρόδεμα, το οποίο εδράζεται σε στηρίξεις με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο τα κατώτερα 2-5 mm του ύψους του δοκιμίου να έρχονται σε επαφή με το νερό. Η δοκιμή πραγματοποιείται με καταγραφή της αύξησης της μάζας του σκυροδέματος σε συνάρτηση με το χρόνο από την αρχική επαφή του δοκιμίου με το νερό (mass methods). Έχει αποδειχθεί ότι το φαινόμενο διέπεται από τους νόμους Laplace και ως προς την ταχύτητα απορρόφησης διέπεται από μία σχέση της μορφής:

$$i = S \cdot t^{0,5}$$

όπου

i = η αύξηση στη μάζα σε g/mm^2 από την έναρξη της δοκιμής για κάθε μονάδα εμβαδού που έρχεται σε επαφή με το νερό; εφόσον η αύξηση στη μάζα οφείλεται στη διείσδυση του νερού, $1g$ ισοδυναμεί με $1mm^3$, οπότε το i μπορεί να εκφραστεί σε mm.

t =ο χρόνος σε min στον οποίο καταγράφεται η αύξηση της μάζας, και

S =η τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity), σε $mm/min^{0,5}$

Σημειώνεται ότι η τιμή της τριχοειδούς απορρόφησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αρχική ποσότητα του περιεχόμενου νερού στο σκυρόδεμα. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας του σκυροδέματος, τόσο χαμηλότερη είναι η μετρούμενη τιμή της τριχοειδούς απορρόφησης. Επομένως, για να διασφαλιστεί ότι η τελική τιμή της τριχοειδούς απορρόφησης είναι ανεξάρτητη από την αρχική περιεχόμενη υγρασία του σκυροδέματος, τα δοκίμια ξηραίνονται μέχρι σταθερού βάρους (μεταβολή βάρους σε σχέση με την προηγούμενη ημέρα < 0,1%).

Πρακτικά, είναι πιο εύκολο να μετρηθεί απευθείας η τιμή του i από την ανύψωση της στάθμης του νερού στο σκυρόδεμα, η οποία υποδηλώνεται από το πιο σκούρο χρώμα που λαμβάνει το σκυρόδεμα (sample splitting method) (Kubissa και Jaskulski, 2013). Στην περίπτωση αυτή, το i μετράται απευθείας σε mm. Ωστόσο η μέθοδος αυτή, εκτός του ότι θεωρείται περισσότερο ανακριβής, απαιτεί και την καταστροφή των δοκιμίων.

Μία επιπρόσθετη κατηγορία μεθόδων προσδιορισμού της τριχοειδούς απορρόφησης αποτελούν οι ογκομετρικές μέθοδοι (volumetric methods) κατά τις οποίες μετράται ο όγκος του νερού που απορροφάται από το δοκίμιο με τη βοήθεια γυάλινων κυλίνδρων με βαθμονομημένα

σταγονόμετρα. Οι κύλινδροι μπορεί να είναι διαφορετικής διαμέτρου (συνήθως μεταξύ 30-120 mm), ενώ το σημείο επαφής του κυλίνδρου με το δοκίμιο σφραγίζεται με σιλικόνη (**Kubissa και Jaskulski, 2013**).

Ενδεικτικά, τυπικές τιμές για την τριχοειδή απορρόφηση είναι: $0,09 \text{ mm/min}^{0.5}$ για ένα σκυρόδεμα με λόγο νερού προς τσιμέντο 0,4 και $0,17 \text{ mm/min}^{0.5}$ για ένα σκυρόδεμα με λόγο νερού προς τσιμέντο 0,6.

Όσον αφορά στη μεταβολή της τιμής της υδατοαπορροφητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο, αναφέρεται σε ερευνητική εργασία των **Kubissa και Jaskulski (2013)** ότι η τιμή της υδατοαπορροφητικότητας που μετράται στις 28 ημέρες μπορεί να θεωρηθεί ως μία ικανοποιητική προσέγγιση για τις τιμές της υδατοαπορροφητικότητας που θα μετρηθούν σε μεταγενέστερες χρονικές στιγμές, καθώς οι τιμές που μετρήθηκαν στο χρονικό διάστημα που διήρκησε η έρευνα δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές ενώ παρουσίασαν γενικά μια πτωτική τάση στο πέρας του χρόνου. Στην εν λόγω εργασία παρασκευάστηκαν τέσσερα διαφορετικά μίγματα συμβατικού σκυροδέματος στα οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της υδατοαπορροφητικότητας στις 28 ημέρες και μετά από 2, 3, 6, 9, 12 και 24 μήνες. Καθ' όλη τη διάρκεια των 24 μηνών τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού.

Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τα συμπεράσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε από τον **Dias (2000)**, ο οποίος παρατήρησε ότι η τιμή της υδατοαπορροφητικότητας που μετρήθηκε σε δοκίμια σκυροδέματος μετά από 4 χρόνια ήταν μικρότερη από αυτή στις 28 ημέρες. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δοκίμια που συντηρήθηκαν τόσο σε νερό όσο και σε αέρα για 28 ημέρες και εν συνεχεία ξηράθηκαν σε περιβάλλον αέρα. Για τα δοκίμια που συντηρήθηκαν σε περιβάλλον αέρα, και τα οποία είχαν αυξημένες αρχικές τιμές υδατοαπορροφητικότητας, σημειώθηκαν σημαντικές μειώσεις της υδατοαπορροφητικότητας σε σχέση με τα δοκίμια που είχαν συντηρηθεί στο νερό. Σε ένα τέτοιο σκυρόδεμα με υψηλή αρχική υδατοαπορροφητικότητα, η ενανθράκωση του επιφανειακού σκυροδέματος συμβαίνει με ταχύτερο ρυθμό, αιτία στην οποία μπορεί να αποδοθεί η σημαντική μείωση των τιμών της υδατοαπορροφητικότητας.

Επομένως, και από τις δύο εργασίες προκύπτει σαν συμπέρασμα ότι η τιμή της υδατοαπορροφητικότητας που μετράται σε σκυρόδεμα μικρής ηλικίας αποτελεί γενικά και την υψηλότερη τιμή για το συγκεκριμένο σκυρόδεμα.

1.3.2 Υδατοπερατότητα (Water permeability)

Η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος χρησιμοποιείται ως ένδειξη της διαπερατότητας του, έννοια άμεσα συνδεδεμένη με την ανθεκτικότητα. Ένα καλής ποιότητας σκυρόδεμα, με τσιμεντόπαστα πολύ χαμηλής διαπερατότητας, ενδέχεται να είναι πολύ διαπερατό εάν υπάρχουν

ρωγμές. Εάν δεν υπάρχουν ρωγμές ή άλλες δίοδοι του νερού, τότε το πορώδες του τσιμεντοπολωτού αποτελεί τον καθοριστικότερο παράγοντα για τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Σημειώνεται βέβαια ότι, γενικά η διαπερατότητα του σκυροδέματος δεν είναι μια απλή συνάρτηση του πορώδους, αλλά εξαρτάται επίσης και από το μέγεθος, την κατανομή, το σχήμα και τη συνέχεια των πόρων.

Επομένως, η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του λόγου νερό/τσιμέντο και συγκεκριμένα αναμένεται να μειώνεται σημαντικά, όσο ο λόγος αυτός μικραίνει. Για παράδειγμα, για μείωση του λόγου νερό/τσιμέντο από 0,75 σε 0,26, ο συντελεστής μειώνεται μέχρι και 4 τάξεις μεγέθους. Για λόγο $w/c=0,75$ ο συντελεστής διαπερατότητας ισούται ενδεικτικά με 10^{-10} m/s, τιμή που αντιστοιχεί σε σκυροδέμα υψηλής διαπερατότητας, ενώ $w/c=0,45$ ο συντελεστής κυμαίνεται περίπου σε 10^{-11} m/s ή 10^{-12} m/s, τιμές που θεωρείται ότι αντιστοιχούν σε σκυροδέματα πολύ χαμηλής διαπερατότητας.

Όσον αφορά στη σημασία της συντήρησης του σκυροδέματος, αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Whiting, 1988, pp.195-221) ότι η αύξηση της διάρκειας συντήρησης στο νερό σκυροδέματος με αρκετά υψηλό λόγο νερού/τσιμέντο από 1 σε 7 ημέρες μπορεί να μειώσει την υδατοπερατότητά του κατά συντελεστή ίσο με 5.

Σημαντικός παράγοντας για τη μέτρηση του συντελεστή υδατοπερατότητας αποτελεί και το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας στο τμήμα της κατασκευής ή στο δοκίμιο το οποίο εξετάζεται. Ο περιορισμός αυτός δυσχεραίνει σημαντικά την επί τόπου (in-situ) μέτρηση της υδατοπερατότητας, και για πιο ακριβή αποτελέσματα απαιτείται ο έλεγχος δειγμάτων στο εργαστήριο, όπου μπορεί να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο επιθυμητό επίπεδο υγρασίας.

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή διαπερατότητας K , συνήθως μετράται η σταθερή ροή του νερού (steady-state flow) διαμέσου του σκυροδέματος που οφείλεται σε κάποια διαφορά πίεσης. Για τον προσδιορισμό χρησιμοποιείται ο νόμος του Darcy για στρωτή ροή διαμέσου ενός πορώδους μέσου:

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = \frac{K' \rho g \Delta h}{\eta L}$$

όπου

dq/dt = ο ρυθμός ροής του νερού σε m^3/s ,

A = το εμβαδό της διατομής του δοκιμίου σε m^2 ,

Δh = το ύψος στήλης νερού σε m,

L = το πάχος του δοκιμίου μέσω του οποίου γίνεται η ροή σε m,

η = το δυναμικό ιξώδες του ρευστού σε Ns/m^2 ,

ρ = η πυκνότητα του ρευστού σε kg/m^3 ,

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο συντελεστής K' μετράται σε m^2 και εκφράζει την “εγγενή” (intrinsic) διαπερατότητα του υλικού, ανεξάρτητα από το είδος του ρευστού. Αν θεωρήσουμε ως ρευστό το νερό σε θερμοκρασία δωματίου (διότι το δυναμικό ιξώδες, η , μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία), μπορούμε να θέσουμε:

$$K = \frac{K' \rho g}{\eta}$$

όπου: ρ = η πυκνότητα του νερού (1000 kg/m^3)
 g = η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ m/s}^2$)
 η = το δυναμικό ιξώδες του νερού ($0,001 \text{ Ns/m}^2$ στους 20°C)

Ο συντελεστής K εκφράζεται σε m/s και αναφέρεται ως συντελεστής διαπερατότητας του σκυροδέματος. Επομένως, για σταθερή ροή dq/dt , μπορεί να υπολογιστεί απευθείας το K . Εφόσον ο συντελεστής διαπερατότητας K έχει μονάδες ταχύτητας, μπορεί να ορισθεί σαν μια μέση ταχύτητα ροής του νερού διαμέσου του δοκιμίου διατομής A . Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ροή σε ένα πορώδες υλικό μπορεί να συμβεί μόνο διαμέσου των συνδεδεμένων πόρων, μπορούμε να θεωρήσουμε:

$$K_{eff} = \frac{K}{\varepsilon_{eff}}$$

όπου το ε_{eff} αντιπροσωπεύει το ενεργό πορώδες (effective porosity) και το K_{eff} είναι η μέση ταχύτητα ροής του νερού στους πόρους του υλικού.

Σημειώνεται ότι για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη τυποποιημένη μέθοδος, ενώ και η ευαισθησία των επιμέρους μεθόδων δεν επιτρέπει την εξαγωγή συγκεκριμένων τιμών για τη διαπερατότητα των επιμέρους σκυροδεμάτων. Οι τιμές του συντελεστή διαπερατότητας που αναφέρονται σε διάφορες δημοσιεύσεις στη βιβλιογραφία, για σκυροδέματα παρόμοιας σύνθεσης και ηλικίας, παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά και ενδέχεται να μην είναι συγκρίσιμες. Τιμές όπως για παράδειγμα $2 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ και $6 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ δε θεωρείται ότι διαφέρουν σημαντικά, και επομένως η καταγραφή τους με ακρίβεια της τάξης των $0,5 \times 10^{-1} \text{ m/s}$, θεωρείται επαρκής. Μικρότερες διαφορές μπορούν να θεωρηθούν ασήμαντες.

1.3.3 Διαπερατότητα σε αέρα (Air permeability)

Η ευκολία με την οποία ο αέρας, διάφορα αέρια και οι υδρατμοί μπορούν να διεισδύσουν στο σκυρόδεμα σχετίζεται άμεσα με την έννοια της ανθεκτικότητας. Διάκριση πρέπει να γίνει ανάμεσα στην περίπτωση όπου η αιτία της διαπερατότητας σε αέρα είναι η διαφορά πίεσης και στην περίπτωση όπου η πίεση και η θερμοκρασία είναι ίδιες στις δύο πλευρές του δοκιμίου, όμως δύο διαφορετικά αέρια έρχονται σε επαφή με τις πλευρές αυτές. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε κίνηση των αερίων μέσω του μηχανισμού της διαπερατότητας (permeability), ενώ στη δεύτερη περίπτωση μέσω διάχυσης (diffusion).

Επειδή τα αέρια είναι συμπιεστά, πρέπει να ληφθεί υπόψη η πίεση p_0 στην οποία υπολογίζεται ο ρυθμός ροής του όγκου του αερίου q (m^3/s), καθώς και η πίεση εισόδου p και η πίεση εξόδου p_a (N/m^2).

Ο εγγενής συντελεστής διαπερατότητας K , σε m^2 , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = \frac{2qp_0L\eta}{A(p^2 - p_a^2)}$$

όπου,

A =εμβαδόν κάθετης στη ροή διατομής του δοκιμίου (m^2)

L =πάχος του δοκιμίου (m)

η =δυναμικό ιξώδες του αερίου (Ns/m^2)

Αν το αέριο είναι το οξυγόνο και για θερμοκρασία $20^\circ C$, τότε $\eta = 20,2 \times 10^{-6} Ns/m^2$.

Θεωρητικά, ο συντελεστής διαπερατότητας για ένα δεδομένο σκυρόδεμα θα έπρεπε να είναι ο ίδιος, ανεξάρτητα από το αν στις δοκιμές χρησιμοποιείται υγρό ή αέριο. Ωστόσο, η χρήση αερίου οδηγεί σε υψηλότερες τιμές του συντελεστή K εξαιτίας του φαινομένου ολίσθησης του αερίου (gas slippage). Η διαφορά μεταξύ της διαπερατότητας σε αέρα και σε υγρό είναι μεγαλύτερη για χαμηλότερες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, με την αναλογία της πρώτης ως προς τη δεύτερη να κυμαίνεται από 6 έως 100.

Ο συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη συντήρηση του σκυροδέματος, ειδικά για σκυροδέματα μικρής και μεσαίας αντοχής. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας, εφόσον μεταβολή της υγρασίας από κατάσταση κορεσμού σε κατάσταση ξήρανσης αναφέρεται ότι αυξάνει το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα σχεδόν κατά 2 τάξεις μεγέθους. Για λόγους ευκολίας των δοκιμών, προτιμάται η ξήρανση των δοκιμίων σε φούρνο μέχρι σταθερού βάρους. Η κατάσταση αυτή δεν θεωρείται αντιπροσωπευτική των συνθηκών στις οποίες βρίσκεται το σκυρόδεμα στην πράξη. Ακόμα όμως και αν διατηρήσουμε το σκυρόδεμα σε περιβάλλον αέρα σε σταθερή σχετική υγρασία για ένα διάστημα που θεωρείται επαρκές (28 ημέρες), η επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής της υγρασίας στο εσωτερικό του σκυροδέματος είναι αβέβαιη.

Η σημασία του τρόπου συντήρησης επιβεβαιώθηκε και από τους **Sanjuan και Munoz-Martialay (1995)**, οι οποίοι διερεύνησαν την επιρροή της θερμοκρασίας συντήρησης των δοκιμίων στο συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα. Συνολικά εξετάστηκαν 4 διαφορετικές θερμοκρασίες συντήρησης ($20^\circ C$, $40^\circ C$, $60^\circ C$ και $80^\circ C$) σε δοκίμια με 4 διαφορετικούς λόγους νερού/τσιμέντο (0.37, 0.42, 0.47, και 0.52). Από τα πειράματα προέκυψε ότι, με αύξηση της θερμοκρασίας συντήρησης αυξάνεται και ο συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα, αύξηση που ήταν πιο έντονη στα δοκίμια με υψηλότερους λόγους νερού/τσιμέντο. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην επίδραση της μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας των δοκιμίων, καθώς και στη μεταβολή της μικροδομής αυτών.

Παράλληλα, σημειώθηκε ότι αναμένονται μεγάλες διαφορές στην τιμή του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα, ακόμη και για δοκίμια που προέρχονται από την ίδια παρτίδα. Έτσι, για τα δοκίμια της μελέτης, που παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακές συνθήκες, παρατηρήθηκαν μεταβολές του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα μέχρι και 40%, και επομένως σε πραγματικές κατασκευές αναμένονται ακόμα μεγαλύτερες αποκλίσεις.

1.3.4 Ενανθράκωση (Carbonation)

Ο αέρας περιέχει CO_2 , το οποίο με την παρουσία υγρασίας αντιδρά με την ενυδατωμένη φάση του τσιμέντου. Στην πραγματικότητα αυτό που αντιδρά είναι το ανθρακικό οξύ, καθώς το αέριο CO_2 δεν είναι δραστικό. Για τη δράση του CO_2 επαρκούν ακόμη και μικρές συγκεντρώσεις, όπως αυτές που συναντώνται σε αγροτικές περιοχές, όπου κυμαίνονται στο 0,03% κ.ο. Σε ένα όχι επαρκώς αεριζόμενο εργαστήριο, το αντίστοιχο ποσοστό κυμαίνεται στο 0,1%, ενώ σε μεγάλα αστικά κέντρα στο 0,3%. Ο ρυθμός της ενανθράκωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση σε CO_2 , και η επίδραση της συγκέντρωσης του CO_2 είναι εντονότερη σε σκυροδέματα παρασκευασμένα με υψηλό λόγο νερού/τσιμέντο.

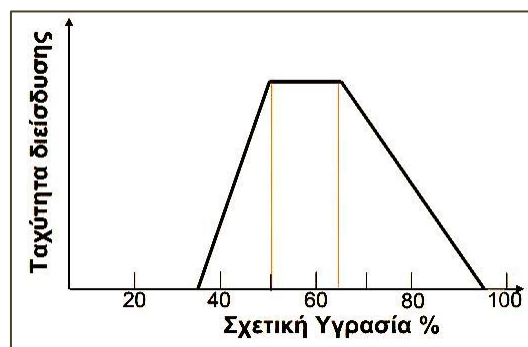
Από τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου, το $Ca(OH)_2$ είναι αυτό που αντιδρά κυρίως με το CO_2 , με το $CaCO_3$ να αποτελεί το προϊόν της αντίδρασης. Εκτός αυτού, και άλλα προϊόντα ενυδάτωσης αντιδρούν, οπότε παράγονται ενυδατωμένο πυρίτιο, αλούμινα και οξείδιο του σιδήρου. Σε σκυρόδεμα που περιέχει τσιμέντο Portland, η ενανθράκωση του $Ca(OH)_2$ είναι αυτή που ενδιαφέρει, σχεδόν αποκλειστικά. Όταν ωστόσο το $Ca(OH)_2$ καταναλώνεται, για παράδειγμα λόγω δευτερεύουσας αντίδρασης με το άμορφο οξείδιο του πυριτίου που περιέχουν τα ποζολανικά πρόσθετα, τότε είναι δυνατή και η ενανθράκωση της ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης C-S-H. Όταν συμβεί αυτό, όχι μόνο παράγεται επιπλέον ποσότητα $CaCO_3$, αλλά σχηματίζεται ταυτόχρονα και πυριτική γέλη (silica gel) αυξημένου πορώδους, η οποία περιέχει μεγάλους πόρους (>100 nm) και έτσι ευνοείται περαιτέρω η ενανθράκωση.

Όσον αφορά στην επίδρασή της στην ανθεκτικότητα, η ενανθράκωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του pH του υδατικού διαλύματος των πόρων της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας από 12.6 - 13.5 σε περίπου 9. Όταν όλο το $Ca(OH)_2$ έχει καταναλωθεί λόγω ενανθράκωσης, η τιμή του pH μειώνεται σε 8.3. Η σημασία της μείωσης αυτής στο pH εξηγείται εν συνεχεία. Ο χάλυβας του σκυροδέματος προστατεύεται από οξειδωση χάρις στο λεπτό στρώμα οξειδίων που σχηματίζονται στην επιφάνεια του χάλυβα. Το στρώμα αυτό παραμένει θερμοδυναμικά σταθερό και δεν διασπάται λόγω περαιτέρω οξειδωσης, όταν το περιβάλλον (υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος) είναι αλκαλικό, χάρις στην παρουσία $Ca(OH)_2$, που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου. Η προστασία αυτή ονομάζεται «παθητική» και παρεμποδίζει αποτελεσματικά τη διάβρωση, έστω και αν υπάρχουν ευνοϊκοί παράγοντες για διάβρωση. Λόγω της ενανθράκωσης, καταστρέφεται το παθητικό στρώμα οξειδίων, που δημιουργήθηκε χάρις στο αλκαλικό περιβάλλον. Εφόσον καταστράφηκε η

προστατευτική στρώση, τότε με την ταυτόχρονη παρουσία νερού (υγρασίας) και οξυγόνου δημιουργούνται οι κατάλληλες προϋποθέσεις για τη διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό, είναι ουσιώδους σημασίας να είναι γνωστό το βάθος της ενανθράκωσης και ειδικότερα το αν η ενανθρακωμένη ζώνη έχει φτάσει στο επίπεδο του οπλισμού. Στην πραγματικότητα, λόγω της παρουσίας των αδρανών, το «μέτωπο» της ενανθρακωμένης ζώνης δεν εμφανίζεται σαν μια απολύτως ευθεία γραμμή. Παράλληλα, η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα μπορεί να διευκολύνει την είσοδο του CO_2 , έτσι ώστε το βάθος της ενανθρακωμένης ζώνης να αυξάνεται τοπικά στις περιοχές των ρωγμών. Σημειώνεται επίσης ότι η ενανθράκωση μπορεί να επιταχύνει τη βελονοειδή διάβρωση του οπλισμού που προκαλείται από την εισροή των χλωριόντων.

Στο σημείο αυτό οφείλει να αναφερθεί ότι η ενανθράκωση μπορεί να έχει και θετικές συνέπειες. Καθώς το $CaCO_3$ καταλαμβάνει μικρότερο όγκο από το $Ca(OH)_2$ που αντικαθιστά, το πορώδες του ενανθρακωμένου σκυροδέματος μειώνεται, λόγω πλήρωσης (micro-filling effect). Επιπροσθέτως, το νερό που ελευθερώνεται από το $Ca(OH)_2$ κατά την ενανθράκωση μπορεί να συμμετάσχει στην ενυδάτωση του μη ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού. Επομένως, η ενανθράκωση δύναται να οδηγήσει σε αυξημένη αντοχή της επιφανειακής ζώνης, μειωμένη υδατοπερατότητα, επιβράδυνση της διάχυσης της υγρασίας και αυξημένη αντίσταση σε εκείνους τους επιβλαβείς παράγοντες που σχετίζονται με τη διαπερατότητα του σκυροδέματος.

Η διάχυση του CO_2 από την εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος προς το εσωτερικό αυτού πραγματοποιείται με σταδιακά επιβραδυνόμενο ρυθμό και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή των πόρων του σκυροδέματος και από το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας-ποσοστό που μεταβάλλεται συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Αν οι πόροι του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού είναι γεμάτοι με νερό, η διάχυση του CO_2 πραγματοποιείται με αργό ρυθμό διότι η διάχυση του CO_2 στο νερό είναι κατά 10^4 φορές μικρότερη, από ότι στον αέρα (Younsi et al., 2011). Από την άλλη πλευρά, αν δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα νερού στους πόρους το CO_2 παραμένει σε αέρια μορφή και δεν αντιδρά με το ενυδατωμένο τσιμέντο. Ο υψηλότερος ρυθμός ενανθράκωσης πραγματοποιείται σε ποσοστά σχετικής υγρασίας μεταξύ 50% και 70%, όπως φαίνεται και από το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5: Ταχύτητα διάχυσης του CO_2 στους πόρους του σκυροδέματος συναρτήσει της σχετικής υγρασίας (Κόλιας, 2010-2011).

Υπό σταθερές υγρομετρικές συνθήκες, το βάθος της ενανθράκωσης D (mm) αυξάνει αναλογικά με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου σύμφωνα με τη σχέση:

$$D = K \cdot t^{0,5}$$

όπου

K = ο συντελεστής ενανθράκωσης σε $\text{mm/year}^{0,5}$

t = ο χρόνος έκθεσης σε χρόνια

Οι τιμές του K είναι συχνά μεγαλύτερες από 3 ή 4 $\text{mm/year}^{0,5}$ για σκυροδέματα χαμηλής αντοχής (Currie, 1986). Για λόγο νερού/τσιμέντο 0,60 ένα βάθος ενανθράκωσης ίσο με 15 mm θεωρείται ενδεικτικό για περίοδο 15 χρόνων, ενώ για λόγο νερού/τσιμέντο 0,45 το αντίστοιχο διάστημα είναι 100 χρόνια.

Αν η επιφάνεια του σκυροδέματος εκτίθεται σε συνθήκες μεταβαλλόμενης αλλά υψηλής υγρασίας, με περιοδική διαβροχή της επιφάνειας του σκυροδέματος, τότε ο ρυθμός ενανθράκωσης μειώνεται λόγω επιβράδυνσης του ρυθμού διάχυσης του CO_2 μέσω των κορεσμένων πόρων του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Αντίθετα, τα προστατευμένα μέρη της κατασκευής υφίστανται ενανθράκωση με ταχύτερο ρυθμό σε σχέση με εκείνα που εκτίθενται στο νερό της βροχής. Όσον αφορά στο εσωτερικό των κτιρίων, μπορούν να παρατηρηθούν υψηλοί ρυθμοί ενανθράκωσης που όμως δεν οδηγούν σε διάβρωση του οπλισμού, εκτός κι αν το ενανθρακωμένο σκυρόδεμα είναι επαρκώς βρεγμένο. Μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας δεν επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό ενανθράκωσης, ωστόσο μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει την ενανθράκωση εκτός κι αν οδηγεί σε ξήρανση του σκυροδέματος.

Ένας επιπλέον παράγοντας με ουσιώδη επιρροή είναι η συντήρηση του σκυροδέματος που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη δομή της επιφανειακής ζώνης του σκυροδέματος, καθώς απουσία καλής συντήρησης οδηγεί σε υψηλό πορώδες, γεγονός που διευκολύνει τη διάχυση του CO_2 . Στη βιβλιογραφία (Matthews, 1984) αναφέρεται ότι αύξηση της διάρκειας συντήρησης του σκυροδέματος σε νερό από 1 σε 3 ημέρες, μπορεί να μειώσει το βάθος της ενανθράκωσης κατά περίπου 40%.

Ο Πίνακας 1 δείχνει ότι διάφοροι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικές μεθόδους συντήρησης στα πειράματά τους. Ωστόσο, η συγκέντρωση του CO_2 φαίνεται να είναι η πιο καθοριστική παράμετρος. Πολύ λίγοι ερευνητές χρησιμοποίησαν ατμοσφαιρικές συνθήκες έκθεσης και συνήθεις συγκεντρώσεις CO_2 (0,03%), ενώ η πλειοψηφία των ερευνητών χρησιμοποίησαν έντονες συνθήκες με υψηλές έως και πολύ υψηλές συγκεντρώσεις CO_2 .

Πίνακας 1: Συνθήκες συντήρησης δοκιμίων σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα για τη διεξαγωγή του πειράματος της ενανθράκωσης.

Αναφορά	Αρχικές συνθήκες συντήρησης	Θάλαμος ενανθράκωσης		
		Θερμοκρασία (°C)	Σχετική υγρασία RH (%)	Συγκέντρωση CO ₂ (%)
(Papadakis, 2000)	1 μήνας σε εργαστηριακές συνθήκες	25	61	3
(Buyle-Bodin and Hadjieva-Zaharieva, 2002)		20	65	0,03
(Otsuki, Miyazato and Yodsudjai, 2003)		40	70	10
(Atis, 2003)		20	65	5
(Katz, 2003)		30	60	5
(Bai, Wild and Sabir, 2002)		20	65	4
(Chang and Chen, 2006)	28 μέρες σε νερό	23	70	20
(Khunthongkeaw et al. 2006)	28 μέρες σε νερό	40	55	4
(Villain, Thiery and Platret, 2007)	3 μήνες σε νερό	20	53	45
(Dinakar, Babu and Santhanam, 2007)	28 μέρες σε νερό	Σε συνθήκες περιβάλλοντος για διάρκεια 12 μηνών		
(Gonen and Yazicioglu, 2007)	28 μέρες σε θάλαμο συντήρησης		55	40
(Dhir et al., 2007)		20	65	0,035
		20	65	4
(Kulakowski, Pereira and Dal Molin, 2009)	28 μέρες σε θάλαμο συντήρησης			≥50
(Wassermann, Katz and Bentur, 2009)		30	50	5
(Abbas et al., 2009)	28 μέρες συντήρησης	23	60	3
(Roziere, Loukili and Cussigh, 2009)	28 μέρες σε νερό	20	65	50
(Hui-Sheng, Bi-Wan and Xiao-Chen, 2009)	90 μέρες συντήρησης	20	70	20
(Chatveera and Lertwattanakul, 2011)	28 μέρες συντήρησης	23	70	0,03
(Sim and Park, 2011)	7 μέρες σε υγρασία 100% + 14 μέρες σε εργαστηριακές συνθήκες	30	60	10
(Zega and Di Maio, 2011)		Σε συνθήκες αστικού βιομηχανικού περιβάλλοντος		
(Werle, Kazmierczak and Kulakowski, 2011)	63 μέρες σε νερό		70	1
(Limbachiya, Meddah and Ouchagour, 2012)	28 μέρες σε νερό + 14 μέρες σε ξηρό αέρα	20	65	3
(Lovato et al., 2012)	63 μέρες σε νερό + 16 μέρες στους 25°C και 65% RH	21	65	6
(Zhao et al., 2012)	26 μέρες συντήρησης	20	70	20

Pacheco Torgal F. et al., 2012, p.3.

Οι **Dhir et al. (2007)** ανέφεραν ότι η σύγκριση των αποτελεσμάτων βάθους ενανθράκωσης μεταξύ πειραμάτων με συγκέντρωση CO₂ ίσης με 0,035% και μιας επιταχυνόμενης δοκιμής με συγκέντρωση 4%, έδωσε καλή συσχέτιση, υποδηλώνοντας έτσι ότι η επιταχυνόμενη δοκιμή μπορεί να δώσει μια καλή ένδειξη της μακροπρόθεσμης αντίστασης σε ενανθράκωση του σκυροδέματος. Οι **Limbachiya, Meddah και Ouchagour (2012)** χρησιμοποίησαν επιταχυνόμενες δοκιμές (3,5% CO₂),

αναφέροντας ότι μια εβδομάδα έκθεσης δοκιμίων σκυροδέματος σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης ισοδυναμεί με περίπου 12 μήνες έκθεσης σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος. Ωστόσο, σημειώνεται ότι η συγκέντρωση CO_2 δεν είναι ούτε ομοιόμορφη, αλλά ούτε και σταθερή στο χρόνο.

Για τον προσδιορισμό του βάθους της ενανθράκωσης μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές όπως χημική ανάλυση, περίθλαση ακτίνων X (X-ray diffraction), φασματοσκοπία υπερύθρου (infra-red spectroscopy), βαρομετρική ανάλυση (TG). Μια διαδεδομένη και απλή μέθοδο αποτελεί ο ψεκασμός με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης, το οποίο παρασκευάζεται από 1% φαινολοφθαλεΐνη σε 70% αιθυλική αλκοόλη. Το ενανθρακωμένο σκυρόδεμα που ψεκάζεται αποχρωματίζεται, ενώ το υγιές παραμένει χρωματισμένο. Η διαδικασία περιγράφεται από τη **RILEM (Torrent and Fernandez Lucó eds., 2007)**. Σημειώνεται ότι ο ροζ χρωματισμός υποδηλώνει την παρουσία $Ca(OH)_2$, αλλά όχι την πλήρη απουσία ενανθράκωσης. Στην πραγματικότητα η μέθοδος της φαινολοφθαλεΐνης δίνει μία μέτρηση του pH (με το ροζ χρώμα να υποδηλώνει $pH > 9,5$), αλλά δεν επιτρέπει το διαχωρισμό μεταξύ χαμηλού pH προερχόμενου από ενανθράκωση ή από άλλα όξινα αέρια (acidic gases).

Έτσι, διάφορες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό τον προσδιορισμό του βάθους ενανθράκωσης, έχουν δείξει ότι ο ψεκασμός με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης δεν αποτελεί καλή εκτίμηση του πραγματικού βάθους ενανθράκωσης, το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που προσδιορίζεται με χρήση διαλύματος φαινολοφθαλεΐνης (**Parrott, 1987**). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και νεότερες έρευνες σχετικά με την αξιολόγηση των νέων μεθόδων για τον προσδιορισμό του βάθους ενανθράκωσης. Ενδεικτικά αναφέρονται οι **Lo και Lee (2002)**, οι οποίοι εξέτασαν ενανθρακωμένα δοκίμια ηλικίας 30, 60 και 90 ημερών και παρατήρησαν ότι η διασπορά στην μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης με τη μέθοδο της φαινολοφθαλεΐνης είναι μεγαλύτερη συγκρινόμενη με τη μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης, μέσω Φασματοσκοπίας Υπερύθρου (FTIR), η οποία πιστεύεται ότι μπορεί να επισημάνει επακριβώς ένα μερικώς ενανθρακωμένο μέτωπο. Συγκεκριμένα, τα βάθη ενανθράκωσης που προσδιορίστηκαν μέσω FTIR ήταν κατά 1,5 mm μεγαλύτερα από εκείνα που προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της φαινολοφθαλεΐνης. Παράλληλα, ο ρυθμός ενανθράκωσης που προσδιορίστηκε μέσω FTIR ήταν κατά 23,9% υψηλότερος συγκρινόμενος με αυτόν που προέκυψε από τη μέθοδο της φαινολοφθαλεΐνης. Επιπρόσθετα, οι **Chang και Chen (2006)** σύγκριναν τα βάθη ενανθράκωσης που προσδιορίστηκαν μέσω Βαρομετρικής Ανάλυσης (TG), Περιθλασομετρίας Ακτίνων X (XRD) και Φασματοσκοπίας Υπερύθρου (FTIR) με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέθοδο της φαινολοφθαλεΐνης σε δοκίμια σκυροδέματος που υποβλήθηκαν σε επιταχυνόμενη ενανθράκωση σε θερμοκρασία $23^{\circ}C$, σχετική υγρασία 70% και συγκέντρωση CO_2 ίση με 20%. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι, η πρώτη ομάδα μεθόδων έδειξε κατά μέσο όρο διπλάσια βάθη ενανθράκωσης από αυτά που προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της φαινολοφθαλεΐνης. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η ακρίβεια στον προσδιορισμό της πιθανότητας διάβρωσης του οπλισμού των κατασκευών λόγω ενανθράκωσης, πρέπει να επανεκτιμηθεί. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους **Yoon, Copuroglu και Park (2007)**, σε κατασκευές στις οποίες το μη ενανθρακωμένο

σκυρόδεμα είχε βάθος μεγαλύτερο από το κατώφλι ασφαλείας των 10 mm, όπως έχει προταθεί από την Japan Society of Civil Engineers, μπορεί να έχει ήδη ξεκινήσει η διάβρωση του οπλισμού.

2 ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ

2.1 Ο Μετακαολίνης και η χρήση του στο σκυρόδεμα

Ο μετακαολίνης (ΜΚ), αποτελεί το πιο πρόσφατο ορυκτό πρόσμικτο, που αξιοποιείται εμπορικά στη βιομηχανία παρασκευής σκυροδέματος. Αποτελεί υλικό με αξιόλογη ποζολανική δραστηριότητα και είναι το προϊόν της θερμικής αποσύνθεσης του καολινίτη (σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 700°C έως 900°C), της κύριας ορυκτολογικής φάσης του καολίνης.



Εικόνα 1: Μετακαολίνης.

Ιστορικά αναφέρεται ότι, το όνομα καολίνης (kaolin) προέρχεται από τον κινέζικο όρο «Kaoling», που σημαίνει το «ψηλή ράχη», όνομα ενός λόφου κοντά στο Jaucha Fa (Κίνα), όπου γινόταν εξόρυξη του υλικού για την παρασκευή κεραμικών. Ο καολινίτης έχει θεωρητική χημική σύσταση 46.54% SiO_2 , 39.5% Al_2O_3 και 13.96% H_2O κ.β.. Οι κρύσταλλοι του καολινίτη είναι μικρά, λεπτά ρομβικά ή ψευδοεξαγωνικά πλακίδια ορατά με το μικροσκόπιο. Το μέγεθος των σωματιδίων του μετακαολίνης είναι σε ποσοστό 99,9% μικρότερο από 16 μm με μέσο μέγεθος σωματιδίων περίπου 3 μm , μέγεθος σημαντικά μικρότερο από το μέγεθος των σωματιδίων του τσιμέντου, ωστόσο όχι τόσο λεπτό όσο το μέγεθος των σωματιδίων της πυριτικής παιπάλης.

Ο καολίνης είναι ένα αργιλικό πέτρωμα λευκού χρώματος με ειδικό βάρος 2.2-2.6 g/cm^3 . Σε ένα πέτρωμα καολίνης, μαζί με τον καολινίτη συνυπάρχουν συνήθως και προσμίξεις άλλων ορυκτών όπως χαλαζίας ή χριστοβαλίτης, ανάτασης ή ρουτίλιο, αλουνίτης, σιδηροπυρίτης, λειμωνίτης, μοντμοριλλονίτης, άστριοι, μαρμαρυγίες, μοσχοβίτης ή βιοτίτης, λεπιδόλιθος και οξείδια του σιδήρου. Το πυρίτιο και το αργίλιο με τη μορφή υδροξειδίου μπορεί να απαντηθούν και ως επιφανειακά στον καολινίτη.

Ως ποζολανικά χαρακτηρίζονται πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά, τα οποία, ενώ δεν είναι υδραυλικά, σε μεγάλη λεπτότητα και παρουσία νερού αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου, $Ca(OH)_2$ και σχηματίζουν ενώσεις αντίστοιχες με αυτές που σχηματίζονται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου. Το $Ca(OH)_2$ είναι το κύριο προϊόν της αντίδρασης του τσιμέντου, το οποίο είναι

επιθυμητό να καταναλώνεται μέσω της ποζολανικής αντίδρασης, καθώς βελτιώνονται οι ιδιότητες του σκυροδέματος.

Ο μετακαολίνη, όντας ένα υλικό με πολύ μεγάλη λεπτότητα (κατόπιν της άλεσής του) και ισχυρά ποζολανικό, μπορεί να θεωρηθεί τσιμεντοειδές υλικό, αφού η συμπεριφορά του και τα χαρακτηριστικά του προσομοιάζουν το τσιμέντο. Η χρήση του μετακαολίνη στο σκυρόδεμα έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος, επηρεάζοντας σημαντικά τη μηχανική αντοχή, αλλά κυρίως την ανθεκτικότητα. Ουσιαστικά η θετική επίδραση του μετακαολίνη οδηγεί σε μείωση της διαπερατότητας και στην αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος. Είναι αξιόλογο να ερμηνευτεί ο τρόπος με τον οποίο ο μετακαολίνης επιδρά στην διαπερατότητα του σκυροδέματος. Η ερμηνεία εστιάζεται στην επίδραση του μετακαολίνης στην δομή του σκυροδέματος και, ειδικότερα, στη δράση του στις διεπιφάνειες μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των συστατικών του, καθώς αυτές αποτελούν τα αδύναμα σημεία του σκυροδέματος. Στις διεπιφάνειες αυτές (δηλαδή ανάμεσα στο τσιμέντο και στα αδρανή) υπάρχει χώρος για μεγάλη συσσώρευση προσανατολισμένων κρυστάλλων CH και νερού που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών και μικρορωγμών.

Η προσθήκη του μετακαολίνης οδηγεί σε πιο συμπαγές και συνεκτικό σκυρόδεμα. Η βασική αιτία που συμβαίνει αυτό είναι η ποζολανική αντίδρασή του με το CH , που έχει ως συνέπεια τη μείωση της συγκέντρωσής του στις διεπιφάνειες αφενός, αλλά και την παραγωγή σημαντικής ποσότητας ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CSH) αφετέρου, η σημασία του οποίου για τη δημιουργία συμπαγούς δομής και μικρού πορώδους σκυροδέματος είναι γνωστή. Στην επίτευξη συμπαγούς δομής χαμηλού πορώδους συντελεί σημαντικά η παρουσία και των υπόλοιπων κρυσταλλικών ενώσεων που παράγονται κατά τη ποζολανική αντίδραση, οι οποίες έχουν το κύριο χαρακτηριστικό του πολύ μικρού όγκου. Λόγω του όγκου τους, οι κρυσταλλικές αυτές ενώσεις μπορούν να εισχωρήσουν αποτελεσματικά στους πόρους και στα κενά της δομής του σκυροδέματος τόσο στη διεπιφάνεια αδρανών-ενυδατωμένου τσιμέντου όσο και στο ίδιο το ενυδατωμένο τσιμέντο. Επίσης οι κρυσταλλικές αυτές ενώσεις μειώνουν το ποσοστό των μεγάλων τριχοειδών πόρων αμβλύνοντας το εύρος τους (<20 nm), συντελώντας έτσι στη μείωση της διαπερατότητας.

Η μείωση της διαπερατότητας, μαζί με την κατανάλωση του CH , συντελούν στην αύξηση της ανθεκτικότητας σε περιβάλλον θεικών, αλλά κυρίως στη μείωση του συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων (Cl^-) στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Αντίστοιχα, η υδατοαπορροφητικότητα (water absorption) του σκυροδέματος, όπως και ο ρυθμός απορρόφησης νερού μειώνονται σημαντικά. Επίσης η μείωση της αλκαλικότητας της πάστας λόγω της παρουσίας του μετακαολίνης μειώνει τον κίνδυνο της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης.

Η βελτιωμένη δομή του σκυροδέματος δεν οφείλεται μόνο στη δράση των προϊόντων ενυδάτωσης του μετακαολίνης, αλλά και στην σημαντική συμβολή των μικρών σωματιδίων του, που δρουν ως φυσικά πληρωτικά μέσα. Έτσι δημιουργείται μια συμπαγής δομή σκυροδέματος χαμηλού

πορώδους, ειδικά στη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμέντου, με συνέπεια την αποτελεσματικότερη συμμετοχή των αδρανών στη μηχανική αντοχή, που συνεπάγεται αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος.

Επομένως, είναι φανερό πως η παρουσία μετακαολίνη στο σκυρόδεμα βελτιώνει το πορώδες και την αντίστοιχη κατανομή πόρων του, μειώνει την διαπερατότητα του σε νερό, δυσχεραίνει την διάχυση των χλωριόντων και τελικά βελτιώνει σημαντικά την ανθεκτικότητά του, με ταυτόχρονη βελτίωση της μηχανικής αντοχής του.

Η χρήση του μετακαολίνη θεωρείται επίσης φιλική προς το περιβάλλον, καθώς συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, λόγω της μείωσης του απαιτούμενου ποσοστού τσιμέντου Portland για την παραγωγή του σκυροδέματος. Παράλληλα, η παραγωγή του μετακαολίνη από τη θερμική αποσύνθεση του καολινίτη, δε συνοδεύεται από την εκπομπή CO_2 . Ωστόσο, η χρήση του μετακαολίνη στην παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι μέχρι σήμερα περιορισμένη, πιθανόν για οικονομικούς λόγους. Η τιμή του μετακαολίνη είναι γενικά σημαντικά υψηλότερη, συγκρινόμενη με την τιμή του τσιμέντου, γεγονός που οφείλεται στην παραγωγή μικρότερων ποσοτήτων του υλικού. Επομένως, τα σημαντικότερα κριτήρια για τη χρήση του μετακαολίνη στην παραγωγή σκυροδέματος είναι κυρίως τεχνολογικά και περιβαλλοντικά, παρά οικονομικά. Η πολύ υψηλή ανθεκτικότητα που έχουν επιδείξει τα σκυροδέματα που περιέχουν μετακαολίνη, θέτει ωστόσο ισχυρές βάσεις για τη μελλοντική αύξηση της χρήσης του μετακαολίνη στην τεχνολογία παρασκευής σκυροδέματος.

3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Γενικά

Στη μέχρι σήμερα επιστημονική έρευνα που έχει διεξαχθεί, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές εργασίες και μελέτες για τη διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών διαφόρων συνθέσεων συμβατικού ή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, τόσο στη νωπή όσο και στη σκληρυμένη κατάσταση. Οι συνθέσεις αυτές περιέχουν μετακαολίνη ή κάποιο άλλο πρόσμικτο. Παράλληλα με τη μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών έχει αρχίσει να γίνεται μια προσπάθεια ευρύτερης διερεύνησης της έννοιας της ανθεκτικότητας και των τρόπων βελτίωσης των ιδιοτήτων του σκυροδέματος που την επηρεάζουν.

Ακολουθεί μια παρουσίαση των βασικών στοιχείων, συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων κάποιων από τις πρόσφατες μελέτες και ερευνητικές εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί, πάνω σε διάφορα θέματα που σχετίζονται με το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

3.2 Τρέχουσαερευνητική εργασία - μελέτη και αποτελέσματα

Οι **Sideris και Anagnostopoulos (2013)** διερεύνησαν τις ιδιότητες ανθεκτικότητας αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος “μεσαίας κατηγορίας” αντοχής σε σύγκριση με συμβατικό σκυρόδεμα ίδιας κατηγορίας αντοχής. Παρασκευάστηκαν 8 διαφορετικά μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος αντοχής C20/25, C25/30, C30/37 και C35/45 χρησιμοποιώντας τσιμέντο και αδρανή διαφορετικού είδους. Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που μετρήθηκαν ήταν η τριχοειδής απορρόφηση, η αντίσταση στην ενανθράκωση και η αντίσταση στη διάχυση χλωριόντων, όπου για τα μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος μετρήθηκαν χαμηλότερες τιμές, υποδηλώνοντας βελτιωμένη ανθεκτικότητα. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι όσο μειωνόταν ο λόγος νερό/τσιμέντο, τόσο μικρότερη γινόταν η διαφορά στις τιμές των παραμέτρων που μετρήθηκαν μεταξύ του αυτοσυμπυκνούμενου και του συμβατικού σκυροδέματος. Παράλληλα, οι συντελεστές που υπολογίστηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του χρόνου ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η διάρκεια ζωής των κατασκευών, αναφορικά με την αντίσταση στην ενανθράκωση και τη διάχυση χλωριόντων, αυξήθηκε σημαντικά με τη χρήση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος· αύξηση που ήταν πιο σημαντική για τα μίγματα χαμηλότερης κατηγορίας αντοχής. Τέλος, σημειώθηκε ότι η διαφορά στο κόστος παρασκευής του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σε σχέση με το συμβατικό, μειώνεται όσο αυξάνει η κατηγορία

αντοχής του, ενώ και το ετήσιο κόστος συντήρησης της κατασκευής μειώνεται ή και γίνεται μικρότερο από αυτό που θα αντιστοιχούσε στο συμβατικό σκυρόδεμα της ίδιας κατηγορίας αντοχής.

Οι **Kanellopoulos, Petrou και Ioannou (2012)** παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας ερευνητικής εργασίας για τους βασικούς δείκτες που προσδιορίζουν την ανθεκτικότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (τριχοειδής απορρόφηση, πορώδες και διάχυση χλωριόντων), συγκρίνοντας τους με τις αντίστοιχες παραμέτρους του συμβατικού σκυροδέματος. Στα μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος μετρήθηκαν χαμηλότερες τιμές για το ανοιχτό πορώδες και την τριχοειδή απορρόφηση (τουλάχιστον 30% μικρότερες τιμές), σε σχέση με τα μίγματα συμβατικού σκυροδέματος. Όσον αφορά στη διάχυση χλωριόντων, για όλα τα μίγματα με εξαίρεση το μίγμα με λόγο νερού/τσιμέντο 0,60, μετρήθηκαν χαμηλότερες τιμές. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι για μικρή μείωση του λόγου νερού/τσιμέντο (0,50 - 0,45 από 0,60) η διαπερατότητα, η τριχοειδής απορρόφηση και το πορώδες μειώθηκαν σημαντικά. Τα μίγματα στα οποία είχε χρησιμοποιηθεί πυριτική παιπάλη παρουσίασαν ακόμη πιο βελτιωμένα αποτελέσματα, ιδιαίτερα όσον αφορά στη διάχυση χλωριόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν συσχέτιση μεταξύ των επιμέρους δεικτών ανθεκτικότητας που εξετάστηκαν στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας. Παρατηρήθηκε απόλυτα γραμμική σχέση μεταξύ τριχοειδούς απορρόφησης και πορώδους, ενώ παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για τη σχέση τριχοειδούς απορρόφησης - διάχυσης χλωριόντων. Ωστόσο, σημειώθηκε ότι για χρήση διαφορετικών προσμίκτων ενδέχεται να αλλάξει η μικροδομή του σκυροδέματος, οδηγώντας σε διαφορετική συσχέτιση. Παράλληλα, καταγράφηκε η αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ τριχοειδούς απορρόφησης και θλιπτικής αντοχής.

Οι **Madandoust και Mousavi (2012)** μελέτησαν τις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου ΑΣΣ παρασκευάζοντας 15 μίγματα με διαφορετικά ποσοστά μετακαολίνη (0, 5, 10, 15, 20% του βάρους του τσιμέντου) και 3 διαφορετικούς λόγους νερού/τσιμέντο (0,32, 0,48 και 0,52). Οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος που διερευνήθηκαν ήταν η δοκιμή εξάπλωσης (διάμετρος εξάπλωσης, χρόνος εξάπλωσης- t_{500}), η εκτίμηση του δείκτη οπτικής σταθερότητας, η δοκιμή χόανης V και η δοκιμή του δοχείου L, ενώ στο σκληρυμένο σκυρόδεμα πραγματοποιήθηκαν πειράματα θλίψης και εφελκυσμού, μετρήθηκαν η αρχική και η τελική απορρόφηση και η ηλεκτρική αντίσταση. Για τη δοκιμή εξάπλωσης προέκυψαν τιμές ανάμεσα στα 660-715 mm με την κατάλληλη δοσολογία υπερευστοποιητή, εύρος τιμών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές πρακτικές εφαρμογές. Παράλληλα, προέκυψε δείκτης οπτικής σταθερότητας 0-1 σε όλα τα μίγματα, καλή εργασιμότητα που διατηρείται μέχρι και 60 min στα μίγματα με 15% μετακαολίνη, ενώ δεν υπήρξε εμπλοκή στη δοκιμή του δοχείου L, παρά τη μείωση της ικανότητας διέλευσης. Για το σκληρυμένο σκυρόδεμα, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη μετακαολίνη βελτίωσε τόσο τις πρώιμες όσο και τις τελικές θλιπτικές αντοχές, ειδικά εντός των πρώτων 14 ημερών (έως και 27%), ενώ το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε και στις εφελκυστικές αντοχές σε μικρότερο βαθμό. Όσον αφορά στην απορροφητικότητα, παρατηρήθηκαν μειωμένες τιμές (κάτω από 3% στα 30 min), ενώ η ηλεκτρική αντίσταση αυξήθηκε.

Τέλος, με βάση τη συνολική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προτάθηκε το 10%, ως το πιο αποδοτικό ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη.

Οι **Hassan, Lacherni και Hossain (2012)**, μελέτησαν την επίδραση της προσθήκης μετακαολίνη και πυριτικής παιπάλης, σε ποσοστά 3, 5, 8, 11, 15, 20, 25% και 3, 5, 8, 11% του βάρους του τσιμέντου αντίστοιχα στις ιδιότητες της ανθεκτικότητας αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι δεν μελετήθηκαν υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου με πυριτική παιπάλη, διότι απαιτούσαν πολύ μεγάλες ποσότητες ρευστοποιητή, ενώ η επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων του νωπού σκυροδέματος ήταν δυσχερής. Οι επιμέρους συνθέσεις αξιολογήθηκαν με βάση τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (δοκιμή εξάπλωσης, δοκιμή χοάνης V, δοκιμή δοχείου L), καθώς και του σκληρυμένου σκυροδέματος (θλιπτική αντοχή και ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα). Για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας πραγματοποιήθηκαν πειράματα συστολής ξήρανσης, ψύξης και απόψυξης και διάχυσης χλωριόντων. Όλα τα μίγματα παρασκευάστηκαν με στόχο διάμετρο εξάπλωσης 650 mm και σταθερό λόγο νερό/τσιμέντο ίσο με 0,4. Στα μίγματα με μετακαολίνη παρατηρήθηκε αύξηση του ιξώδους με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης, ενώ αντίθετα στα μίγματα με πυριτική παιπάλη δεν υπήρξε κάποια διαφοροποίηση. Η θλιπτική αντοχή αυξανόταν με αύξηση του ποσοστού του μετακαολίνη (0-25%), ενώ για τα μίγματα με πυριτική παιπάλη σημειώθηκε μέγιστη τιμή θλιπτικής αντοχής για ποσοστό αντικατάστασης 8%. Σε όλα τα μίγματα παρατηρήθηκε μείωση της συστολής ξήρανσης, βελτίωση της αντίστασης σε ψύξη-απόψυξη (βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης για τα μίγματα με μετακαολίνη ήταν 20%, ενώ για τα μίγματα με πυριτική παιπάλη 8%) και μείωση της διάχυσης χλωριόντων κατά 89% για ποσοστό αντικατάστασης με μετακαολίνη 20%). Σημειώνεται ότι τα μίγματα με μετακαολίνη σημείωσαν σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη μετακαολίνη ή πυριτικής παιπάλης δεν επηρέασε τη συνολική περιεκτικότητα σε αέρα του σκληρυμένου ΑΣΣ, μείωσε όμως το μέγεθος των κενών της ενυδατωμένης πάστας του τσιμέντου το οποίο ήταν εντονότερο στα μίγματα με μετακαολίνη από εκείνα με πυριτική παιπάλη. Ως τελικό συμπέρασμα, προέκυψε ότι για την επίτευξη συνθέσεων ΑΣΣ με βελτιωμένες ιδιότητες ανθεκτικότητας το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη είναι 20%, ενώ της πυριτικής παιπάλης 8%.

Οι **Güneyisi et al. (2012)** μελέτησαν την επίδραση της αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη στις μηχανικές ιδιότητες, τη συστολή ξήρανσης και τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, σε σχέση με εκείνα που δεν περιέχουν ορυκτά πρόσμικτα. Τα ποσοστά αντικατάστασης που μελετήθηκαν ήταν 0, 5, και 15% επί της μάζας του τσιμέντου και οι λόγοι νερού/τσιμέντο 0,25 και 0,35. Διεξήχθησαν πειράματα υδατοπερατότητας, αεροπερατότητας, αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό και έγινε μέτρηση των τάσεων και της απώλειας βάρους λόγω ξήρανσης. Παρατηρήθηκε αυξημένη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή στα μίγματα που περιείχαν πρόσμικτα, αντοχή που αυξανόταν με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης και για τους δύο λόγους νερό/τσιμέντο. Τα μίγματα αυτά παρουσίασαν επιπλέον μείωση στη συστολή ξήρανσης (η μικρότερη

τιμή παρατηρήθηκε στο μίγμα με αντικατάσταση 15% με πυριτική παιπάλη) και μικρότερη απώλεια βάρους, καθώς και μικρότερα πλάτη ρωγμών. Οι υψηλότεροι συντελεστές διαπερατότητας σε αέρα παρατηρήθηκαν στο σκυρόδεμα χωρίς πρόσμικτα ($2,04 \times 10^{-16}$ και $3,45 \times 10^{-16} \text{ m}^2$), ενώ στα μίγματα με τα πρόσμικτα σημειώθηκαν σημαντικές μειώσεις και για τους δύο λόγους νερού/ τσιμέντο. Οι μικρότεροι συντελεστές σημειώθηκαν για ποσοστό αντικατάστασης 15% και στα δύο μίγματα για λόγο νερού/τσιμέντο ίσο με 0,25 για τα μίγματα μετακαολίνη και 0,35 για τα μίγματα πυριτικής παιπάλης. Ομοίως, οι τιμές της τριχοειδούς απορρόφησης μειώθηκαν στα μίγματα με πρόσμικτα, με τις μέγιστες μειώσεις να ανέρχονται σε 30% για το μίγμα με μετακαολίνη 15% και λόγο νερού/τσιμέντο 0,25 και σε 28% για το μίγμα με πυριτική παιπάλη 15% και λόγο νερού/τσιμέντο 0,35.

Οι **Ramezaniapour και Bahrami (2012)** σε μελέτη τους διερεύνησαν τη συμπεριφορά μιγμάτων σκυροδέματος με μετακαολίνη, ως προς τη θλιπτική αντοχή, τη διείσδυση του νερού, την τριχοειδή απορρόφηση, τη διάχυση χλωριόντων, την ηλεκτρική αντίσταση και της προσρόφησης NaCl (salt ponding κατά **ASTM C 1543-02, 2002**) στις 7, 28, 90 και 180 μέρες. Τα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη που εξετάστηκαν ήταν 0%, 10%, 12,5% και 15% κατά βάρος, για λόγους νερού/συνδετικό υλικό (w/b ratios): 0,35, 0,4 και 0,5, διατηρώντας σε όλες τις περιπτώσεις σταθερή την ποσότητα του συνδετικού υλικού (binder) ίση με 400 kg/m^3 . Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι, το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη ήταν 12,5% και 10% για τους λόγους w/b 0,4 και 0,35 αντίστοιχα. Η προσθήκη του μετακαολίνη οδήγησε σε μικρότερα βάθη διείσδυσης του νερού, ενώ από το πείραμα της τριχοειδούς απορρόφησης προέκυψε ότι η προσθήκη μετακαολίνη σε ποσοστό 10% δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα, ανεξάρτητα από το λόγο νερού/συνδετικό υλικό και την ηλικία των δοκιμίων. Ανάμεσα στη θλιπτική αντοχή και τη διάχυση χλωριόντων παρατηρήθηκε μια σχέση εκθετικής μορφής, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αντίσταση στη διάχυση χλωριόντων αυξάνεται με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Παράλληλα, από τις δοκιμές ηλεκτρικής αντίστασης προέκυψε ότι η χρήση του μετακαολίνη αυξάνει σημαντικά την ηλεκτρική αντίσταση, και μάλιστα 2-4 φορές περισσότερο για το ποσοστό αντικατάστασης 15%. Τέλος, από παρατηρήσεις με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) στην τσιμεντόπαστα, προέκυψε ότι η μικροδομή της τσιμεντόπαστας που περιείχε μετακαολίνη ήταν πιο ομοιογενής και συμπαγής σε σχέση με το σύνηθες τσιμέντο Portland.

Οι **Vejmelkova et al. (2010)** μελέτησαν τις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες, αλλά και την ανθεκτικότητα μιγμάτων από αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με μετακαολίνη ή σκωρία υψικαμίνου. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν σημαντικά υψηλή τάση διαρροής, σχετικά μικρό ιξώδες στα μίγματα με μετακαολίνη, σε αντίθεση με τα μίγματα με σκωρία υψικαμίνου. Η θλιπτική αντοχή των μιγμάτων με μετακαολίνη κατά τις 2 πρώτες μέρες σκλήρυνσης αναπτύχθηκε πιο γρήγορα σε σχέση με τα μίγματα με σκωρία υψικαμίνου ενώ στο μεταγενέστερο χρονικό διάστημα η σχετική αύξηση της αντοχής ήταν παρόμοια για τα δύο μίγματα, με τα μίγματα μετακαολίνη να αναπτύσσουν ωστόσο υψηλότερες τιμές αντοχής. Επιπλέον, παρατηρήθηκε χαμηλότερος συντελεστής απορροφητικότητας και μικρότερο βάθος διάχυσης του νερού στις πρώτες 28 ημέρες για τα μίγματα με μετακαολίνη σε

σχέση με τα μίγματα με σκωρία υψικαμίνου, ενώ στις 90 συνέβαινε το αντίθετο, γεγονός που υποδηλώνει πιθανή επιβράδυνση της ποζολανικής αντίδρασης. Επίσης στα μίγματα με μετακαολίνη απαιτήθηκε μεγαλύτερο ποσοστό νερού και υπερρευστοποιητή από τα δεύτερα. Τέλος, οι δοκιμές για την αντίσταση σε ψύξη έδειξαν άριστη συμπεριφορά για τα μίγματα με μετακαολίνη με μηδενική απώλεια μάζας μετά από 56 κύκλους σε διάλυμα άλατος για την απόψυξή τους, ενώ η συμπεριφορά των μιγμάτων με σκωρία υψικαμίνου κρίθηκε ως «καλή».

Οι **Badogiannis και Tsivilis (2009)** μελέτησαν την ανθεκτικότητα σκυροδέματος με μετακαολίνη, ως προς την τριχοειδή απορρόφηση, την αντίσταση σε διάχυση χλωριόντων, τη διαπερατότητα σε αέρα, το πορώδες καθώς και την κατανομή του μεγέθους των πόρων. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ελληνικός καολίνης με χαμηλό ποσοστό περιεχόμενου καολινίτη (52%), που υποβλήθηκε σε θερμική επεξεργασία, οπότε και παράχθηκε μετακαολίνης με μεγάλη λεπτότητα. Επιπροσθέτως, για λόγους σύγκρισης χρησιμοποιήθηκε και μετακαολίνης του εμπορίου με υψηλή καθαρότητα. Παρασκευάστηκαν 8 διαφορετικά μίγματα με αντικατάσταση είτε τσιμέντου είτε άμμου με μετακαολίνη, σε ποσοστά 10% και 20% κατά βάρος του τσιμέντου. Τα δοκίμια για τις δοκιμές ανθεκτικότητας συντηρήθηκαν για 90 μέρες σε κορεσμένο με υδράβεστο νερό, θερμοκρασίας 20°C, με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη ενυδάτωση του τσιμέντου και την πραγματοποίηση της ποζολανικής αντίδρασης. Από την έρευνα προέκυψε ότι, για το σκυρόδεμα με μετακαολίνη σημειώθηκαν σημαντικά χαμηλότερες τιμές όσον αφορά στη διάχυση χλωριόντων, τη διαπερατότητα σε αέρα και την τριχοειδή απορρόφηση. Για τις παραπάνω ιδιότητες ανθεκτικότητας προέκυψε από τις δοκιμές ότι, τα βέλτιστα ποσοστά αντικατάστασης ήταν: 10% αντικατάσταση της άμμου, 10% αντικατάσταση του τσιμέντου και 20% αντικατάσταση της άμμου, αντίστοιχα. Παράλληλα, προέκυψε ότι η προσθήκη του μετακαολίνης βελτιώνει το πορώδες του σκυροδέματος, οδηγώντας σε σημαντικά μειωμένες τιμές του μεγέθους των πόρων και μεγαλύτερη ομοιομορφία της κατανομής του μεγέθους των πόρων. Τέλος, όσον αφορά στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, ο παραγόμενος από τον ελληνικό καολίνη μετακαολίνης προσδίδει παρόμοια συμπεριφορά σε σχέση με το μετακαολίνη του εμπορίου.

Οι **Sidique και Kaur (2009)** διερεύνησαν την επίδραση της αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη στα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ζώνης του σκυροδέματος. Το τσιμέντο αντικαταστάθηκε σε ποσοστά 5, 10 και 15% με μετακαολίνη και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αρχικού ρυθμού απορρόφησης (ISAT) (**BSI, 1996. BS 1881 - 208 – 1996**), τριχοειδούς απορρόφησης, τριχοειδούς απορρόφησης με ολική εμβάπτιση και θλιπτικής αντοχής σε ηλικίες 35, 56 και 84 ημερών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για αύξηση του ποσοστού του μετακαολίνης από 5 σε 15%, υπήρξε μείωση στην ISAT και μείωση στην τριχοειδή απορρόφηση μέχρι ποσοστό αντικατάστασης 10%, ενώ για ποσοστό αντικατάστασης 15% σημειώθηκε αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης. Όλες οι συνθέσεις έδειξαν χαμηλές τιμές τριχοειδούς απορρόφησης με ολική εμβάπτιση, μικρότερες από 10% (από 7,0 έως 7,9%). Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η θλιπτική αντοχή αυξανόταν με την αύξηση

της ηλικίας του σκυροδέματος, ενώ σημειώθηκε και μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση της αντοχής με την τριχοειδή απορρόφηση. Σημειώνεται ότι παρατηρήθηκε μείωση της θλιπτικής αντοχής για ποσοστό αντικατάστασης 15%, γεγονός που συνάδει με την αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης για το ίδιο ποσοστό αντικατάστασης, όπως προαναφέρθηκε. Τέλος, προέκυψε ως συμπέρασμα ότι ποσοστά αντικατάστασης μεγαλύτερα από 15% δεν βελτιώνουν εξίσου σημαντικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, όσο συμβάλλουν στη βελτίωση των χαρακτηριστικών ανθεκτικότητας της επιφανειακής ζώνης του σκυροδέματος.

Οι **Güneysi, Gesoglu και Mermerdas (2007)** μελέτησαν την επίδραση του μετακαολίνης στη βελτίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος. Συνολικά παρασκευάστηκαν 6 διαφορετικά μίγματα, καθώς εξετάστηκαν δυο ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη (10% και 20% κατά βάρος) και δύο λόγοι νερού/τσιμέντο (0,35 και 0,55). Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν περιελάμβαναν τον προσδιορισμό της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής, την τριχοειδή απορρόφηση με ολική εμβάπτιση (water absorption), τη συστολή ξήρανσης και την απώλεια βάρους λόγω ξήρανσης, καθώς και το πορώδες και την κατανομή του μεγέθους των πόρων, με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας υδραργύρου. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες ηλικίες μέχρι και την ηλικία των 120 ημερών. Από τις δοκιμές σε θλίψη προέκυψε ότι η προσθήκη μετακαολίνης αυξάνει τόσο την πρώιμη, όσο και τη μεταγενέστερη αντοχή του σκυροδέματος (έως και 30% μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης, το λόγο νερού/τσιμέντο και την ηλικία του δοκιμίου τη χρονική στιγμή εκτέλεσης του πειράματος). Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για την εφελκυστική αντοχή, ωστόσο η αύξηση αυτής με την αύξηση της προσθήκης του μετακαολίνης, ήταν μικρότερη συγκρινόμενη με τη θλιπτική αντοχή. Παράλληλα, η συστολή ξήρανσης για τα δοκίμια με μετακαολίνη ήταν σημαντικά μικρότερη, με τα δοκίμια με υψηλότερο λόγο νερού/τσιμέντο να παρουσιάζουν τη μικρότερη συστολή ξήρανσης. Η προσθήκη του μετακαολίνης οδήγησε επίσης σε εξαιρετική βελτίωση της δομής των πόρων του σκυροδέματος. Το ολικό πορώδες μειώθηκε σημαντικά, με τη μείωση να κυμαίνεται από 22 έως 49%, ανάλογα με το λόγο νερού/τσιμέντο και το ποσοστό αντικατάστασης του μετακαολίνης, ενώ παρατηρήθηκε και σημαντική μείωση της μέσης διαμέτρου των πόρων, ιδιαίτερα για το ποσοστό αντικατάστασης 20%. Τέλος, παρατηρήθηκε μια σχέση εκθετικής μορφής ανάμεσα στο πορώδες και την τριχοειδή απορρόφηση με ολική εμβάπτιση, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μίγματα με υψηλότερες τιμές απορρόφησης είναι πιθανόν λιγότερο ανθεκτικά εξαιτίας του μεγαλύτερου πορώδους.

Οι **Kim, Lee και Moon (2005)** μελέτησαν και σύγκριναν τις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό και καμπτική αντοχή) και την ανθεκτικότητα (διάχυση χλωριόντων, χημική προσβολή οξέων, ψύξη και απόψυξη και ενανθράκωση) μιγμάτων σκυροδέματος με μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη. Οι δοκιμές αντοχής έδειξαν ότι οι υψηλότερες αντοχές προέκυψαν για αντικατάσταση με μετακαολίνη σε ένα εύρος ποσοστών μεταξύ 10 και 15%. Η βελτίωση ωστόσο στην αντοχή που παρατηρήθηκε για αύξηση του ποσοστού του μετακαολίνης από 10% σε 15% κρίθηκε αμελητέα και επομένως προτάθηκε σαν αποδοτικότερο ποσοστό αντικατάστασης το 10%,

δεδομένου του κόστους του μετακαολίνης. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε ότι η διάχυση των χλωριόντων μειωνόταν σημαντικά, καθώς αυξανόταν η αναλογία της πυριτικής παιπάλης και του μετακαολίνης στη σύνθεση, ενώ και η αντοχή σε ψύξη-απόψυξη παρουσιάστηκε αυξημένη στα μίγματα με μετακαολίνη συγκριτικά με τα μίγματα με πυριτική παιπάλη. Από τις δοκιμές ενανθράκωσης προέκυψε ότι το βάθος ενανθράκωσης αυξανόταν με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης (αύξηση 100-370% για ποσοστά αντικατάστασης 15% και 20% ανεξάρτητα από την ηλικία του σκυροδέματος), γεγονός που οφείλεται στο ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη ή πυριτική παιπάλη μειώνει το ποσοστό του πορτλαντίτη- $Ca(OH)_2$ στα προϊόντα ενυδάτωσης εξαιτίας της ποζολανικής αντίδρασης. Τέλος, προέκυψε σαν γενικό συμπέρασμα ότι ο μετακαολίνης συνιστά ένα υποσχόμενο υλικό, τόσο για τη βελτίωση της μηχανικής αντοχής όσο και για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας, το οποίο μπορεί να αντικαταστήσει την πιο ακριβή πυριτική παιπάλη.

Οι **De Beer, Le Roux και Kearsley (2005)** σε μελέτη τους σύγκριναν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της ραδιογραφίας νετρονίων (neutron radiography-NRad) ως προς τη συλλογή ποσοτικών δεδομένων για το πορώδες, την τριχοειδή απορρόφηση και τη διαπερατότητα σε οξυγόνο του σκυροδέματος, σε σύγκριση με τις συμβατικές εργαστηριακές μεθόδους. Η ραδιογραφία νετρονίων είναι μια μη καταστροφική μέθοδος, με την οποία προσδιορίζεται το περιεχόμενο υδρογόνου σε δοκίμια, από το μετρούμενο προφίλ της απορρόφησης των νετρονίων σε αυτά. Τα νετρόνια απορροφούνται σε ένα μεγάλο βαθμό από το υδρογόνο και ουσίες που περιέχουν υδρογόνο. Επομένως, οι εικόνες των νετρονίων ενός πορώδους υλικού που περιέχει νερό, μπορούν να δώσουν μια ακριβή ένδειξη και εικόνα της δομής των πόρων του υλικού. Τα αποτελέσματα για το πορώδες και την τριχοειδή απορρόφηση έδειξαν ότι τα αποτελέσματα από τη NRad είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις συμβατικές μεθόδους. Παράλληλα, σημειώθηκε ότι ο λόγος νερού/τσιμέντο και η συντήρηση του σκυροδέματος διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο όσον αφορά στις ιδιότητες ανθεκτικότητας του σκυροδέματος.

Οι **Razak, Chai και Wong (2004)** παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας ερευνητικής εργασίας για τη συμβολή της χρήσης του μετακαολίνης και της πυριτικής παιπάλης στη βελτίωση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος της επιφανειακής ζώνης (near surface properties). Οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν περιείχαν σε ποσοστό 10% μετακαολίνη ή πυριτική παιπάλη και ελέγχθηκαν ως προς τον αρχικό ρυθμό απορρόφησης (initial surface absorption), την τριχοειδή απορρόφηση με ολική εμβάπτιση (water absorption) και την υδατοαπορροφητικότητα (sorptivity test). Στην εν λόγω μελέτη εξετάστηκε επίσης και η επίδραση της μεθόδου συντήρησης του σκυροδέματος (συντήρηση σε αέρα, συντήρηση με πλαστική μεμβράνη, συντήρηση με υγρή λινάτσα και συντήρηση στο νερό). Τόσο οι συνθέσεις με μετακαολίνη, όσο και οι συνθέσεις με πυριτική παιπάλη παρουσίασαν βελτίωση των συνολικών χαρακτηριστικών της επιφανειακής ζώνης του σκυροδέματος και σημαντικά μειωμένες τιμές των εν λόγω ιδιοτήτων. Όπως ήταν αναμενόμενο, η συντήρηση στο νερό έδωσε το

λιγότερο διαπερατό σκυρόδεμα, ενώ τα δοκίμια που συντηρήθηκαν στον αέρα παρουσίασαν χειρότερες ιδιότητες ανθεκτικότητας. Για τις συνθέσεις με πρόσμικτα παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές μεταξύ των τιμών στα δοκίμια που συντηρήθηκαν στο νερό και στον αέρα, γεγονός που καταδεικνύει τη σπουδαιότητα της καλής συντήρησης σκυροδεμάτων που περιέχουν τσιμεντοειδή πρόσμικτα υλικά. Παράλληλα, στα μίγματα με πυριτική παιπάλη μετρήθηκαν χαμηλότερες τιμές απορρόφησης σε σχέση με τα μίγματα με μετακαολίνη, υπό τις ίδιες συνθήκες συντήρησης, κάτι που οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η πυριτική παιπάλη αποτελεί καλύτερο ποζολανικό υλικό. Ωστόσο, αποδείχτηκε περισσότερο επιρρεπής στη μέθοδο συντήρησης σε σχέση με το μετακαολίνη. Τέλος, προτάθηκε ότι για ένα σκυρόδεμα χαμηλής διαπερατότητας, η τιμή του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης θα πρέπει να αναμένεται μικρότερη από $0,1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{min}^{1/2}$.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Συνθέσεις – Σκοπός πειραμάτων

Για τις ανάγκες των πειραμάτων στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 11 διαφορετικές συνθέσεις αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, οι οποίες είχαν παρασκευαστεί στο πλαίσιο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας των **Μακρής και Σμαργιανάκη (2012)**.

Στη διπλωματική αυτή εργασία είχαν πραγματοποιηθεί συνολικά 14 σκυροδετήσεις ΑΣΣ (5 δοκιμαστικές των 15lt έκαστη και 9 των 40 lt έκαστη) και 2 σκυροδετήσεις ΣΣ (40 lt έκαστη), με σκοπό τον προσδιορισμό της επιρροής της χρήσης του μετακαολίνης στα μίγματα ΑΣΣ, σε ότι αφορά τόσο στις μηχανικές και ρεολογικές ιδιότητες όσο και στην ανθεκτικότητα του παραγόμενου σκυροδέματος. Η παραγωγή των μιγμάτων ΑΣΣ βασίστηκε σε προγενέστερα δοκιμασμένη σύνθεση ΑΣΣ στο Εργαστήριο Ω.Σ, ενώ οι υπόλοιπες συνθέσεις παρασκευάστηκαν α) με αντικατάσταση ποσοστού του τσιμέντου με μετακαολίνη, από περίπου 7% έως 20% κ.β. και β) με αντικατάσταση ποσοστού φίλλερ (Ip20) με μετακαολίνη, από περίπου 14% έως 40% κ.β. (Πίνακας 2). Καθώς στόχος ήταν η διερεύνηση της προσθήκης του μετακαολίνης στις συνθέσεις του ΑΣΣ, η ποσότητα του ενεργού νερού (w_{eff}) διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή, έτσι ώστε να μη μεταβάλλεται σημαντικά το πορώδες και να αναδειχθεί αποκλειστικά η δράση του μετακαολίνης. Στην 1^η ομάδα συνθέσεων έγινε αντικατάσταση ενός υδραυλικού υλικού (τσιμέντο, cem) με ένα ποζολανικό (μετακαολίνη, mk) μικρότερης κοκκομετρίας (Πίνακας 3). Ο σκοπός ήταν να αναδειχθεί η ποζολανική δραστηριότητα του μετακαολίνης (κατανάλωση $Ca(OH)_2$, παραγωγή νέων ποζολανικών προϊόντων), αλλά και η φυσική του δράση ως μέσο βελτίωσης της δομής του σκληρυμένου σκυροδέματος (packing density). Στην 2^η ομάδα συνθέσεων έγινε αντικατάσταση φίλλερ (Ip20) με ένα ποζολανικό (μετακαολίνη, mk) παρόμοιας κοκκομετρίας (Πίνακας 3). Ο σκοπός ήταν να αναδειχθεί ο ρόλος του μετακαολίνης μόνο ως ποζολανικό υλικό και η ενδεχόμενη φυσική του δράση, συγκριτικά με την άλλη ομάδα, περιορίζεται μόνο στην τσιμεντόπαστα.

Πίνακας 2: Περικτικότητατες συστατικών των συνθέσεων (kg/m³) και χαρακτηριστικοί λόγοι.

			Μάρτυρας	1η Ομάδα Συνθέσεων					2η Ομάδα Συνθέσεων					
Κωδικός σύνθεσης			SCC-01	SCC-02	SCC-03	SCC-04	SCC-05	SCC-06	SCC-07	SCC-08	SCC-09	NVC-01	NVC-02	
α/α Σύνθεσης			Σ170	Σ161	Σ164	Σ163	Σ165	Σ166	Σ168	Σ167	Σ169	Σ171	Σ172	
τσιμέντο	c 42.5	kg	350	326	313	301	280	350	350	350	350	400	400	
	Μετακαολί νης	mk	kg	0,00	24,00	37,00	49,00	70,00	24,00	37,00	49,00	70,00	0,00	0,00
φίλλερ	τύπος F		lp20	lp20	lp20	lp20	lp20	lp20	lp20	lp20	lp20	lp20	lp20	
	F	kg	175	175	175	175	175	151	138	126	105	0	0	
Αδρανή	s 0/4	kg	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	
	g ₁ 4/8	kg	150	150	150	150	150	150	150	150	150	200	200	
	g ₂ 8/16	kg	350	350	350	350	350	350	350	350	350	375	375	
ζημικά πρόσθετα	τύπος SP		C347	C347	C347	C347	C347	C347	C347	C347	C347	C347	C347	
	SP	kg	4,500	6,010	5,000	4,850	6,000	4,500	5,500	5,500	6,250	0,000	2,500	
νερό	w _{tot}	kg	225,31	225,30	225,30	225,30	225,30	222,90	222,90	222,90	222,90	208,58	208,58	
	w _{eff}	kg	208,26	208,25	208,25	208,25	208,25	206,09	206,22	206,34	206,55	192,50	192,50	
ΠΟΣΟΣΤΑ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	mk/cem (κ.β.)	%	<u>0,00</u>	<u>6,86</u>	<u>10,57</u>	<u>14,00</u>	<u>20,00</u>	-	-	-	-	0,00	0,00	
	mk/lp20 (κ.β.)	%	<u>0,00</u>	-	-	-	-	<u>13,71</u>	<u>21,14</u>	<u>28,00</u>	<u>40,00</u>	0,00	0,00	
ΒΑΡΟΣ	W _{tot}	kg	2304,81	2306,31	2305,30	2305,15	2306,30	2302,40	2303,40	2303,40	2304,15	2233,58	2236,08	
BINDER	b	kg	350	350	350	350	350	374	387	399	420	400	400	
Χαρακτηριστικοί λόγοι	w _{eff} /c		0,595	0,639	0,665	0,692	0,744	<u>0,589</u>	<u>0,589</u>	<u>0,590</u>	<u>0,590</u>	0,481	0,481	
	w _{eff} /b		<u>0,595</u>	<u>0,595</u>	<u>0,595</u>	<u>0,595</u>	<u>0,595</u>	0,551	0,533	0,517	0,492	0,481	0,481	
Κόστος	K	€/m ³	95	105	108	111	120	105	112	117	128	84	88	

c: τσιμέντο CEM II A/L 42.5N, mk: μετακαολίνης, lp: ανθρακικό ασβέστιο (lp20: καθαρότητα 97,6% CaCO₃, λεπτότητα 97% < 18μm, 15% < 2μm), s: άμμος 0/4, g₁: ριζάκι 4/8, g₂: γαρμπίλι 8/16, g₃: σκύρα 16/32, w_{tot}: ολικό νερό, w_{eff}: ενεργό νερό, SP: υπερρευστοποιητής πολυκαρβοξυλικού αιθέρα (V4000: Sika Viscocrete 4000, DSR1: Mapei Dynamon SR1, C347: BASF Glenium C347, W_{tot}: συνολικό βάρος μίγματος (ανά m³), c: τσιμέντο, b: συνδετικό υλικό (c+mk), K: Κόστος Πρώτων Υλών (€/m³)

Πίνακας 3: Κοκκομετρική Διαβάθμιση cem, lp20, mk.

	Θεωρητική Διάμετρος κόσκινου (μm)		
	d80	d50	d20
cem	29,60	14,57	4,67
lp20	10,05	4,63	1,46
mk	10,55	4,91	1,76

Για κάθε σύνθεση, και με σκοπό την εκτέλεση των ελέγχων που αφορούσαν στις μηχανικές ιδιότητες και τις ιδιότητες ανθεκτικότητας, παρασκευάστηκαν: (α) 10 κυβικές μήτρες (100 x 100 x 100 mm), (β) 2 κυβικές μήτρες (150 x 150 x 150 mm), (γ) 4 κυλινδρικές μήτρες (ύψους H=200 mm και διαμέτρου D=100 mm) και (δ) 1 πρισματική μήτρα (διατομής 100 x 100mm και μήκους L=500 mm).

Από τα 10 μικρά κυβικά δοκίμια (100 x 100 x 100 mm) που παρασκευάστηκαν, τρία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής και ένα για τον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης και του πορώδους στις 28 μέρες, ενώ από τα 2 κυβικά δοκίμια (150 x 150 x 150 mm), ένα χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της υδατοπερατότητας στις 28 ημέρες. Τα υπόλοιπα δοκίμια τοποθετήθηκαν στη δεξαμενή νερού για επανάληψη των πειραμάτων σε μεταγενέστερη ηλικία. Από τα 4 κυλινδρικά δοκίμια (ύψους H=200 mm και διαμέτρου D=100 mm), δύο χρησιμοποιήθηκαν στο Brazilian test για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής τους αντοχής, ένα κόπηκε σε τρία τμήματα, ένα εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της διάχυσης των χλωριόντων στις 28 ημέρες, ενώ τα υπόλοιπα δύο, όπως και το τελευταίο κυλινδρικό δοκίμιο, φυλλάχθηκαν για πειράματα που αφορούν στη διάχυση χλωριόντων, καθώς και για δοκιμές αεροπερατότητας και ενανθράκωσης σε μεταγενέστερη ηλικία. Τέλος το πρισματικό δοκίμιο (διατομής 100 x 100 mm και μήκους L=500 mm) χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

Σκοπός των πειραμάτων της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της επιρροής της χρήσης του μετακαολίνης στα μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, όπως αυτά είχαν παρασκευαστεί στα πλαίσια στην προαναφερθείσας διπλωματικής εργασίας, σε ότι αφορά στις μηχανικές ιδιότητες και κυρίως στις ιδιότητες ανθεκτικότητας του παραγόμενου σκυροδέματος, και πιο συγκεκριμένα η συσχέτισή τους με το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια που είχαν διατηρηθεί στη δεξαμενή νερού, επομένως δοκίμια ηλικίας 360 ημερών.

Συγκεκριμένα, τα πειράματα που διεξήχθησαν και περιγράφονται στα ακόλουθα κεφάλαια είναι:

- Τριχοειδής απορρόφηση (*S*) και πορώδες (*OP*)
- Διαπερατότητα σε νερό
 - Υδατοπερατότητα με τη διάταξη GWT-4000, (w_{p120})

- Υδατοπερατότητα κατά BS EN 12390-8:2000, (w_{p500})
- Διαπερατότητα σε αέρα g_p
- Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής f_c

4.2 Τριχοειδής απορρόφηση και πορώδες

4.2.1 Σκοπός του πειράματος

Η δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης νερού από το σκυρόδεμα αποσκοπεί στην ποσοτική περιγραφή του τριχοειδούς πορώδους του υλικού, εκφρασμένο σε μονάδες απορροφητικότητας. Ο στόχος των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν ήταν η μελέτη του φαινομένου της τριχοειδούς απορρόφησης νερού από το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, στο οποίο έχει γίνει αντικατάσταση ποσοστού του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη.

4.2.2 Προετοιμασία των δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 11 κυβικά δοκίμια (100x 100 x 100 mm), ένα δοκίμιο για κάθε διαφορετική σύνθεση σκυροδέματος που παρασκευάστηκε (SCC – 01-SCC – 09 και NVC – 01-NVC – 02). Τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τη δεξαμενή νερού όπου συντηρούνταν και εν συνεχεία ξηράνθηκαν σε φούρνο στους 91⁰C μέχρι σταθερού βάρους (διαφορά βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων σε 24 ±2 h, <0,1%). Η διαδικασία της ξήρανσης των δοκιμίων διήρκεσε από 6 έως 8 ημέρες, και κατόπιν σταθεροποιήσεως του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε η δοκιμή όπως περιγράφεται εν συνεχεία.

4.2.3 Πειραματική διαδικασία

Η διεξαγωγή του πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης βασίζεται σε οδηγία της **RILEM** (TC 116-PCD: *Permeability of concrete as a criterion of its durability*) που αναφέρεται στην προσρόφηση νερού μέσω τριχοειδούς απορρόφησης.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα αποτελείται από:

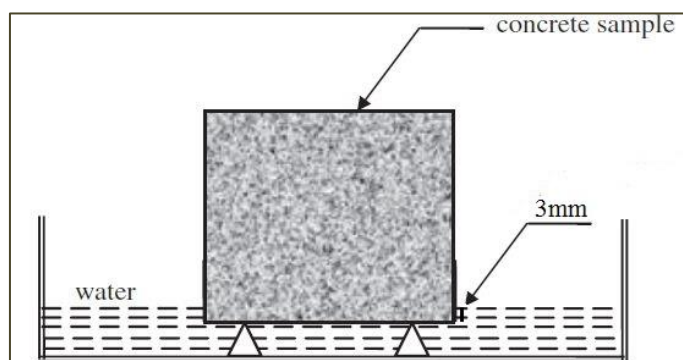
- Μία πλαστική δεξαμενή νερού μέσα στην οποία πραγματοποιήθηκε η δοκιμή (Εικόνα 2).
- Μία ειδικά διαμορφωμένη ανοξείδωτη μεταλλική βάση, η οποία τοποθετήθηκε μέσα στη δεξαμενή και πάνω στην οποία εδράζονταν τα δοκίμια κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης του πειράματος (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Πλαστική δεξαμενή νερού και ανοξείδωτη μεταλλική βάση.

Επίσης, για τις ανάγκες του πειράματος έγινε χρήση ζυγού με ακρίβεια 0,1 gr, καθώς και χρήση χρονόμετρου.

Η δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης πραγματοποιήθηκε με την καταγραφή της αύξησης του βάρους του δοκιμίου, σε συνάρτηση με το χρόνο από την αρχική επαφή του δοκιμίου με το νερό. Πριν την έναρξη της δοκιμής πραγματοποιήθηκε καταγραφή του βάρους του δοκιμίου με ακρίβεια 0.1 gr. Εν συνεχεία, τοποθετήθηκε η ειδικά διαμορφωμένη βάση μέσα στη δεξαμενή και έγινε συμπλήρωση της δεξαμενής με νερό (δικτύου) σε στάθμη τέτοια, ώστε η μέγιστη βύθιση του δοκιμίου να είναι 3 mm μετά την τοποθέτηση του πάνω στη βάση (Σχήμα 6).



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση του πειράματος της τριχοειδούς απορρόφησης S.

Ακολούθησε η τοποθέτηση των δοκιμίων, αφού είχαν αφεθεί να έρθουν σε θερμοκρασία δωματίου, μέσα στην δεξαμενή με την ταυτόχρονη έναρξη της μέτρησης του χρόνου (Εικόνα 3 και Εικόνα4). Σημειώνεται ότι απαιτείται προσοχή, έτσι ώστε να μην βραχούν οι υπόλοιπες πλευρές του δοκιμίου που δεν έρχονται σε επαφή με το νερό. Η καταγραφή του βάρους του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε σε χρόνους τέτοιους, ώστε η τετραγωνική ρίζα του χρόνου (σε min) να είναι φυσικός αριθμός. Δηλαδή έγινε καταγραφή του βάρους στο 1 min, στα 4 min, στα 9 min κ.ο.κ.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 16 καταγραφές με την τελευταία να γίνεται σε χρόνο 4:16 h μετά την έναρξη της δοκιμής. Σε κάθε χρονική στιγμή που γινόταν μέτρηση του βάρους του δοκιμίου, σκουπιζόταν ελαφρά με ένα σφουγγάρι η επιφάνεια που βρισκόταν σε επαφή με το νερό, ώστε να αφαιρεθεί η περίσσεια νερού στην επιφάνεια, αλλά η επιφάνεια να συνεχίζει να παραμένει υγρή. Παράλληλα, όποτε χρειαζόταν πραγματοποιούνταν συμπλήρωση του νερού της πλαστικής δεξαμενής, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η στάθμη του νερού στη δεξαμενή.



Εικόνα 3: Διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης – 1^η ομάδα συνθέσεων.



Εικόνα 4: Διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης – 2^η ομάδα συνθέσεων.

4.2.4 Υπολογισμός πορώδους

Παράλληλα με την δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης νερού, στα ίδια δοκίμια πραγματοποιήθηκε και υπολογισμός του ανοικτού πορώδους. Για τον υπολογισμό του ανοικτού πορώδους καταγράφηκε το βάρος κάθε δοκιμίου, με ακρίβεια 0.1 gr, σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ζύγιση του δοκιμίου στην κορεσμένη του κατάσταση, αμέσως μετά την έξοδο του από την δεξαμενή συντήρησης, (α) σε περιβάλλον αέρα (Εικόνα 5) και (β) σε περιβάλλον νερού, υπό άνωση (Εικόνα 6). Η τελευταία καταγραφή βάρους του δοκιμίου (γ) πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά την ξήρανσή τους, μέχρι την σταθεροποίηση του βάρους τους, σε περιβάλλον αέρα.



Εικόνα 5: Ζύγιση κορεσμένου δοκιμίου σε περιβάλλον αέρα.



Εικόνα 6: Ζύγιση κορεσμένου δοκιμίου υπό άνωση.

Το ανοικτό πορώδες (p) προκύπτει από τον λόγο της διαφοράς του βάρους του κορεσμένου δοκιμίου από το βάρος του δοκιμίου μετά την ξήρανση του, προς την διαφορά του βάρους του κορεσμένου δοκιμίου από το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου υπό άνωση.

Δηλαδή, $p = \frac{\alpha - \gamma}{\alpha - \beta}$, όπου α, β, γ οι καταγραφές του βάρους στις τρεις διαφορετικές καταστάσεις όπως αυτές περιγράφηκαν παραπάνω.

4.3 Υδατοπερατότητα

4.3.1 Σκοπός του πειράματος

Η μέτρηση της υδατοπερατότητας ενέχει, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.2, αρκετή αβεβαιότητα καθώς υπάρχουν παράγοντες όπως η δομή της εξωτερικής στοιβάδας του σκυροδέματος (επιφανειακό πορώδες, ανωμαλίες στην επιφάνεια κ.ο.κ) που επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της δοκιμής, αυξάνουν την αβεβαιότητα ως προς την ακρίβεια της μέτρησης και είναι δύσκολο να συνεκτιμηθούν ποσοτικά. Ο στόχος των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν ήταν η μελέτη της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος και η επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη.

Διεξήχθησαν δύο ομάδες πειραμάτων στα ίδια δοκίμια: η πρώτη στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με χρήση της συσκευής Germann Water-permeation Test (GWT-4000) της Germann Instruments A/S (Κεφάλαιο 4.3.3) και εν συνεχεία η

δεύτερη στα εργαστήρια του ομίλου TITAN, βάσει της μεθόδου που περιγράφεται στο πρότυπο BS EN 12390-8:2000 (BSI, 2000) (Κεφάλαιο 4.3.4).

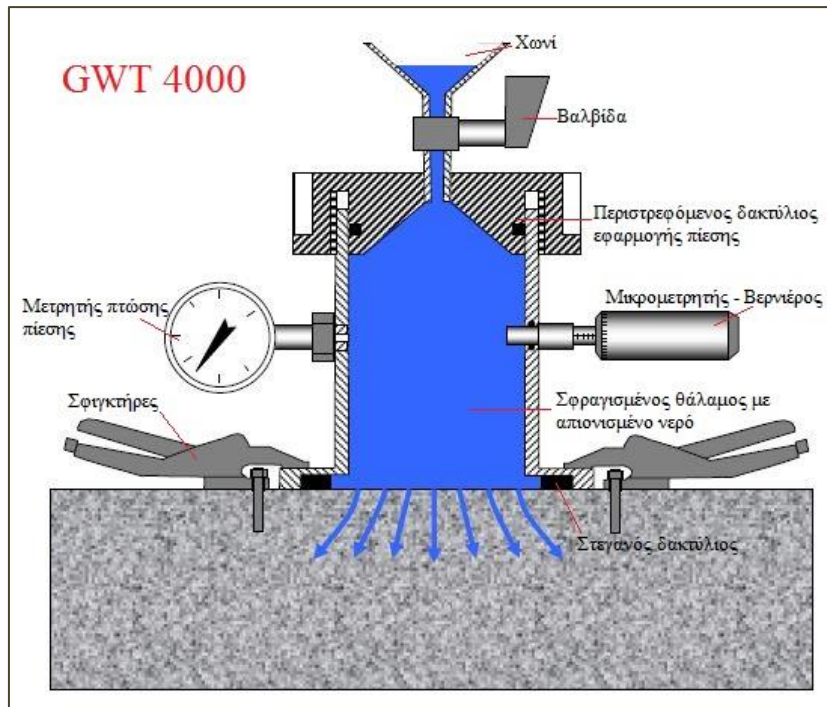
4.3.2 Προετοιμασία των δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 11 κυβικά δοκίμια (150 x 150 x 150 mm), ένα δοκίμιο για κάθε διαφορετική σύνθεση σκυροδέματος που παρασκευάστηκε (SCC – 01-SCC – 09 και NVC – 01-NVC – 02). Τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τη δεξαμενή νερού όπου συντηρούνταν και εν συνεχεία ξηράθηκαν σε φούρνο στους 91°C μέχρι σταθερού βάρους (διαφορά βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων σε 24 ± 2 h, <0,1%). Η διαδικασία της ξήρανσης των δοκιμίων διήρκησε από 10 έως 13 ημέρες, και κατόπιν σταθεροποίησης του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε η δοκιμή στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του ΕΜΠ, όπως περιγράφεται εν συνεχεία.

4.3.3 Υδατοπερατότητα με τη διάταξη GWT-4000

4.3.3.1 Πειραματική διάταξη

Για τη διεξαγωγή του πειράματος υδατοπερατότητας στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του ΕΜΠ, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Germann Water-permeation Test (GWT-4000) της Germann Instruments A/S, Copenhagen, Denmark, η οποία εφαρμόζεται επιτόπου σε επιφάνειες σκυροδέματος, είτε οριζόντιες είτε κατακόρυφες. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ύπαρξης μικρορωγμών και πόρων στην επιφανειακή ζώνη του σκυροδέματος, για ελέγχους σε σημεία συνδέσεων, καθώς και για έλεγχο της ακεραιότητας αδιάβροχων μεμβρανών (πριν και μετά την εφαρμογή της μεμβράνης) που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε μια κατασκευή. Για πλήρως κορεσμένο σκυρόδεμα χωρίς επιφανειακές ρωγμές και πόρους, η μέτρηση της υδατοπερατότητας μπορεί να επιτευχθεί χωρίς διαταραχή από τα τριχοειδή φαινόμενα. Σε επίπεδο πρακτικών ελέγχων, ωστόσο, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις επιμέρους μετρήσεις εκφράζουν ένα συνδυασμό επιρροής τριών παραγόντων: απορρόφηση, επιφανειακό πορώδες και υδατοπερατότητα. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα πρέπει να αξιολογούνται ξεχωριστά ανάλογα με τον σκοπό της δοκιμής.



Εικόνα 7: Συσκευή GWT – 4000 (German Instruments A/S, 1999).

Η συσκευή ασκεί υδραυλική πίεση στην επιφάνεια και καταγράφεται είτε (α) η πτώση πίεσης συναρτήσει του χρόνου ή (β) η επιπρόσθετη πίεση, μεταφρασμένη σε mm, που ασκούμε μέσω του μικρόμετρου, προκειμένου η πίεση στην επιφάνεια του σκυροδέματος να είναι σταθερή συναρτήσει του χρόνου. Με βάση τα αποτελέσματα μπορεί να εκτιμηθεί ποιοτικά η διαπερατότητα του σκυροδέματος. Η συσκευή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7, αποτελείται από:

- Ένα σφραγισμένο θάλαμο πίεσης που γεμίζει με απιονισμένο νερό για την αποφυγή συσσώρευσης αλάτων στα τοιχώματα της συσκευής.
- Ο σφραγισμένος θάλαμος συνδέεται με ένα κατακόρυφο αγωγό ο οποίος καταλήγει σε ένα χονί για την διευκόλυνση του γεμίσματος.
- Στο άνω μέρος του σφραγισμένου θαλάμου υπάρχει αλουμινένιο καπάκι το οποίο στρεφόμενο ωρολογιακά προσδίδει πίεση. Για μικρές πιέσεις της τάξης του 1,5 bar (150 kPa) η στροφή επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα με το χέρι. Για μεγαλύτερες πιέσεις της τάξεως των 6 bar (600 kPa) ενδείκνυται η στροφή του να γίνεται με την χρήση ειδικού κλειδιού. Το βοηθητικό κλειδί ανήκει στα παρελκόμενα της συσκευής.
- Στη μία πλευρά του σφραγισμένου θαλάμου είναι ενσωματωμένος ο Βερνιέρος-μικρόμετρο, το οποίο επιτρέπει την μέτρηση μηκών (ευθύγραμμος βερνιέρος) με μεγάλη ακρίβεια και συγκεκριμένα με ακρίβεια κλάσματος υποδιαίρεσης της κύριας κλίμακας. Η μεταβολή ένδειξης του βερνιέρου σε χιλιοστόμετρα μας δίνει την απορρόφηση νερού μέσα στην υπό μελέτη επιφάνεια που είναι και η βασική παράμετρος υπολογισμού της ταχύτητας ροής, το οποίο βέβαια στα δικά μας πειράματα δεν χρησιμοποιήθηκε.

- Η πίεση καταγράφεται από πιεσόμετρο που και αυτό είναι ενσωματωμένο με το θάλαμο. Υπάρχουν δύο πιεσόμετρα. Το ένα έχει ενδείξεις πίεσης 0-1,6 bar με υποδιαίρεση το 0,1 bar και χρησιμεύει για ακριβέστερες μετρήσεις και το άλλο έχει ενδείξεις πίεσης 0-6 bar και χρησιμεύει όταν η επιθυμητή πίεση είναι μεγαλύτερη από 1,5 bar.
- Δύο βαλβίδες που ανοίγουν και κλείνουν. Όταν τροφοδοτούμε την συσκευή με νερό, οι δύο βαλβίδες (μία στον αγωγό και μία στο πιεσόμετρο) μένουν ανοικτές. Ακολούθως κλείνουν για να ξεκινήσει η διαδικασία της δοκιμής.
- Στεγανοί δακτύλιοι από μαλακό συμπιεστό υλικό, που τοποθετούνται σε δακτυλιοειδή εσοχή στο κάτω μέρος του σφραγισμένου θαλάμου. Εμποδίζουν τις διαφυγές νερού στην επιφάνεια επαφής σκυροδέματος-συσκευής. Οι δακτύλιοι έχουν δύο διαφορετικά πάχη, 10 mm και 15 mm. Για μεγάλες πιέσεις της τάξης των 5 bar ενδείκνυται η χρήση δακτυλίου πάχους 15 mm. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που η υπό μελέτη επιφάνεια είναι έντονα ρηγματωμένη, δηλαδή κακής ποιότητας σκυρόδεμα. Σημειώνεται ότι η συνεχής χρήση των στεγανών δακτυλίων προκαλεί φθορά και παραμορφώσεις γεγονός που επιβάλλει την αντικατάστασή τους. Όταν η υπό μελέτη επιφάνεια είναι αρκετά τραχεία, συνιστάται η κόλληση του δακτυλίου πάνω στην επιφάνεια με σιλικόνη ή με ειδική κόλλα.
- Τέσσερις πλαστικές φιάλες που χρησιμεύουν για την τροφοδοσία της συσκευής με νερό.
- Χρήσιμα εργαλεία όπως τρυπάνι, σφυρί, κλειδιά (10 mm, 14 mm, 17 mm), χαλύβδινες άγκυρες, παξιμάδια και ροδέλες.
- Αδιάβροχη κολλητική ταινία για την επικάλυψη όλων των προσαρμογών της συσκευής.
- Δύο σφιγκτήρες που χρησιμεύουν για την ακλόνητη τοποθέτηση της συσκευής πάνω στην υπό μελέτη επιφάνεια, πιέζοντας τη συσκευή πάνω στην επιφάνεια έτσι ώστε να εφαρμόζει όσο το δυνατόν καλύτερα για αποφυγή διαρροών νερού.



Εικόνα 8: Πειραματική μονάδα GWT – 4000.

4.3.3.2 Πειραματική διαδικασία

Η δοκιμή υδατοπερατότητας πραγματοποιήθηκε με την καταγραφή της πτώσης της υδραυλικής πίεσης που ασκείται στο σκυρόδεμα, σε συνάρτηση με το χρόνο από την εφαρμογή της αρχικής πίεσης. Το δοκίμιο τοποθετείται πάνω στην ξύλινη βάση με τους σφιγκτήρες (Εικόνα 9). Επάνω στην συσκευή τοποθετείται το ένα από τα δυο πιεσόμετρα, ανάλογα με την επιθυμητή πίεση που θα εξασκηθεί.



Εικόνα 9: Ξύλινη βάση με σφιγκτήρες.



Εικόνα 10: Διεξαγωγή πειράματος υδατοπερατότητας.

Τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος είναι τα ακόλουθα:

Αρχικά, τοποθετείται στη βαλβίδα που βρίσκεται πάνω στη συσκευή η κούπα μέσα από την οποία διοχετεύεται το νερό στο θάλαμο της συσκευής. Στη βάση της συσκευής τοποθετείται ο δακτύλιος που προσφέρει υδατοστεγανότητα, για την αποφυγή πλευρικών διαρροών κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Η συσκευή τοποθετείται εν συνεχεία πάνω στο δοκίμιο στη θέση που θα γίνει η δοκιμή (προσπαθούμε να είναι όσο πιο κεντρικά γίνεται). Στη συνέχεια, πιέζοντας κατά το δυνατόν ταυτόχρονα τους δύο σφιγκτήρες, ασφαρίζεται η συσκευή πάνω στο δοκίμιο ώστε να υπάρξει πλήρης επαφή της συσκευής με την επιφάνεια του δοκιμίου (αυτό είναι απαραίτητη προϋπόθεση όταν χρησιμοποιούνται δακτύλιοι από αφρώδες υλικό – όπως στην περίπτωση μας – ενώ αν ο δακτύλιος είναι από σκληρό υλικό επιδιώκεται η πλήρης επαφή του δακτυλίου με το δοκίμιο).

Στη συνέχεια ανοίγουν οι δύο βαλβίδες της συσκευής και γεμίζει με νερό ο θάλαμός της με νερό που πέφτει από την κούπα. Η πλήρωση του θαλάμου με νερό δεν γίνεται απότομα, έτσι ώστε να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός αέρα μέσα στον θάλαμο. Το νερό αναδύεται από την άλλη βαλβίδα. Ύστερα, οι δυο βαλβίδες κλείνουν και δίνεται η επιθυμητή αρχική πίεση $P_0 = 1,2 \text{ bar}$ στην περίπτωση μας – γυρίζοντας το αλουμινένιο καπάκι δεξιόστροφα.

Για τα πρώτα 2,5 min γίνεται καταγραφή της πίεσης ανά 15s ενώ για το υπόλοιπο του πειράματος η καταγραφή πραγματοποιείται σε αραιότερα διαστήματα (ανά 30s, 60s, 120s, 180s) με την τελευταία μέτρηση να είναι στα 15 min. Μετά το πέρας της δοκιμής, ανοίγουν οι βαλβίδες για να εκτονωθεί η εσωτερική πίεση και να αφαιρεθεί το νερό, και εν συνεχεία απελευθερώνονται οι ξύλινοι σφιγκτήρες. Τέλος, αφαιρείται η συσκευή από το δοκίμιο, καθώς επίσης και ο δακτύλιος.

Σημειώνεται ότι, κατά τη διάρκεια της δοκιμής ο χρήστης οφείλει να ελέγχει την περιοχή του σκυροδέματος γύρω από τη θέση που είναι τοποθετημένη η συσκευή για τυχόν διαρροές του νερού. Αυτές μπορεί να οφείλονται είτε στην κακή επαφή του δοκιμίου και της συσκευής, είτε στην ύπαρξη ρωγμών και πόρων στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή δε

δύναται να εφαρμοστεί ο τύπος της ταχύτητας ροής, διότι η σχέση αυτή αναφέρεται στην ταχύτητα του νερού που διεισδύει μέσα στο σκυρόδεμα.

4.3.4 Υδατοπερατότητα κατά BS EN 12390-8:2000

4.3.4.1 Πειραματική διάταξη

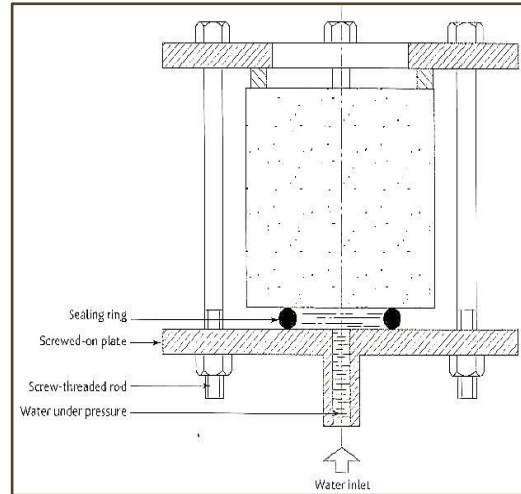
Για τη διεξαγωγή του πειράματος υδατοπερατότητας χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που είχε κατασκευαστεί στο εργαστήριο του ομίλου TITAN, και αποτελείται από τα εξής μέρη (Εικόνα 11):

- Μία κυκλική μεταλλική πλάκα, πάνω στην οποία είναι συγκολλημένες 4 μεταλλικές ράβδοι για τη στερέωση, μέσω κοχλίωσης, του άνω τμήματος της διάταξης.
- Το άνω τμήμα της διάταξης, που αποτελείται επίσης από μία κυκλική μεταλλική πλάκα, πάνω στην οποία είναι συγκολλημένος ο μεταλλικός σωλήνας, μέσα στον οποίο διοχετεύεται το νερό. Στο άνω τμήμα του σωλήνα υπάρχει η ειδική διαμόρφωση για την τοποθέτηση του αγωγού μέσω του οποίου γίνεται η εφαρμογή της επιθυμητής πίεσης.
- Πιεσόμετρο μέσω του οποίου γίνεται ο έλεγχος της εφαρμογής της επιθυμητής τιμής της πίεσης.
- Ειδικά διαμορφωμένη υποδοχή στο άνω τμήμα του μεταλλικού σωλήνα για την είσοδο του νερού.
- Αδιάβροχη κολλητική ταινία για την επικάλυψη όλων των προσαρμογών της συσκευής.

Σημειώνεται ότι η εν λόγω διάταξη ακολουθεί τις προδιαγραφές της πειραματικής διάταξης, όπως αυτή περιγράφεται στο πρότυπο BS EN 12390-8:2000, *Testing hardened concrete - Part 8: Depth of penetration of water under pressure* (BSI, 1996) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 11: Διάταξη για τον προσδιορισμό της υδατοπερατότητας.

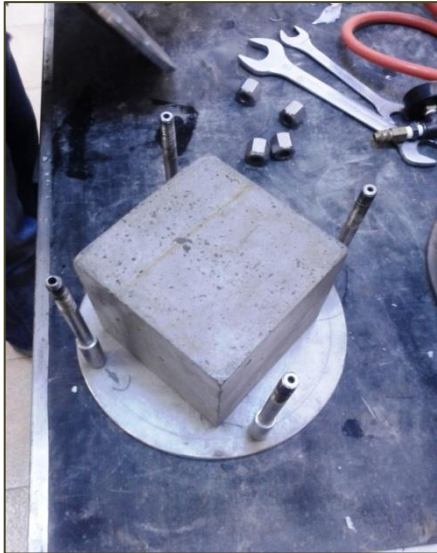


Εικόνα 12: Πειραματική διάταξη κατά BS EN 12390-8:2000 για τον προσδιορισμό της υδατοπερατότητας (Technical Report No. 31, 2008, Concrete Society).

4.3.4.2 Πειραματική διαδικασία

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εκτέλεση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια του ομίλου TITAN. Η βασική αρχή της δοκιμής είναι η εφαρμογή νερού υπό πίεση στο δοκίμιο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, και κατόπιν η διάρρηξη του δοκιμίου και ο οπτικός προσδιορισμός του βάθους της διείσδυσης του νερού. Αναλυτικά, τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος είναι τα ακόλουθα:

Αρχικά, τοποθετείται το δοκίμιο κεντρικά επάνω στην κάτω μεταλλική πλάκα της συσκευής. Η διεύθυνση δοκιμής είναι παράλληλη στη διεύθυνση χύτευσης του δοκιμίου, με φορά εφαρμογής του νερού, αντίθετη στη φορά χύτευσης. Εν συνεχεία, τοποθετείται το άνω κομμάτι της συσκευής και βιδώνεται στις τέσσερις πλευρές, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης επαφή του δοκιμίου και του δακτυλίου της συσκευής. Από την κατάλληλα διαμορφωμένη υποδοχή, εισάγεται το νερό στο σωλήνα της συσκευής και στη συνέχεια βιδώνεται το άνοιγμα με τον κατάλληλο κοχλίας. Προηγουμένως, στο σημείο όπου βιδώνει ο κοχλίας στην υποδοχή για την εισαγωγή του νερού, τοποθετείται μια στεγανοποιητική ταινία (τεφλόν) για να μην υπάρξει διαρροή νερού.



Εικόνα 13: Τοποθέτηση του δοκιμίου στη διάταξη.



Εικόνα 14: Εισαγωγή νερού στη διάταξη.

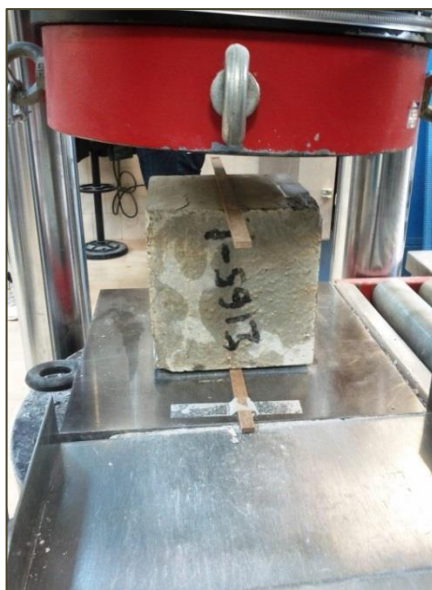
Εν συνεχεία, εφαρμόζεται η κατάλληλη πίεση, που είναι της τάξης των 500 ± 50 kPa. Η πίεση αυτή διατηρείται για χρονικό διάστημα 72 ± 2 ωρών. Μετά το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος αφαιρείται η διάταξη από το δοκίμιο οπότε και πραγματοποιείται διάρρηξη αυτού σε δύο τμήματα, κάθετα στην επιφάνεια στην οποία είχε εφαρμοστεί η πίεση. Σε κάθε ένα από τα δύο τμήματα των δοκιμίων πραγματοποιούνται μετρήσεις του βάθους της διείσδυσης του νερού, από τη μέση τιμή των οποίων προέκυπτε κάθε φορά η μέση διείσδυση του νερού (σε mm) στο εν λόγω δοκίμιο.



Εικόνα 15: Διάταξη μέτρησης της υδατοπερατότητας, πριν την εφαρμογή της πίεσης.



Εικόνα 16: Εφαρμογή πίεσης ίσης με 5 bar.



Εικόνα 17: Διάρρηξη του δοκιμίου κάθετα στη διεύθυνση στην οποία είχε εφαρμοστεί η πίεση.



Εικόνα 18: Δοκίμια μετά τη διάρρηξή τους.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι στα αποτελέσματα της εν λόγω δοκιμής ελλοχεύει αβεβαιότητα, καθώς το όριο μεταξύ του υγρού και του στεγνού τμήματος στα δύο τμήματα, μετά τη διάρρηξη του δοκιμίου, δεν είναι πάντα εύκολα και σαφώς διακριτό. Εξάλλου, και λόγω της μικρής γενικά διείσδυσης του νερού που παρατηρήθηκε στην πλειοψηφία των δοκιμίων, δεν ήταν εύκολη η μέτρηση του βάθους με επαρκή ακρίβεια.

4.4 Διαπερατότητα σε αέρα

4.4.1 Σκοπός του πειράματος

Με τη μέτρηση διαπερατότητας σε αέρα ή αέριο ουσιαστικά μετράται ο ρυθμός ροής του αερίου υπό πίεση, ο οποίος είναι ανάλογος του συντελεστή διαπερατότητας του δοκιμίου. Επομένως μέσω των πειραμάτων επιχειρείται να πραγματοποιηθεί μια εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα του σκυροδέματος, καθώς και η επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη.

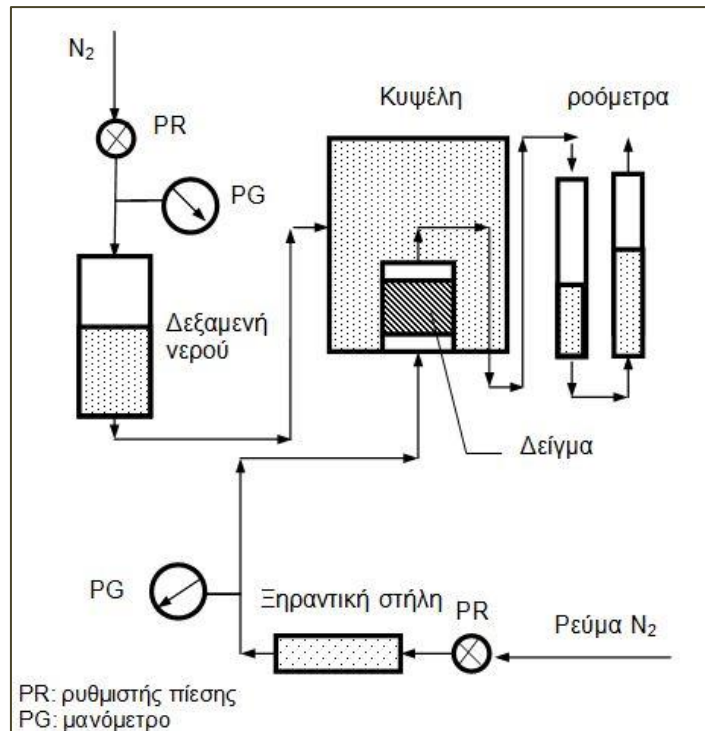
Η διεξαγωγή των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

4.4.2 Προετοιμασία των δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 11 κυλινδρικά δοκίμια, ένα δοκίμιο για κάθε διαφορετική σύνθεση σκυροδέματος που παρασκευάστηκε (SCC – 01-SCC – 09 και NVC – 01-NVC – 02). Τα δοκίμια είχαν διάμετρο 100 mm και ύψος περίπου 50 mm (κυμαινόταν από 49 mm έως 53 mm). Η ξήρανση των δοκιμίων διαδραματίζει, όπως αναφέρθηκε, ουσιώδη ρόλο στην τιμή του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα, διότι ο συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας του σκυροδέματος. Παράλληλα, πρέπει να αποφευχθεί ο σχηματισμός ρωγμών. Για το λόγο αυτό προτείνεται στη βιβλιογραφία γενικά τα δοκίμια να ξηραίνονται σε φούρνο στους 105⁰C μέχρι σταθερού βάρους (μεταβολή του βάρους του δοκιμίου εντός 24±2 h<0,1%). Η διαδικασία της ξήρανσης των δοκιμίων διήρκησε από 3 έως 5 ημέρες, και κατόπιν σταθεροποίησης του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε η δοκιμή.

4.4.3 Πειραματική διάταξη

Για τη διεξαγωγή του πειράματος της διαπερατότητας σε αέρα χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη του σχήματος που ακολουθεί:



Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση της διαπερατότητας σε αέρα (Tsivilis et al., 1999).

Η διάταξη αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Μία τροποποιημένη τριαξονική κυψέλη για δοκίμια διαμέτρου 100 mm και μέγιστη πίεση κυψέλης 1,7 N/mm². Η βάση της κυψέλης φέρει το υπόβαθρο στηρίξεως του δοκιμίου και δύο συστήματα αγωγών: το ένα σύστημα καταλήγει στο υπόβαθρο, καθώς και στην πλάκα που τοποθετείται πάνω από το δοκίμιο, έτσι ώστε να δημιουργείται το σύστημα εισόδου και εξόδου του αερίου (υπό πίεση) μέσα από το δοκίμιο, ενώ το δεύτερο (στη βάση της κυψέλης) χρησιμεύει για την πλήρωση της κυψέλης με νερό με τη βοήθεια ρυθμιστικών βαλβίδων (πλήρωση της κυψέλης με νερό με φορά από κάτω προς τα πάνω) (Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Βάση της τριαξονικής κυψέλης και ελαστικοί δακτύλιοι.

- Έναν ελαστικό σωλήνα από καουτσούκ, για την πλευρική μόνωση του δοκιμίου του σκυροδέματος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εγκάρσια ροή του αερίου και η στεγανοποίηση από το νερό της κυψέλης.
- Τέσσερις ελαστικούς δακτυλίους, οι οποίοι συνεισφέρουν στη στεγανοποίηση μέσω του ελαστικού σωλήνα γύρω από το δοκίμιο και τους πορόλιθους (Εικόνα 19).
- Το περίβλημα της κυψέλης, που αποτελείται από διαφανές και ανθεκτικό υλικό (Εικόνα 20). Στο περίβλημα υπάρχουν 3 κατακόρυφοι κοχλίες ασφαλείας που βιδώνονται για την πλήρη στεγανοποίηση της κυψέλης, ενώ στο άνω μέρος υπάρχει και ειδική οπή με βαλβίδα, για την εκτόνωση της πίεσεως μετά από τη δοκιμή.



Εικόνα 20: Περίβλημα της τριαξονικής κυψέλης.

- Δύο φιάλες αερίου (N_2), η πρώτη για την εφαρμογή της πίεσης στην κυψέλη και συνεπώς ανάλογης πλευρικής υδραυλικής στο δοκίμιο και η δεύτερη για την εισαγωγή του αερίου υπό πίεση, εγκάρσια στο δοκίμιο του σκυροδέματος (Εικόνα 21).



Εικόνα 21: Φιάλες N_2 .

- Δύο πορόλιθους διαμέτρου 100 mm και ύψους περίπου 150 mm, οι οποίοι τοποθετούνται εκατέρωθεν του δοκιμίου.
- Ένα εξωτερικό δίκτυο αγωγών για την τροφοδότηση της κυψέλης με νερό, καθώς και για την εισαγωγή του αερίου υπό πίεση.
- Μανόμετρα μέσω των οποίων γίνεται ο έλεγχος και η εφαρμογή των επιθυμητών τιμών των πιέσεων.
- Πλαστική λεκάνη, ογκομετρικοί σωλήνες και χρονόμετρο για τη μέτρηση της ροής του αερίου, μέσω της πτώσης της στάθμης του νερού εντός του ογκομετρικού σωλήνα, σε σχέση με το χρόνο.

4.4.4 Πειραματική διαδικασία

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εκτέλεση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών- ΕΜΠ. Για τη μέτρηση της διαπερατότητας σε αέρα (N_2), μετρήθηκε ο ρυθμός της ροής του αζώτου υπό πίεση, εγκάρσια στο δοκίμιο του σκυροδέματος, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μέτρησης. Αναλυτικά, τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος είναι τα ακόλουθα:

Αρχικά, τοποθετείται ο ελαστικός σωλήνας από καουτσούκ ώστε να εφαρμόζει ακριβώς στο υπόβαθρο στήριξης του δοκιμίου (που έχει διάμετρο επίσης 100 mm), και εν συνεχεία τοποθετούνται οι δύο από τους τέσσερις ελαστικούς δακτυλίους για τη στεγανοποίησή του (Εικόνα 22). Ακολουθεί κατά σειρά η τοποθέτηση του ενός πορόλιθου εντός του ελαστικού σωλήνα, του δοκιμίου σκυροδέματος το οποίο εξετάζεται, του δεύτερου πορόλιθου πάνω από το δοκίμιο σκυροδέματος και πάνω από αυτόν εφαρμόζεται τελικά η άνω μεταλλική πλάκα της συσκευής. Σημειώνεται ότι θα πρέπει να ελέγχεται κατά την τοποθέτηση των επιμέρους αυτών στοιχείων ότι υπάρχει πλήρης εφαρμογή σε όλα τα σημεία, και ότι δε δημιουργούνται ασυνέχειες του μέσου κατά τη μεταφορά του αερίου, που θα επηρεάσουν τη μέτρηση. Κατόπιν, τοποθετούνται και οι επόμενοι δύο ελαστικοί δακτύλιοι γύρω από το σωλήνα από καουτσούκ, στο ύψος της άνω μεταλλικής πλάκας της συσκευής (Εικόνα 23). Στο σημείο αυτό χρειάζεται προσοχή, έτσι ώστε οι άνω δύο ελαστικοί δακτύλιοι να μην τοποθετηθούν στο διάστημα μεταξύ της άνω μεταλλικής πλάκας και του άνω πορόλιθου, καθώς ενδέχεται σε αυτήν την περίπτωση να δημιουργηθεί κενό.



Εικόνα 22: Τοποθέτηση του ελαστικού σωλήνα από καουτσούκ και των κάτω 2 ελαστικών δακτυλίων.



Εικόνα 23: Τοποθέτηση πορόλιθων, δοκιμίου, μεταλλικής πλάκας και των άνω 2 ελαστικών δακτυλίων.

Στη συνέχεια τοποθετείται και ασφαρίζεται το περίβλημα της κυψέλης, αφού έχουν πρώτα καθαριστεί με ένα χαρτί οι επιφάνειες επαφής του περιβλήματος και της βάσης της κυψέλης, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν σκόνες (Εικόνα 24).



Εικόνα 24: Τοποθέτηση του περιβλήματος της κυψέλης.

Με ανοιχτή τη βαλβίδα του αγωγού πληρώσεως, γεμίζουμε την κυψέλη με νερό κρατώντας ανοιχτή τη βαλβίδα εξαερώσεως για το διάστημα που διαρκεί η ροή του νερού. Αφού κλείσουμε τις βαλβίδες που σχετίζονται με την είσοδο του νερού της κυψέλης, ανοίγουμε τις αντίστοιχες που σχετίζονται με το κύκλωμα εφαρμογής πλευρικής πίεσης. Η τροφοδοσία νερού σε αυτό το κύκλωμα γίνεται από κάτω προς τα πάνω, αντίστροφα με τη ροή του αερίου. Ανοίγουμε στη συνέχεια η φιάλη του αερίου, έτσι ώστε να προσδώσουμε την κατάλληλη πίεση στην τριαξονική κυψέλη. Η τιμή της πίεσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 11 bar, και η οποία εφαρμόστηκε σταδιακά. Η διαδικασία

εφαρμογής της πίεσης αυτής, χρειαζόταν κατά μέσο όρο να επαναληφθεί 3 φορές (εφαρμογή πίεσης και ακολούθως εκτόνωση μόνο στο κύκλωμα τροφοδοσίας της κυψέλης και πριν από αυτή), έτσι ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας που είχε εγκλωβιστεί στο εξωτερικό σύστημα αγωγών κατά τη διάρκεια πλήρωσης της τριαξονικής κυψέλης και να εξασφαλιστεί η συνέχεια του μέσου. Αφού εφαρμοστεί επιτυχώς η πίεση των 11 bar, η διάταξη είναι έτοιμη για την εκκίνηση του πειράματος.

Ανοίγουμε τη δεύτερη φιάλη του αερίου, η οποία συνδέεται με το σύστημα εισόδου και εξόδου του αερίου υπό πίεση μέσα από το δοκίμιο, καθώς και τη βαλβίδα του αερίου στη βάση της κυψέλης. Κατόπιν, εφαρμόζουμε σταδιακά τις επιθυμητές τιμές της πίεσης. Για κάθε επιμέρους τιμή της πίεσης, τοποθετούμε το σωληνάκι που συνδέεται με τη βαλβίδα του αερίου στη βάση της κυψέλης μέσα στην πλαστική λεκάνη με το νερό (Εικόνα 25). Αφού σταθεροποιηθεί η ταχύτητα ροής του αερίου μέσα από το δοκίμιο, τοποθετούμε το σωληνάκι μέσα στον ογκομετρικό σωλήνα, και μετράμε με το χρονόμετρο την πτώση της στάθμης του νερού εντός του ογκομετρικού συναρτήσει του χρόνου.



Εικόνα 25: Διάταξη για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

Μετά το πέρας της δοκιμής, αποσυμπιέζουμε την κυψέλη, αδειάζουμε το νερό και αφού ξεβιδώσουμε το περίβλημα της κυψέλης, αφαιρούμε προσεκτικά τον ελαστικό σωλήνα από καουτσούκ, την άνω μεταλλική πλάκα, τους πορόλιθους και τέλος το δοκίμιο. Ελέγχουμε αν είναι στεγνή η επιφάνεια του δοκιμίου, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι δεν υπήρξαν προβλήματα στεγανότητας κατά της διάρκεια της δοκιμής.

Τέλος, σημειώνεται ότι οι επιφάνειες του δοκιμίου που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας σε αέρα, πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους και να μην έχουν προεξοχές ή κλίση (έστω και αν αυτή είναι αρκετά μικρή), διότι ενδέχεται να επηρεαστούν σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

4.5 Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής

4.5.1 Σκοπός του πειράματος

Στόχος του πειράματος ήταν να προσδιοριστεί η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων του σκυροδέματος, και πιο συγκεκριμένα η επίδραση της χρήσης του μετακαολίνης στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, καθώς και η συσχέτιση αυτής με το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων).

4.5.2 Προετοιμασία των δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 33 κυβικά δοκίμια, 3 δοκίμια για κάθε διαφορετική σύνθεση σκυροδέματος που παρασκευάστηκε (SCC – 01-SCC – 09 και NVC – 01-NVC – 02), διαστάσεων 100 x 100 x 100 mm. Για τον προσδιορισμό της τελικής τιμής της θλιπτικής αντοχής, χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των τριών επιμέρους τιμών αντοχής που προέκυψαν. Τα δοκίμια, αφού αφαιρέθηκαν από τη δεξαμενή νερού όπου συντηρούνταν, ξηράνθηκαν σε φούρνο στους 91^oC μέχρι σταθερού βάρους (διαφορά βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων σε 24 ±2 h, <0,1%). Η διαδικασία της ξήρανσης των δοκιμίων διήρκησε από 6 έως 8 ημέρες, και κατόπιν σταθεροποιήσεως του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε η δοκιμή όπως περιγράφεται εν συνεχεία.



Εικόνα 26: Δοκίμια για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής.

4.5.3 Πειραματική διαδικασία

Οι δοκιμές θλίψης διεξήχθησαν στο εργαστήριο ελέγχου ποιότητας σκυροδέματος της εταιρίας TITAN A.E..

Η συσκευή για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής αποτελείται από δύο πλάκες φορτίσεως, εκ των οποίων η άνω διαθέτει σφαιρική άρθρωση. Οι επιφάνειες των πλακών φορτίσεως είναι κατάλληλα κατεργασμένες ώστε να είναι επίπεδες και έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από τις

επιφάνειες των μητρών, επί των οποίων εφαρμόζεται το φορτίο. Προσοχή απαιτείται κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων επάνω στην πλάκα φορτίσεως, έτσι ώστε να τοποθετείται κατά το δυνατό κεντρικά και συμμετρικά. Η ταχύτητα φορτίσεως καθορίζεται ανάλογα με τις διαστάσεις του δοκιμίου και για κυβικά δοκίμια διαστάσεων 100 x 100 x 100 mm, η απαιτούμενη ταχύτητα ισούται με 2,5 kN/sec.

Ως γνωστόν, η αντοχή σε θλίψη δίδεται από τη σχέση: $f_c = F/A_c$, σε MPa (N/mm²), όπου:

F = το μέγιστο φορτίο (N) που καταγράφεται κατά τη θραύση (φορτίο θραύσης) τριών δοκιμίων

A_c = το εμβαδόν της επιφάνειας επί της οποίας ασκείται η δύναμη θλίψεως



Εικόνα 27: Θραύση δοκιμίου Σ161.



Εικόνα 28: Τυπική μορφή θραύσης δοκιμίου σε θλίψη.



Εικόνα 29: Θραύση δοκιμίου Σ165.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

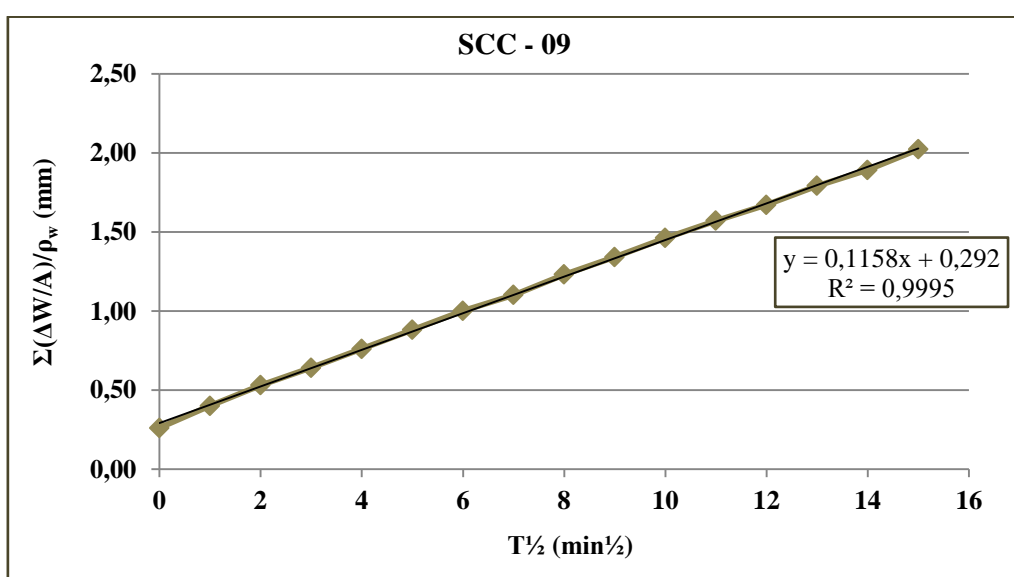
5.1 Τριχοειδής απορρόφηση (S)

Στον Πίνακα 4 δίνεται ενδεικτικά η τεχνική αναφορά που αναφέρεται στη μέτρηση τριχοειδούς απορρόφησης του δοκιμίου της σύνθεσης Σ169 (SCC - 09), παρουσιάζοντας τα πρωτογενή δεδομένα, αλλά και την υπολογισθείσα απορρόφηση νερού. Η στήλη $S (\Delta W/A)/\rho_w$ αποτελεί την αθροιστική διαφορά δύο διαδοχικών καταγραφών $\Delta W = W_i - W_{i-1}$ προς την επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το νερό (A), διαιρεμένη με το ειδικό βάρος του νερού $\rho_w = 0,998 \text{ gr/mm}^3$. Σε κάθε νέα γραμμή της στήλης προστίθεται και η προηγούμενη τιμή. Ουσιαστικά με αυτό τον τρόπο προκύπτει η συνολική (αθροιστική) απορρόφηση του νερού από το δοκίμιο στον αντίστοιχο χρόνο, εκφρασμένη σε μονάδες μήκους.

Πίνακας 4: Τεχνική αναφορά δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης για τη σύνθεση SCC – 09.

ΤΡΙΧΟΕΙΔΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ	Αριθμός δοκιμίου		Σ169		
	Σύνθεση		SCC - 09		
	Ημερομηνία διεξαγωγής πειράματος		01/04/2013		
A/A ΜΕΤΡΗΣΗΣ	T (h)	T (min)	$T^{1/2}$ ($\text{min}^{1/2}$)	Βάρος W (gr)	$\Sigma(\Delta W/A)/\rho_w$ (mm)
1	0:00	0	0	2163,1	
2	0:01	1	1	2165,7	0,26
3	0:04	4	2	2167,1	0,40
4	0:09	9	3	2168,4	0,53
5	0:16	16	4	2169,5	0,64
6	0:25	25	5	2170,7	0,76
7	0:36	36	6	2171,9	0,88
8	0:49	49	7	2173,1	1,00
9	1:04	64	8	2174,1	1,10
10	1:21	81	9	2175,4	1,23
11	1:40	100	10	2176,5	1,34
12	2:01	121	11	2177,7	1,46
13	2:24	144	12	2178,8	1,57
14	2:49	169	13	2179,8	1,67
15	3:16	196	14	2181,0	1,79
16	3:45	225	15	2182,0	1,89
17	4:16	256	16	2183,3	2,02

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα κατασκευάστηκαν επιμέρους διαγράμματα αθροιστικού όγκου του νερού που απορροφάται ανά μονάδα εμβαδού επιφάνειας, (i), σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου $T^{1/2}$. Από τα διαγράμματα έγινε εμφανές, ότι τα αποτελέσματα μπορούν με πολύ καλή ακρίβεια να αποτελέσουν σημεία γραμμικής καμπύλης της μορφής $y = a \cdot x + b$, όπου $y = \Sigma (\Delta W/A)/\rho_w$ και $x = T^{1/2}$, καθώς οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης παρουσιάζουν τιμές 0,9939 - 0,9999. Από την κλίση της καμπύλης μπορεί να προσδιοριστεί η τριχοειδής απορρόφηση (S). Ενδεικτικά, ακολουθεί το διάγραμμα προσρόφησης νερού συναρτήσει της ρίζας του χρόνου για τη σύνθεση SCC - 09.



Σχήμα 8: Διάγραμμα προσρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου $T^{1/2}$ για τη σύνθεση SCC - 09.

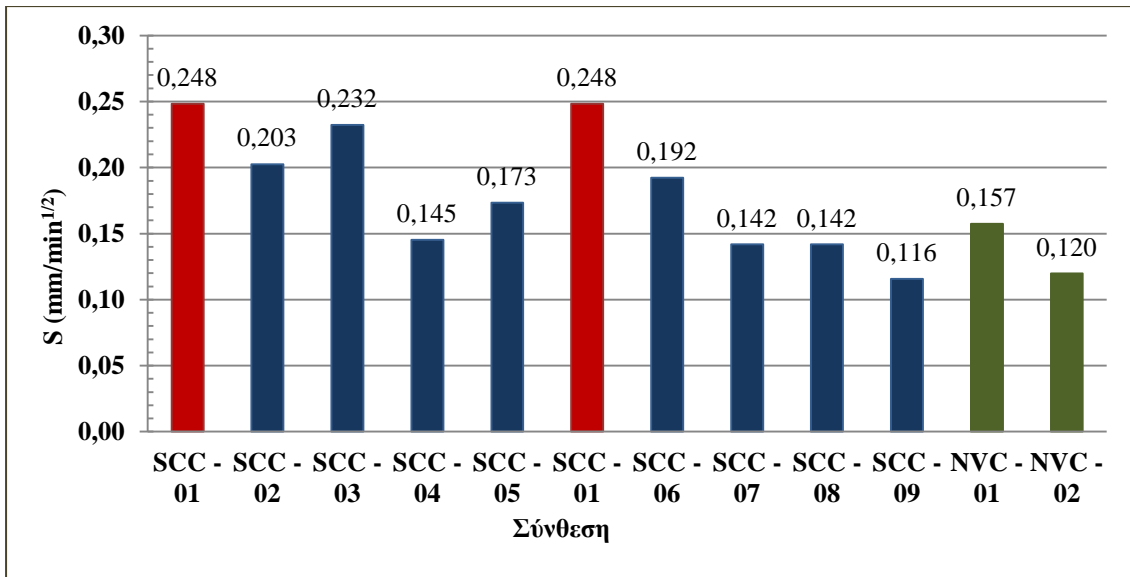
Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, προσδιορίστηκε η τριχοειδής απορρόφηση (S) για όλες τις επιμέρους συνθέσεις. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων της τριχοειδούς απορρόφησης, ανάλογα με την ομάδα σύνθεσης και το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλτερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης για όλες τις συνθέσεις.

Χαρακτηριστικά Σύνθεσης						
Σύνθεση			(%) προσθήκης MK		Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min ^{1/2})	Ποσοστό μεταβολής S ως προς το αμιγές (SCC – 01) %
	Σ170	SCC - 01	0,00	0,00	0,248	0,00
1η Ομάδα	Σ161	SCC - 02	6,86	-	0,203	-18,41
	Σ164	SCC - 03	10,57	-	0,232	-6,41
	Σ163	SCC - 04	14,00	-	0,145	-41,44
	Σ165	SCC - 05	20,00	-	0,173	-30,14
2η Ομάδα	Σ166	SCC - 06	-	13,71	0,192	-22,50
	Σ168	SCC - 07	-	21,10	0,142	-42,81
	Σ167	SCC - 08	-	28,00	0,142	-42,87
	Σ169	SCC - 09	-	40,00	0,116	-53,36
	Σ171	NVC - 01	0,00	0,00	0,157	-
	Σ172	NVC - 02	0,00	0,00	0,112	-

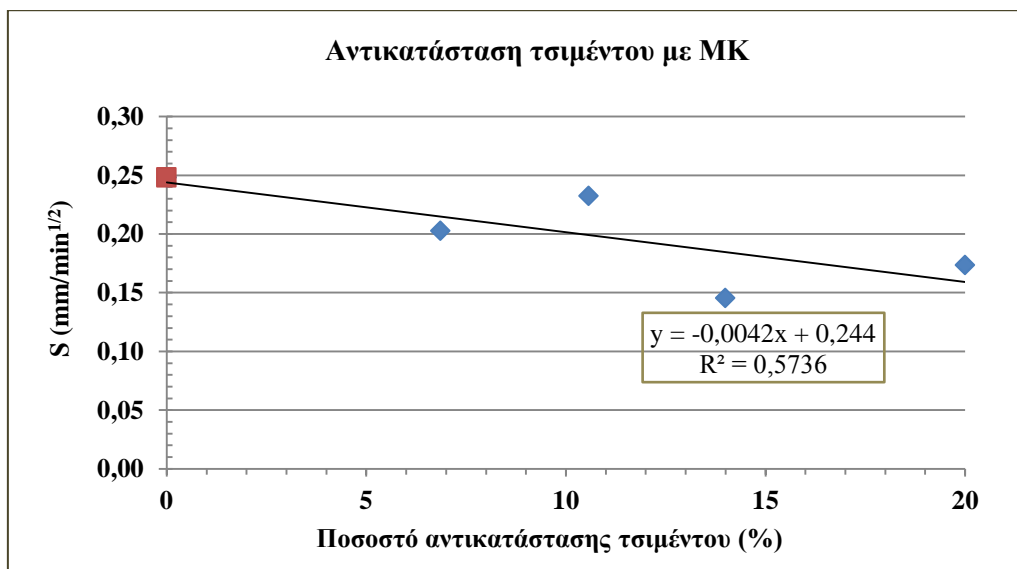
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 9 που ακολουθεί, η προσθήκη μετακαολίνη στα μίγματα του ΑΣΣ μειώνει σημαντικά την τριχοειδή απορρόφηση, συνεπώς και την υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος. Παρατηρείται ελάχιστη τιμή τριχοειδούς απορρόφησης ίση με 0,116 mm/min^{1/2} για το μίγμα SCC - 09 (μείωση κατά 53,36% σε σχέση με τη σύνθεση SCC – 01), ενώ η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται στη σύνθεση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος χωρίς την προσθήκη μετακαολίνη SCC – 01 (αμιγές), και ισούται με 0,248 mm/min^{1/2}. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη (2^η ομάδα συνθέσεων) φαίνεται να συμβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό στη μείωση της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος συγκρινόμενη με την αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη (1^η ομάδα συνθέσεων), δίδοντας γενικά μικρότερες τιμές τριχοειδούς απορρόφησης.

Ενδεικτικά δίνεται και η απορροφητικότητα των μιγμάτων ΣΣ (NVC – 01 και NVC – 02), η οποία για τη σύνθεση NVC – 01 ανέρχεται σε 0,157 mm/min^{1/2}, ενώ για τη σύνθεση NVC – 02 ανέρχεται σε 0,112 mm/min^{1/2}.

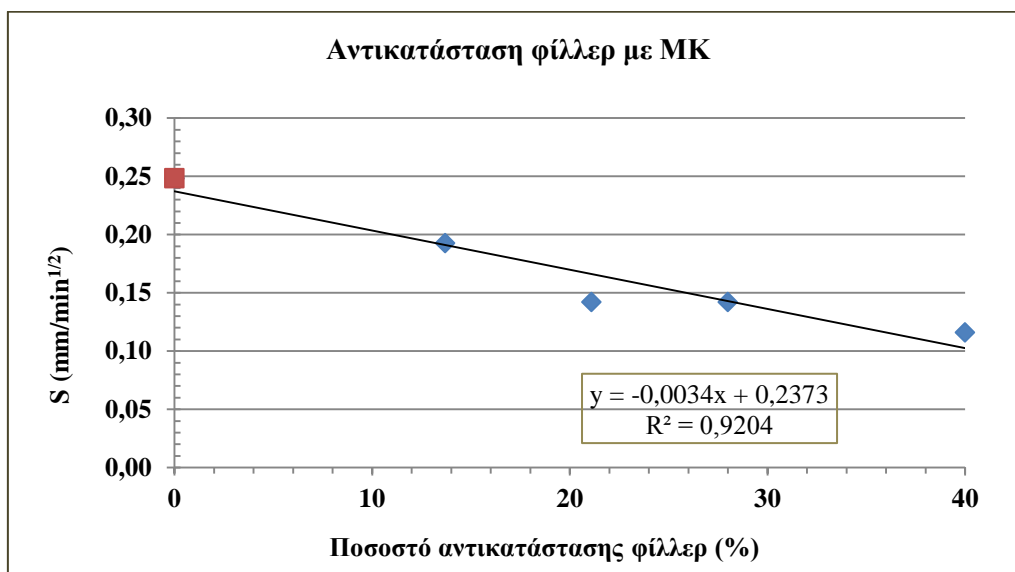


Σχήμα 9: Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min^{1/2}), ανά σύνθεση.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα επιμέρους διαγράμματα της τριχοειδούς απορρόφησης ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) και ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων), προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση της προσθήκης μετακαολίνη για κάθε ομάδα σύνθεσης, και ειδικότερα ο τρόπος με τον οποίο η μεταβολή του ποσοστού αντικατάστασης επηρεάζει τη μεταβολή της ιδιότητας της τριχοειδούς απορρόφησης στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 10: Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min^{1/2}) ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem).



Σχήμα 11: Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min^{1/2}) ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φύλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20).

Από τα σχήματα Σχήμα 10 και Σχήμα 11, φαίνεται πως η προσθήκη μετακαολίνη μειώνει δραστικά την τριχοειδή απορρόφηση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης, διακρίνεται εν γένει μια πτωτική τάση στην τιμή της τριχοειδούς απορρόφησης. Στις συνθέσεις, όπου έγινε αντικατάσταση του φύλλερ με μετακαολίνη, η τάση αυτή είναι σχεδόν γραμμική ($R^2=0.9204$). Η βέλτιστη τιμή τριχοειδούς απορρόφησης παρατηρείται για το μεγαλύτερο ποσοστό αντικατάστασης του φύλλερ που εξετάστηκε (ίσο με 40%). Αντιθέτως, στις συνθέσεις όπου έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη, η τάση αυτή δεν είναι τόσο ξεκάθαρη, ωστόσο μπορεί να θεωρηθεί γενικά πτωτική. Στην περίπτωση αυτή, η βέλτιστη συμπεριφορά του σκυροδέματος έναντι της τριχοειδούς απορρόφησης, παρατηρείται για ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη ίσο με 14%.

5.2 Ανοικτό πορώδες (OP)

Ο προσδιορισμός του ανοικτού πορώδους για κάθε σύνθεση έγινε σύμφωνα με την παράγραφο 4.2.4 -Υπολογισμός πορώδους.

Αρχικά, ο προσδιορισμός έγινε για τα 11 κυβικά δοκίμια (SCC – 01-SCC – 09 και NVC – 01-NVC – 02), που χρησιμοποιήθηκαν και για τον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης (§ 4.2.2). Εν συνεχεία, προκειμένου στατιστικά να επιτευχθεί ακριβέστερος προσδιορισμός του ανοικτού πορώδους, χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο δείγμα δοκιμίων και πραγματοποιήθηκε επανάληψη της διαδικασίας προσδιορισμού του ανοικτού πορώδους σε σύνολο 44 δοκιμίων, όπου εξετάστηκαν 4

δοκίμια για κάθε σύνθεση που μελετάται. Η τελική τιμή του ανοικτού πορώδους προσδιορίστηκε από τη μέση τιμή των παραπάνω επιμέρους τιμών.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού του ανοικτού πορώδους ως μέση τιμή 4 δοκιμίων ανά σύνθεση, ανάλογα με την ομάδα σύνθεσης και το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα ανοικτού πορώδους για όλες τις συνθέσεις.

Χαρακτηριστικά Σύνθεσης					
Σύνθεση		(% προσθήκης ΜΚ		Ανοικτό πορώδες [Μ.Ο. 4 δοκιμίων] %	
		% mk/cem (κ.β.)	% mk/lp20 (κ.β.)		
	Σ170	SCC - 01	0,00	0,00	15,36
1η Ομάδα	Σ161	SCC - 02	6,86	-	16,76
	Σ164	SCC - 03	10,57	-	16,86
	Σ163	SCC - 04	14,00	-	16,56
	Σ165	SCC - 05	20,00	-	17,17
2η Ομάδα	Σ166	SCC - 06	-	13,71	16,39
	Σ168	SCC - 07	-	21,10	16,33
	Σ167	SCC - 08	-	28,00	16,28
	Σ169	SCC - 09	-	40,00	16,87
	Σ171	NVC - 01	0,00	0,00	15,95
	Σ172	NVC - 02	0,00	0,00	15,34

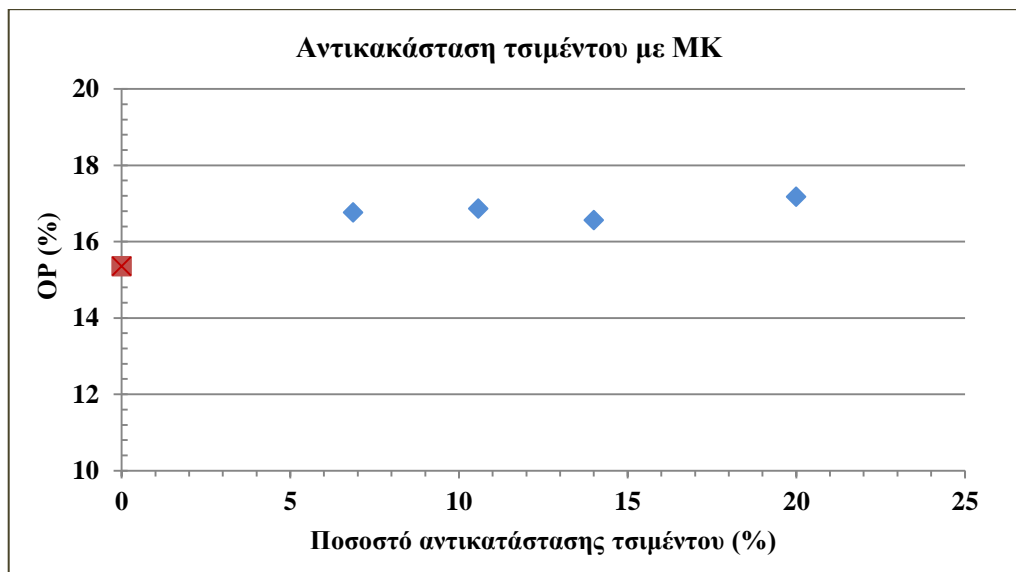
Παρατηρείται ότι η προσθήκη μετακαολίνη στα μίγματα του ΑΣΣ δεν έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση του ανοικτού πορώδους, καθώς όλες οι τιμές του ανοικτού πορώδους που προέκυψαν είτε από τον αρχικό υπολογισμό, είτε από την επανάληψη της δοκιμής, όπου ελήφθη ο μέσος όρος 4 δοκιμίων για κάθε σύνθεση, είναι περίπου ίσες ή μεγαλύτερες από την τιμή του ανοικτού πορώδους για το μίγμα ΑΣΣ χωρίς μετακαολίνη (σύνθεση SCC – 01). Για τα μίγματα που έχει γίνει προσθήκη μετακαολίνη, η ελάχιστη τιμή για το ανοικτό πορώδες παρατηρείται στη σύνθεση SCC – 08, δηλαδή για ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ με μετακαολίνη ίσο με 28%.

Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις δύο ομάδες συνθέσεων, παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη (2^η ομάδα συνθέσεων) φαίνεται να οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές του ανοικτού

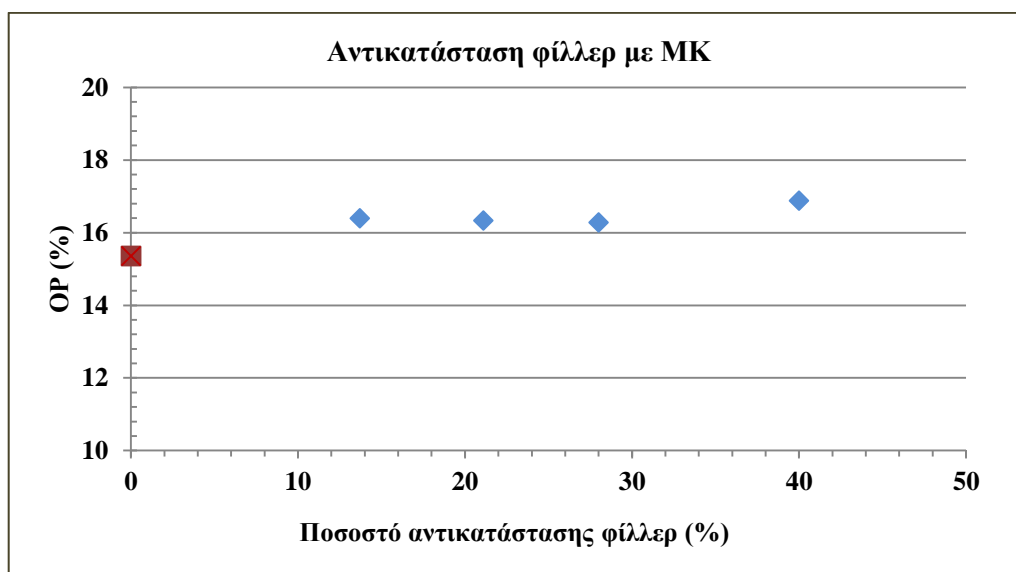
πορώδους του σκυροδέματος συγκρινόμενη με την αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη (1^η ομάδα συνθέσεων), αν και οι διαφορές που παρατηρούνται μπορούν να θεωρηθούν αρκετά μικρές.

Τέλος, δίνεται ενδεικτικά και το ανοικτό πορώδες των μιγμάτων ΣΣ (NVC – 01 και NVC – 02), το οποία για τη σύνθεση NVC – 01 ανέρχεται σε 15,95% ενώ για τη σύνθεση NVC – 02 ανέρχεται σε 15,34%.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα επιμέρους διαγράμματα του ανοικτού πορώδους ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) και ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων).



Σχήμα 12: Πορώδες (%), ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem).



Σχήμα 13: Πορώδες (%), ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20).

Παρατηρώντας και τα δύο διαγράμματα, επιβεβαιώνεται ότι η προσθήκη μετακαολίνη δε φαίνεται να μεταβάλλει ουσιαστικά το ανοικτό πορώδες, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι παραμένει πρακτικά αμετάβλητο.

Πιο αναλυτικά, από το διάγραμμα του ανοικτού πορώδους συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης του φίλτερ με μετακαολίνη, παρατηρούμε ότι η προσθήκη μετακαολίνη δεν οδηγεί εν γένει σε μείωση του πορώδους. Για ποσοστό αντικατάστασης μεγαλύτερο από 13,71%, παρατηρείται σταδιακή μείωση του πορώδους, ενώ για το ποσοστό αντικατάστασης 40%, παρατηρείται ξανά αύξηση του ανοικτού πορώδους, η οποία ωστόσο είναι πολύ μικρή. Η βέλτιστη τιμή του ανοικτού πορώδους για τα μίγματα με μετακαολίνη σημειώθηκε για ποσοστό αντικατάστασης φίλτερ με μετακαολίνη ίσο με 28%.

Παρόμοια τάση για το ανοικτό πορώδες μπορούμε να παρατηρηθεί και στο διάγραμμα του ανοικτού πορώδους, συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου.

5.3 Υδατοπερατότητα με τη διάταξη GWT – 4000 (w_{p120})

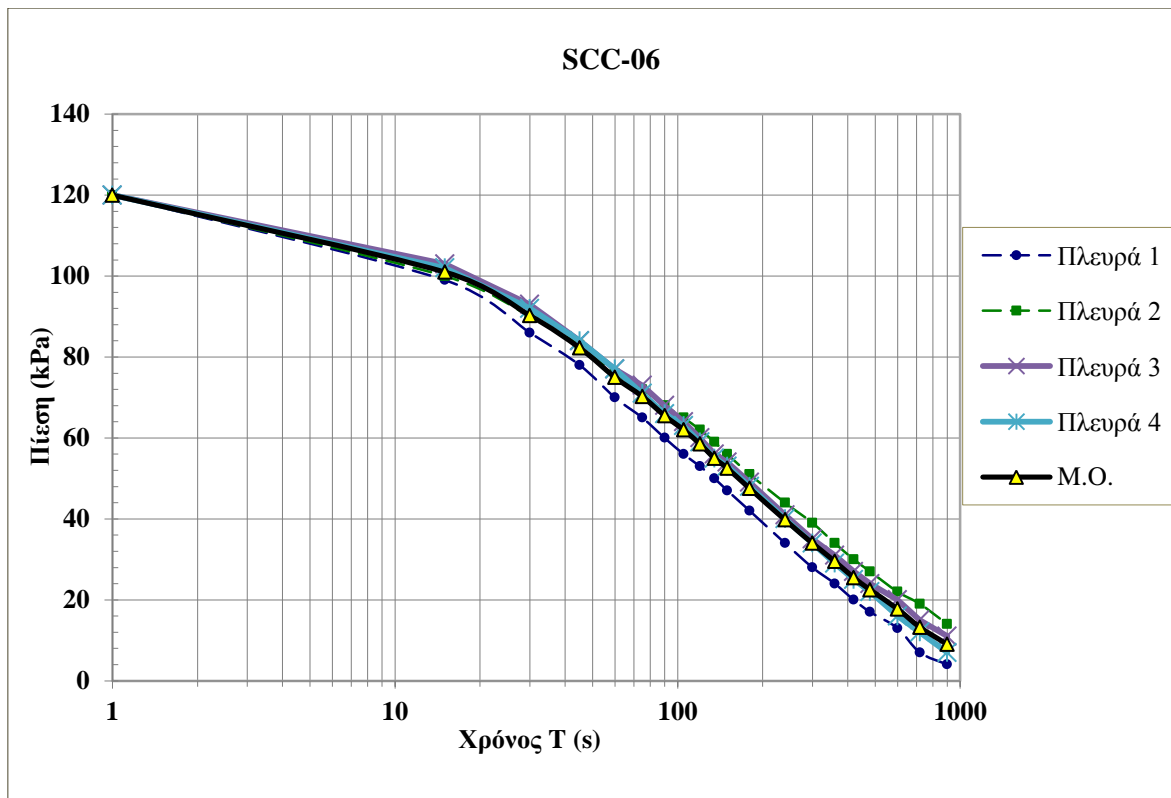
Η δοκιμή υδατοπερατότητας πραγματοποιήθηκε, σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (§ 4.3.3), σε δύο τουλάχιστον πλευρές κάθε δοκιμίου. Σε κάθε δοκίμιο υπολογίστηκε ο μέσος όρος των καταγραφών των επιμέρους πιέσεων που μετρήθηκαν.

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζεται ενδεικτικά η τεχνική αναφορά που αναφέρεται στη μέτρηση της υδατοπερατότητας του δοκιμίου της σύνθεσης Σ166 (SCC - 06), παρουσιάζοντας τα πρωτογενή αποτελέσματα των μετρήσεων (χρόνος και πιέσεις για κάθε πλευρά που εξετάστηκε), καθώς και τις στήλες $\ln T$, $T^{2/3}$ και P/P_0 ως παράμετροι υπολογισμού και αναλύσεως. Ομοίως έχουν συνταχθεί οι τεχνικές αναφορές και για τα υπόλοιπα δοκίμια που εξετάστηκαν.

Πίνακας 7: Ενδεικτική τεχνική αναφορά δοκιμής υδατοπερατότητας wP_{120} , για τη σύνθεση SCC-06.

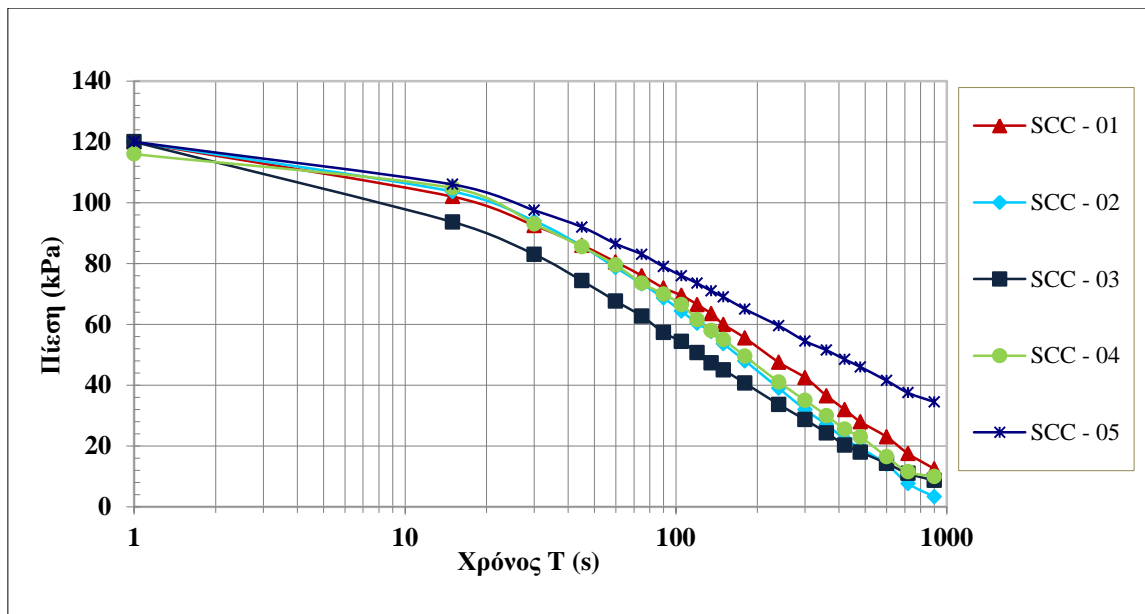
Σύνθεση - Κωδικός δοκιμίου	SCC-06 (Σ166)								
Ημερομηνία μέτρησης	29/4/2013								
Μέθοδος συντήρησης	Δεξαμενή νερού								
A/A ΜΕΤΡΗΣΗΣ	T (s)	Πίεση P (kPa)					lnT	T ^{2/3}	P/Po
		1	2	3	4	M.O.			
1	1	120	120	120	120	120,0	0,00	1,00	1,00
2	15	99	100	103	102	101,0	2,71	6,08	0,84
3	30	86	90	93	92	90,3	3,40	9,65	0,75
4	45	78	83	84	84	82,3	3,81	12,65	0,69
5	60	70	76	77	77	75,0	4,09	15,33	0,63
6	75	65	72	73	71	70,3	4,32	17,78	0,59
7	90	60	68	68	66	65,5	4,50	20,08	0,55
8	105	56	65	64	63	62,0	4,65	22,26	0,52
9	120	53	62	60	59	58,5	4,79	24,33	0,49
10	135	50	59	56	55	55,0	4,91	26,32	0,46
11	150	47	56	54	53	52,5	5,01	28,23	0,44
12	180	42	51	49	48	47,5	5,19	31,88	0,40
13	240	34	44	41	40	39,8	5,48	38,62	0,33
14	300	28	39	35	34	34,0	5,70	44,81	0,28
15	360	24	34	31	29	29,5	5,89	50,61	0,25
16	420	20	30	27	25	25,5	6,04	56,08	0,21
17	480	17	27	24	22	22,5	6,17	61,30	0,19
18	600	13	22	20	16	17,8	6,40	71,14	0,15
19	720	7	19	15	12	13,3	6,58	80,33	0,11
20	900	4	14	11	7	9,0	6,80	93,22	0,08

Από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα κατασκευάζεται το διάγραμμα μεταβολής της πίεσης συναρτήσει του διαρρέοντος χρόνου από την επιβολή της αρχικής πίεσης $P_0=120$ kPa, σε λογαριθμική κλίμακα.

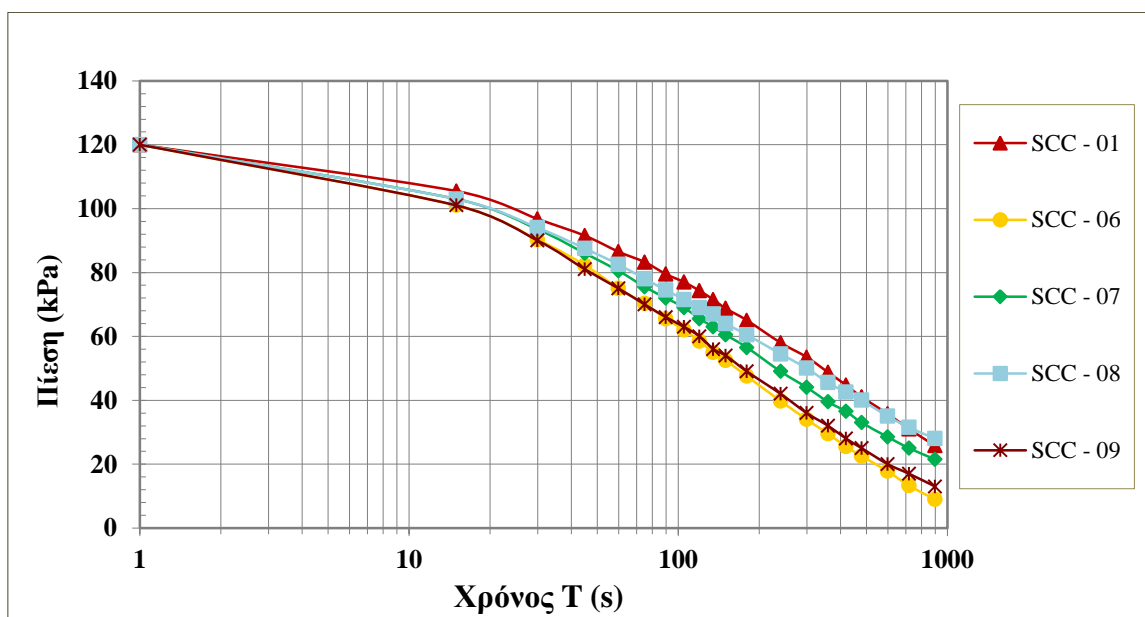


Σχήμα 14: Μεταβολή αρχικά εφαρμοσμένης πίεσης ($P_0=120\text{kPa}$) σε συνάρτηση με το χρόνο για την σύνθεση SCC – 06.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις συνθέσεις, οπότε από το μέσο όρο των καταγραφών των πιέσεων για κάθε δοκίμιο, προκύπτουν τα σχήματα Σχήμα 15 και 16, που παρουσιάζουν την πτώση πίεσης για κάθε ομάδα σύνθεσης.



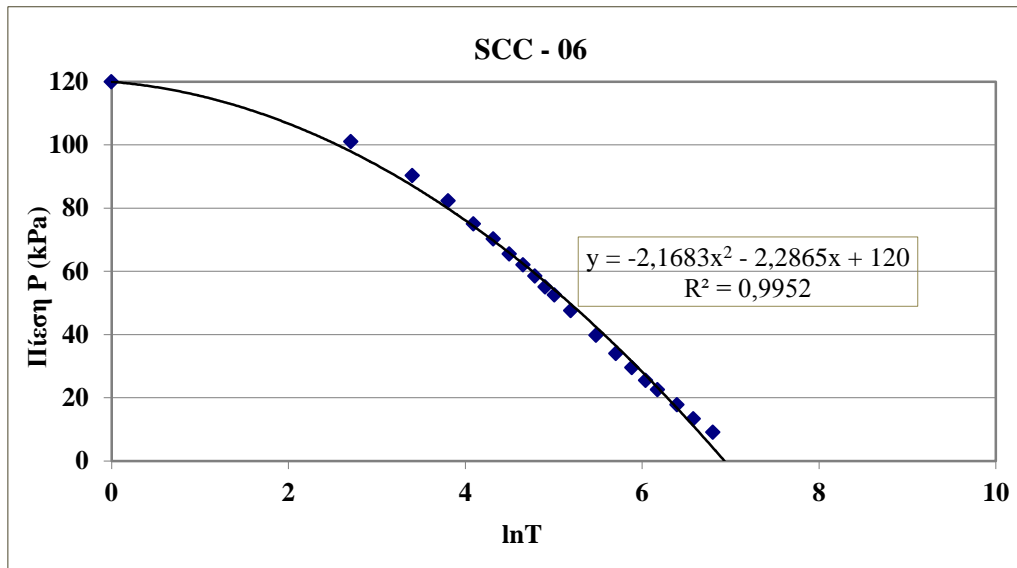
Σχήμα 15: Μεταβολή αρχικά εφαρμοσμένης πίεσης ($P_0=120\text{kPa}$) σε συνάρτηση με το χρόνο για διάφορα ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (1η Ομάδα Συνθέσεων).



Σχήμα 16: Μεταβολή αρχικά εφαρμοσμένης πίεσης ($P_0=120\text{kPa}$) σε συνάρτηση με το χρόνο για διάφορα ποσοστά αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη (2η Ομάδα Συνθέσεων).

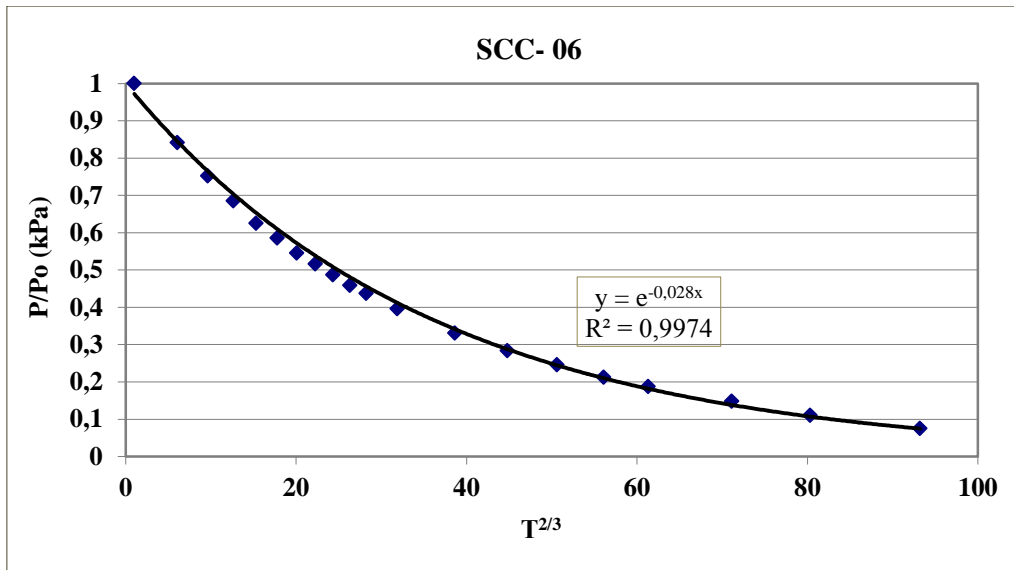
Εν συνεχεία, κατασκευάζεται το διάγραμμα της πτώσης πίεσης συναρτήσει του νεπέριου λογάριθμου του χρόνου από την επιβολή της αρχικής πίεσης $P_0=120\text{ kPa}$ (Σχήμα 17). Τα δεδομένα προσαρμόζονται με πολύ καλή ακρίβεια στη γραφική παράσταση δευτεροβάθμιας πολυωνυμικής εξίσωσης της μορφής $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + 120$ με $x = \ln T$ και $y = P$. Το σημείο τομής της

καμπύλης με τον οριζόντιο άξονα, αποτελεί τον «Χρόνο εξομοίωσης ή εξίσωσης πίεσης», που ουσιαστικά είναι ο νεπέριος λογάριθμος του χρόνου που θα απαιτούνταν ώστε η πίεση να γίνει ίση με την ατμοσφαιρική. Για τη σύνθεση SCC – 06 που παρουσιάζεται, ο Χρόνος Εξίσωσης Πίεσης ισούται με $\ln T = 6,93$. Όσο ο Χρόνος Εξίσωσης Πίεσης μειώνεται, τόσο η διαπερατότητα του δοκιμίου σε νερό αυξάνεται.



Σχήμα 17: Διάγραμμα πτώσης πίεσης σε συνάρτηση με τον νεπέριο λογάριθμο του χρόνου από την επιβολή της αρχικής πίεσης ($P_0=120\text{kPa}$) για την σύνθεση SCC – 06.

Τέλος, κατασκευάστηκε για κάθε σύνθεση το διάγραμμα της πτώσης πίεσης ανηγμένης ως προς την αρχική τιμή της πίεσης που εφαρμόστηκε ($P_0=120\text{ kPa}$), συναρτήσει του $T^{2/3}$. Τα δεδομένα προσαρμόζονται με πολύ καλή προσέγγιση σε τμήμα εκθετικής καμπύλης της μορφής $y = e^{-c \cdot x}$, όπου $x = T^{2/3}$ και $y = P/P_0$. Ο συντελεστής c αποτελεί το «συντελεστή υδατοπερατότητας» c_{w120} για το δεδομένο δοκίμιο. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το διάγραμμα για τη σύνθεση SCC – 06, για την οποία ο συντελεστής υδατοπερατότητας προέκυψε ίσος με $c_{w120} = 0,0278$.



Σχήμα 18: Διάγραμμα ανηγμένης πτώσης πίεσης στην αρχικώς επιβληθείσα πίεση ($P_0=120\text{kPa}$) ως προς το χρόνο, $T^{2/3}$, για την σύνθεση SCC – 06.

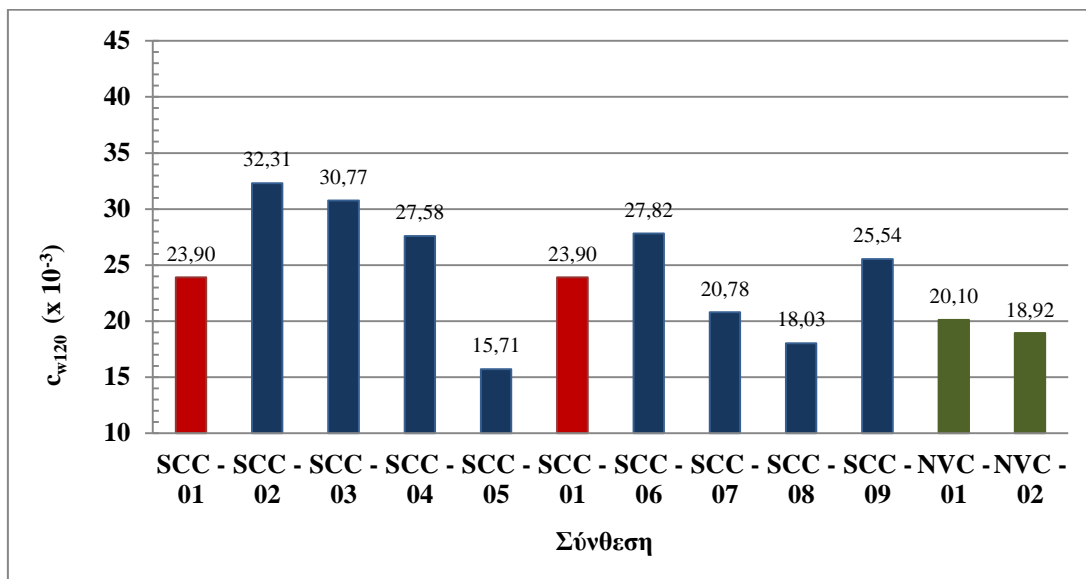
Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, προσδιορίστηκε ο Χρόνος Εξίσωσης Πίεσης και ο συντελεστής υδατοπερατότητας για όλες τις επιμέρους συνθέσεις. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων, ανάλογα με την ομάδα σύνθεσης και το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα χαρακτηριστικών μεγεθών δοκιμής υδατοπερατότητας με τη διάταξη GWT – 4000, για όλες τις συνθέσεις.

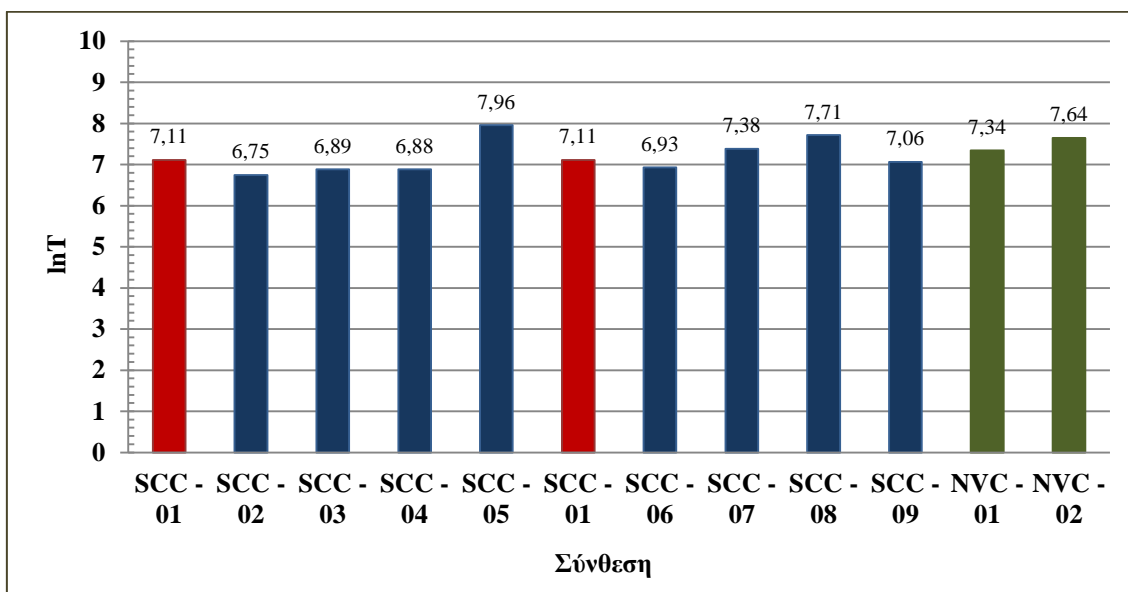
Χαρακτηριστικά Σύνθεσης			Υδατοπερατότητα w_{p120}				
Σύνθεση	(% προσθήκης MK		Χρόνος Εξομοίωσης $\ln T$	Συντελεστής Υδατοπερατότητας c_{w120} ($\times 10^{-3}$)	Ποσοστό μεταβολής $\ln T$ ως προς το αμιγές (SCC – 01) %	Ποσοστό μεταβολής c_{w120} ως προς το αμιγές (SCC – 01) %	
	%mk/cem (κ.β.)	%mk/lp20 (κ.β.)					
	SCC - 01	0,00	0,00	7,11	23,90	0,00	0,00
1η Ομάδα	SCC - 02	6,86	-	6,75	32,31	-5,08	35,16
	SCC - 03	10,57	-	6,89	30,77	-3,11	28,73
	SCC - 04	14,00	-	6,88	27,58	-3,19	15,40
	SCC - 05	20,00	-	7,96	15,71	11,94	-34,27
2η Ομάδα	SCC - 06	-	13,71	6,93	27,82	-2,51	16,36
	SCC - 07	-	21,10	7,38	20,78	3,81	-13,07
	SCC - 08	-	28,00	7,71	18,03	8,51	-24,57
	SCC - 09	-	40,00	7,06	25,54	-0,62	6,85
	NVC - 01	0,00	0,00	7,34	20,10	-	-
	NVC - 02	0,00	0,00	7,64	18,92	-	-

Όπως φαίνεται και από τα σχήματα Σχήμα 19 και Σχήμα 20 που ακολουθούν, ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η υδατοπερατότητα και ο χρόνος εξίσωσης πίεσης στα μίγματα ΑΣΣ που εξετάστηκαν φαίνεται να εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου ή του φίλλερ με μετακαολίνη. Παρατηρείται ελάχιστη τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} ίση με $c_{w120} = 15,71 \times 10^{-3}$ για το μίγμα SCC– 05, όπου έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη σε ποσοστό 20% (βελτίωση κατά 34,27% σε σχέση με τη σύνθεση SCC – 01), και αντίστοιχα μέγιστη τιμή του χρόνου εξίσωσης πίεσης $\ln T = 7,96$. Η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας παρατηρείται στη σύνθεση SCC – 02, για αντικατάσταση δηλαδή του τσιμέντου με μετακαολίνη σε ποσοστό 6,86%, και ισούται με $c_{w120} = 32,31 \times 10^{-3}$. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη (2^η ομάδα συνθέσεων) φαίνεται να συμβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό στη μείωση της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος συγκρινόμενη με την αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη (1^η ομάδα συνθέσεων), δίδοντας γενικά μικρότερες τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} .

Ενδεικτικά δίνεται και ο συντελεστής υδατοπερατότητας c_{w120} των μιγμάτων ΣΣ (NVC – 01 και NVC – 02), ο οποίος για τη σύνθεση NVC – 01 ανέρχεται σε $c_{w120} = 20,10 \times 10^{-3}$, ενώ για τη σύνθεση NVC – 02 ανέρχεται σε $c_{w120} = 18,92 \times 10^{-3}$.

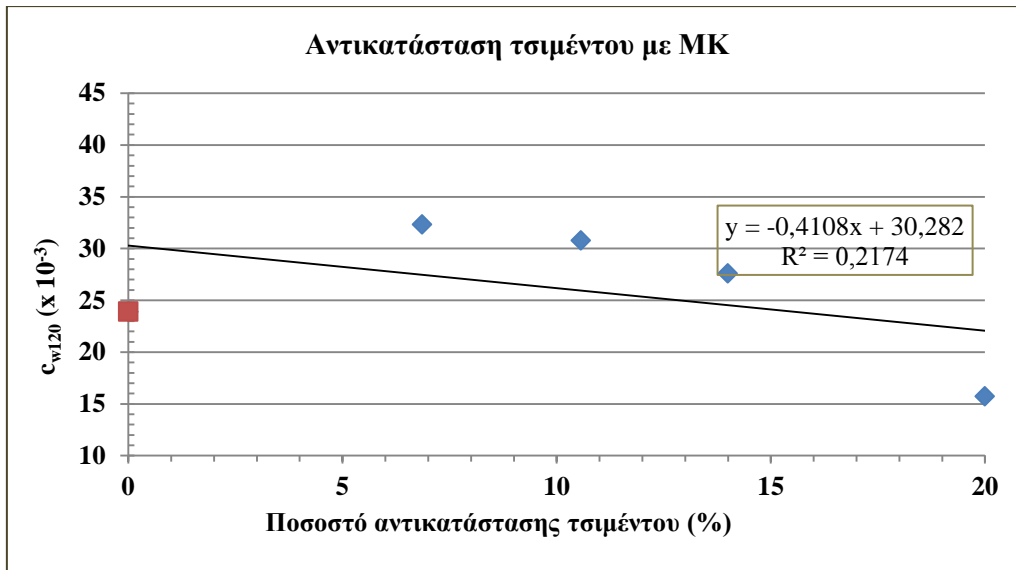


Σχήμα 19: Συντελεστής Υδατοπερατότητας, $c_{w120}(x 10^{-3})$, ανά σύνθεση.

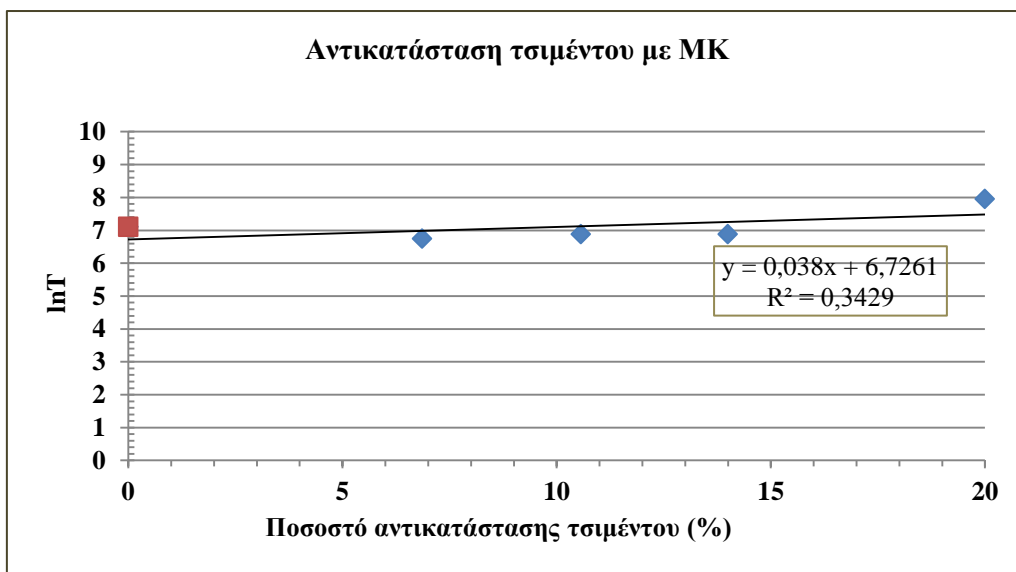


Σχήμα 20: Χρόνος εξίσωσης πίεσης, lnT , ανά σύνθεση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα επιμέρους διαγράμματα του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} και του χρόνου εξομοίωσης lnT ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) και ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων), προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση της προσθήκης μετακαολίνη στην ιδιότητα της υδατοπερατότητας, για κάθε ομάδα σύνθεσης. Οι τιμές που παρουσιάζονται έχουν προκύψει από το μέσο όρο των καταγραφών των επιμέρους πιέσεων που μετρήθηκαν σε κάθε δοκίμιο (2 έως 4 πλευρές).



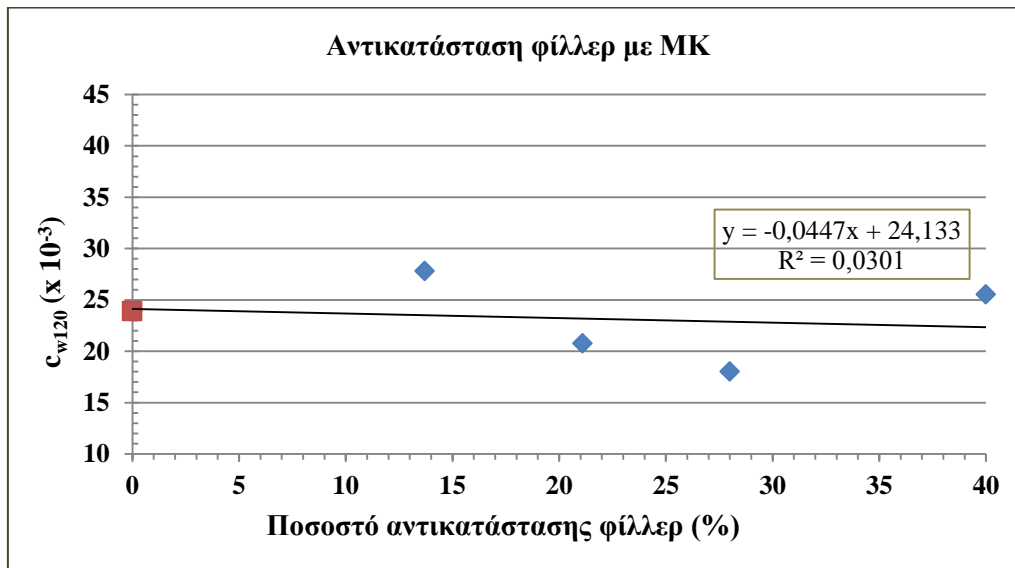
Σχήμα 21: Συντελεστής Υδατοπερατότητας $c_{w120}(x 10^{-3})$ ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem).



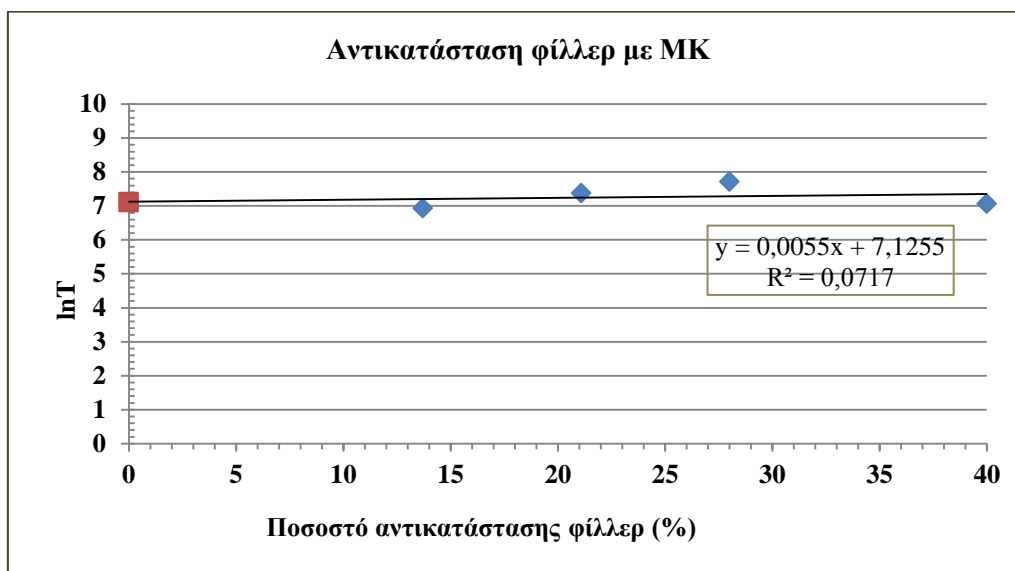
Σχήμα 22: Χρόνος εξομοίωσης πίεσης lnT ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem).

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη έχει οδηγήσει εν γένει σε αύξηση της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος (και κατ' επέκταση σε μείωση του χρόνου εξίσωσης πίεσης). Ωστόσο, όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης, παρατηρούμε μια πτωτική τάση στην τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας. Για ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη ίσο με 20%, η τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας μειώνεται δραστικά σε σχέση τόσο με τα υπόλοιπα ποσοστά αντικατάστασης, αλλά και σε σχέση με το αμιγές, σημειώνοντας βελτίωση της τάξης του 34%. Παρόμοια συμπεριφορά

παρατηρείται και στο διάγραμμα του χρόνου εξομοίωσης συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου.



Σχήμα 23: Συντελεστής Υδατοπερατότητας $c_{w120} (x 10^{-3})$ ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φύλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20).



Σχήμα 24: Χρόνος εξίσωσης πίεσης lnT ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φύλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20).

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε ότι για ποσοστό αντικατάστασης του φύλλερ με μετακαολίνη ίσο με 13,71% σημειώνεται αύξηση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} κατά 16,36% σε σχέση με το αμιγές και αντίστοιχη μείωση του χρόνου εξομοίωσης πίεσης. Για μεγαλύτερα

ποσοστά αντικατάστασης του φίλλερ, παρατηρείται μείωση του συντελεστή υδατοπερατότητας, η οποία ανερχεται σε 13,07% για ποσοστό αντικατάστασης 21,10% και σε 24,57% για ποσοστό αντικατάστασης 28%, που είναι και η βέλτιστη τιμή που σημειώνεται στη 2^η ομάδα συνθέσεων. Σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής υδατοπερατότητας c_{w120} ισούται με $25,54 \times 10^{-3}$, ενώ ο χρόνος εξομοίωσης πίεσης $\ln T$ ισούται με 7,06. Για ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ ίσο με 40%, παρατηρείται μια εκ νέου αύξηση του συντελεστή υδατοπερατότητας σε σχέση με το αμιγές, η οποία ωστόσο είναι μικρή (αύξηση του c_{w120} κατά 6,85%). Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στο διάγραμμα του χρόνου εξομοίωσης συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου.

5.4 Υδατοπερατότητα κατά BS EN 12390-8:2000 (w_{p500})

Η δοκιμή της υδατοπερατότητας κατά BS EN 12390-8:2000 *Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure* (British Standards Institution, 2000) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (§4.3.4).

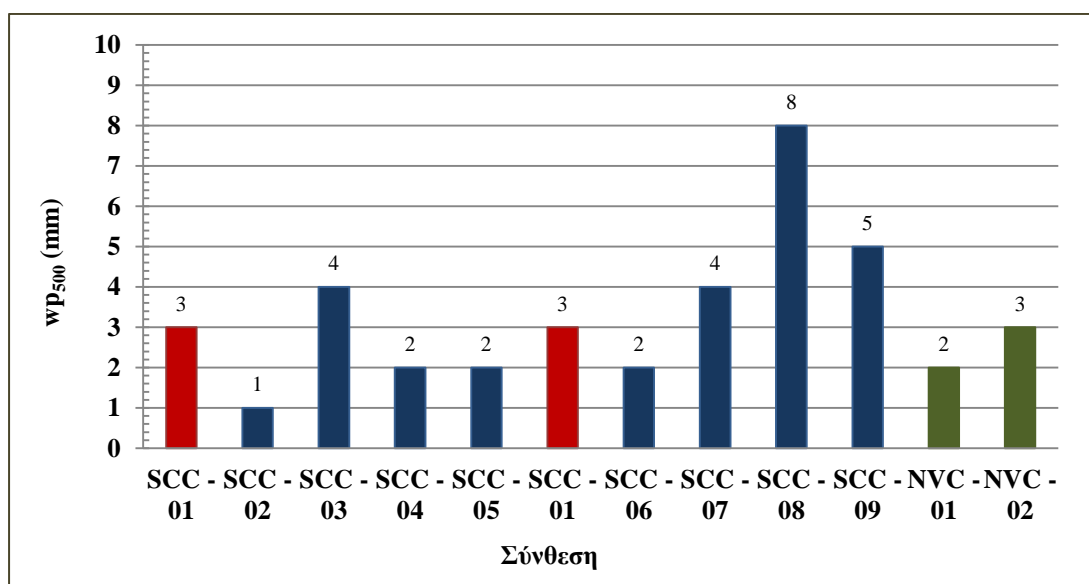
Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της υδατοπερατότητας w_{p500} , όπως αυτή εκφράζεται με τη διείσδυση του νερού (σε mm), ανάλογα με την ομάδα σύνθεσης και το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα δοκιμής υδατοπερατότητας κατά BS EN 12390-8:2000, για όλες τις συνθέσεις.

Χαρακτηριστικά Σύνθεσης				Υδατοπερατότητα w_{p500} (mm)	Ποσοστό μεταβολής ως προς το αμιγές (SCC – 01) %
Σύνθεση		(%) προσθήκης MK			
		%mk/cem (κ.β.)	%mk/lp20 (κ.β.)		
	SCC - 01	0	0	3	0
1η Ομάδα	SCC - 02	6,86	-	1	-66,67
	SCC - 03	10,57	-	4	33,33
	SCC - 04	14,00	-	2	-33,33
	SCC - 05	20,00	-	2	-33,33
2η Ομάδα	SCC - 06	-	13,71	2	-33,33
	SCC - 07	-	21,10	4	33,33
	SCC - 08	-	28,00	8	166,67
	SCC - 09	-	40,00	5	66,67
	NVC - 01	0	0	2	-
	NVC - 02	0	0	3	-

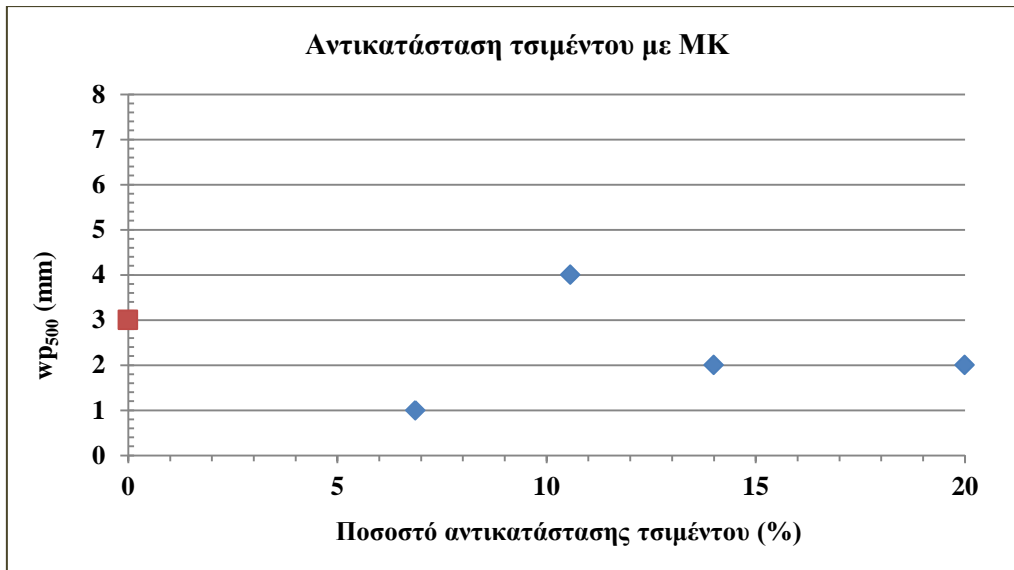
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 25 που παρατίθεται στη συνέχεια, η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη οδηγεί εν γένει σε μείωση της διαπερατότητας σε νερό του σκυροδέματος, σε αντίθεση με την αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη, η οποία οδηγεί γενικά σε υψηλότερες τιμές υδατοπερατότητας. Η χαμηλότερη τιμή υδατοπερατότητας που προσδιορίστηκε κατά BS EN 12390-8:2000, σημειώθηκε στη σύνθεση SCC- 02, δηλαδή για ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη ίσο με 6,86% και ήταν ίση με 1 mm. Η υψηλότερη τιμή υδατοπερατότητας, αντιθέτως, σημειώθηκε για τη σύνθεση SCC – 08, δηλαδή για ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ με μετακαολίνη ίσο με 28% και ήταν ίση με 8 mm. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη (1^η ομάδα συνθέσεων) φαίνεται να συμβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό στη μείωση της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος συγκρινόμενη με την αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη (2^η ομάδα συνθέσεων).

Ενδεικτικά δίνεται και η υδατοπερατότητα w_{p500} των μιγμάτων ΣΣ (NVC – 01 και NVC – 02), η οποία για τη σύνθεση NVC – 01 ανέρχεται σε $w_{p500}= 2$ mm, ενώ για τη σύνθεση NVC – 02 ανέρχεται σε $w_{p500}= 3$ mm.

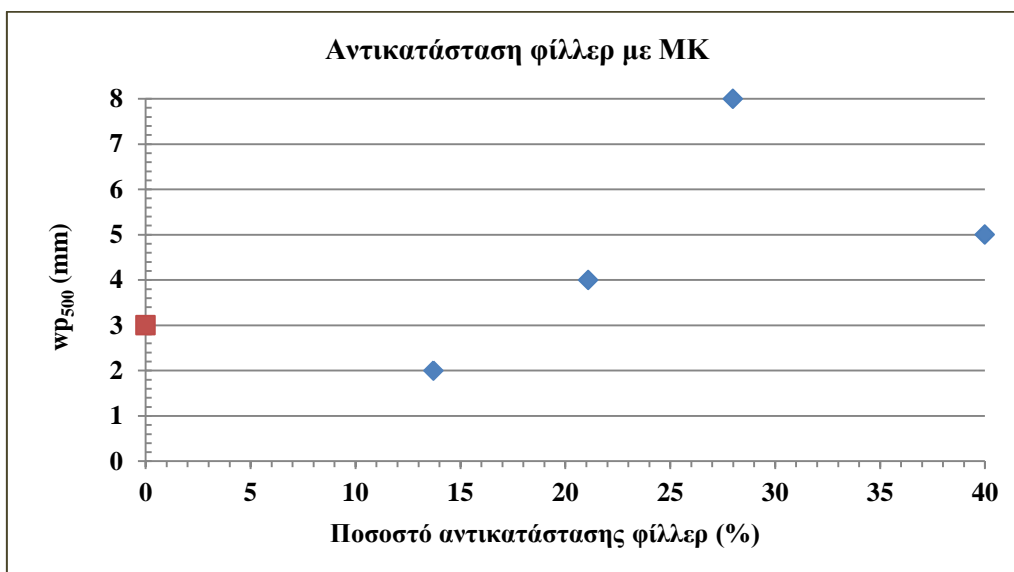


Σχήμα 25: Συντελεστής Υδατοπερατότητας, w_{p500} (mm), ανά σύνθεση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα επιμέρους διαγράμματα της υδατοπερατότητας που μετρήθηκε σε κάθε δοκίμιο, ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) και ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων), προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση του ποσοστού προσθήκης του μετακαολίνη στην υδατοπερατότητας του σκυροδέματος για κάθε ομάδα σύνθεσης..



Σχήμα 26: Συντελεστής Υδατοπερατότητας w_{p500} ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem)



Σχήμα 27: Συντελεστής Υδατοπερατότητας w_{p500} ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φύλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20).

Από τα δύο διαγράμματα παρατηρούμε ότι σύμφωνα με τη μέτρηση της υδατοπερατότητας κατά BS EN 12390-8:2000, w_{p500} (mm), η προσθήκη μετακαολίνη στα μίγματα ΑΣΣ δε φαίνεται να επηρεάζει με συγκεκριμένο τρόπο την υδατοπερατότητα. Η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη οδηγεί εν γένει σε μείωση της υδατοπερατότητας, καθώς όλες οι συνθέσεις, με εξαίρεση τη σύνθεση SCC- 04 (ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου ίσο με 14%), σημείωσαν χαμηλότερες τιμές υδατοπερατότητας σε σχέση με τη σύνθεση που δεν περιείχε μετακαολίνη (SCC – 01). Αντίθετα, στη 2^η ομάδα συνθέσεων, για αντικατάσταση δηλαδή του φύλλερ με μετακαολίνη, παρατηρούμε ότι

όλες οι συνθέσεις, με εξαίρεση τη σύνθεση SCC– 06 (ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ ίσο με 13,71%), έδωσαν υψηλότερες τιμές για τη διαπερατότητα σε σχέση με τη σύνθεση που δεν περιείχε μετακαολίνη (SCC – 01). Παράλληλα, παρατηρούμε ότι η διαπερατότητα σε νερό για ποσοστά αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη 13,71% και 28% παρουσιάζει μια μάλλον αυξητική τάση, η οποία μειώνεται ξανά για ποσοστό αντικατάστασης 40%. Οι τιμές αυτές δε βρίσκονται σε συμφωνία με τα όσα παρατηρήθηκαν στη μέτρηση της υδατοπερατότητας με τη μέθοδο GWT – 4000.

5.5 Διαπερατότητα σε αέρα (gp)

Η δοκιμή της διαπερατότητας σε αέρα πραγματοποιήθηκε, σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (§ 4.4).

Στον Πίνακα 10: Ενδεικτική τεχνική αναφορά δοκιμής διαπερατότητας σε αέρα *gp*, για τη σύνθεση SCC– 05 παρουσιάζεται ενδεικτικά η τεχνική αναφορά που αναφέρεται στη μέτρηση της διαπερατότητας σε αέρα του δοκιμίου της σύνθεσης Σ165 (SCC - 05), παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων (μέτρηση του χρόνου που απαιτείται ώστε η στάθμη του νερού εντός του ογκομετρικού σωλήνα να κατέλθει κατά ένα συγκεκριμένο βήμα). Ομοίως έχουν συνταχθεί οι τεχνικές αναφορές και για τα υπόλοιπα δοκίμια που εξετάστηκαν.

Πίνακας 10: Ενδεικτική τεχνική αναφορά δοκιμής διαπερατότητας σε αέρα *gp*, για τη σύνθεση SCC– 05.

Αριθμός δοκιμίου		Σύνθεση	SCC - 05		
		Ημερομηνία διεξαγωγής πειράματος	01/07/2013		
		Αριθμός δοκιμίου	Σ165		
		Μήκος δοκιμίου L (m)	0,51		
$P_1 (x 10^6) (N/m^2)$	$P_2 (x 10^6) (N/m^2)$	$Q (x 10^{-6}) (m^3)$	t (sec)	$K (x 10^{-17}) (m^2)$	
4,0	1,0	25	104	3,68	
5,5	1,0	30	73	3,22	
7,0	1,0	50	60	3,98	
8,5	1,0	50	46	3,47	
10,0	1,0	80	45	4,09	

Οι τιμές του *K* υπολογίζονται, όπως αναφέρθηκε στην § 1.3.3, από τη σχέση:

$$K = \frac{2qp_0L\eta}{A(p^2 - p_a^2)}$$

όπου $P_1 = P$ η πίεση εισόδου, $P_2 = P_a$ η πίεση εξόδου και $P_2 = P_0$ η πίεση στην οποία υπολογίζεται ο ρυθμός ροής του όγκου του αερίου q . Το δυναμικό ιξώδες του αερίου ελήφθη ίσο με $\eta = 1,75E-06$ (Ns/m²). Λαμβάνοντας κάθε φορά το μέσο όρο των επιμέρους τιμών που υπολογίζονται για κάθε δοκίμιο, προκύπτει η μέση τιμή του συντελεστή διαπερατότητας για κάθε σύνθεση.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, προσδιορίστηκε η διαπερατότητα σε αέρα (K) για όλες τις επιμέρους συνθέσεις. Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων της διαπερατότητας σε αέρα, ανάλογα με την ομάδα σύνθεσης και το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) ή του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων) με μετακαολίνη.

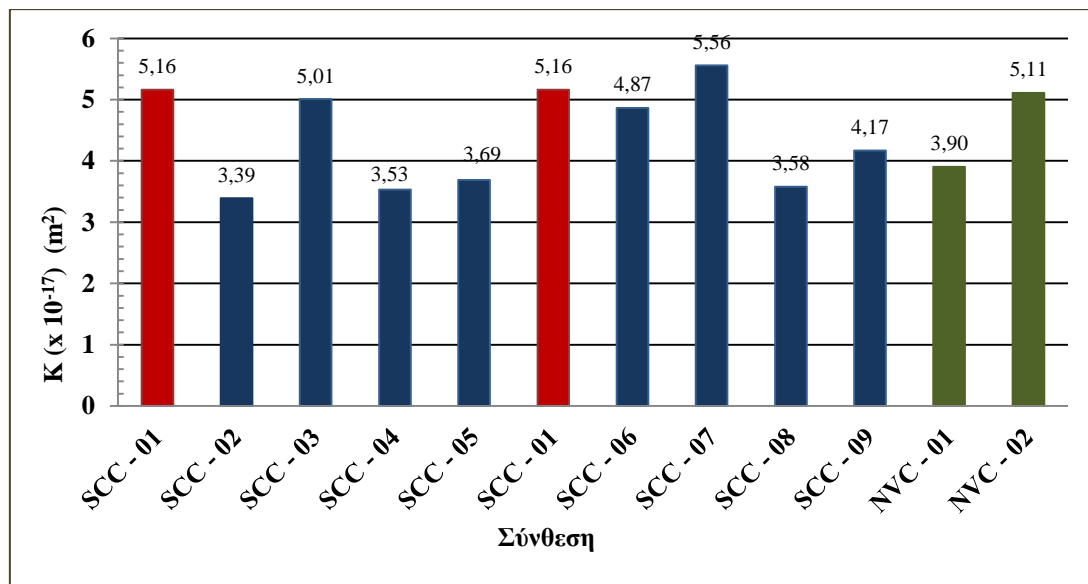
Πίνακας 11: Αποτελέσματα της δοκιμής διαπερατότητας σε αέρα, για όλες τις συνθέσεις.

Χαρακτηριστικά Σύνθεσης					Διαπερατότητα σε αέρα K ($\times 10^{-17}$) (m ²)	Ποσοστό μεταβολής Κως προς το αμιγές (SCC - 01) %
Σύνθεση		(% προσθήκης MK				
		% mk/cem (κ.β.)	% mk/lp20 (κ.β.)			
	Σ170	SCC - 01	0,00	0,00	5,16	0
1η Ομάδα	Σ161	SCC - 02	6,86	-	3,39	-34,30
	Σ164	SCC - 03	10,57	-	5,01	-2,91
	Σ163	SCC - 04	14,00	-	3,53	-31,57
	Σ165	SCC - 05	20,00	-	3,69	-28,46
2η Ομάδα	Σ166	SCC - 06	-	13,71	4,87	-5,68
	Σ168	SCC - 07	-	21,10	5,56	7,69
	Σ167	SCC - 08	-	28,00	3,58	-30,60
	Σ169	SCC - 09	-	40,00	4,17	-19,21
	Σ171	NVC - 01	0,00	0,00	3,90	-
	Σ172	NVC - 02	0,00	0,00	5,11	-

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 28 που ακολουθεί, η προσθήκη μετακαολίνη στα μίγματα του ΑΣΣ εν γένει οδηγεί σε μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε αέρα. Παρατηρείται ελάχιστη τιμή της διαπερατότητας σε αέρα ίση με $3,39 \times 10^{-17}$ για το μίγμα SCC - 02 (βελτίωση κατά

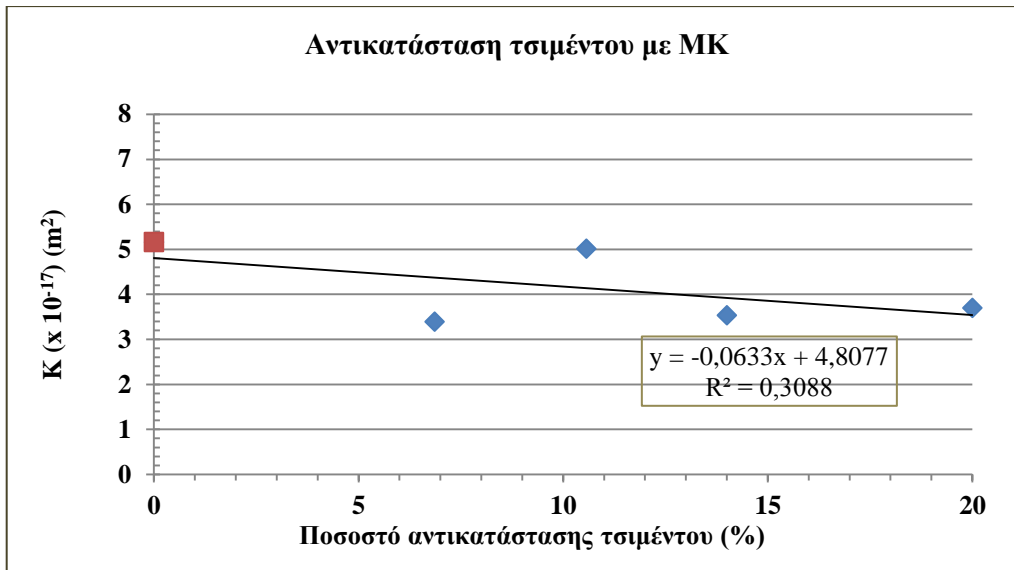
34,30% σε σχέση με τη σύνθεση SCC – 01), ενώ η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται στη σύνθεση SCC – 07 (αύξηση της διαπερατότητας σε αέρα κατά 7,69% σε σχέση με τη σύνθεση SCC – 01), και ισούται με $5,56 \times 10^{-17}$. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη (1^η ομάδα συνθέσεων) φαίνεται να συμβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό στη μείωση της διαπερατότητας σε αέρα του σκυροδέματος συγκρινόμενη με την αντικατάσταση του τσιμέντου με φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων), δίδοντας γενικά μικρότερες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας K .

Ενδεικτικά δίνεται και ο συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα K των μιγμάτων ΣΣ (NVC – 01 και NVC – 02), ο οποίος για τη σύνθεση NVC – 01 ανέρχεται σε $K = 3,90 \times 10^{-17}$, ενώ για τη σύνθεση NVC – 02 ανέρχεται σε $K = 5,11 \times 10^{-17}$.

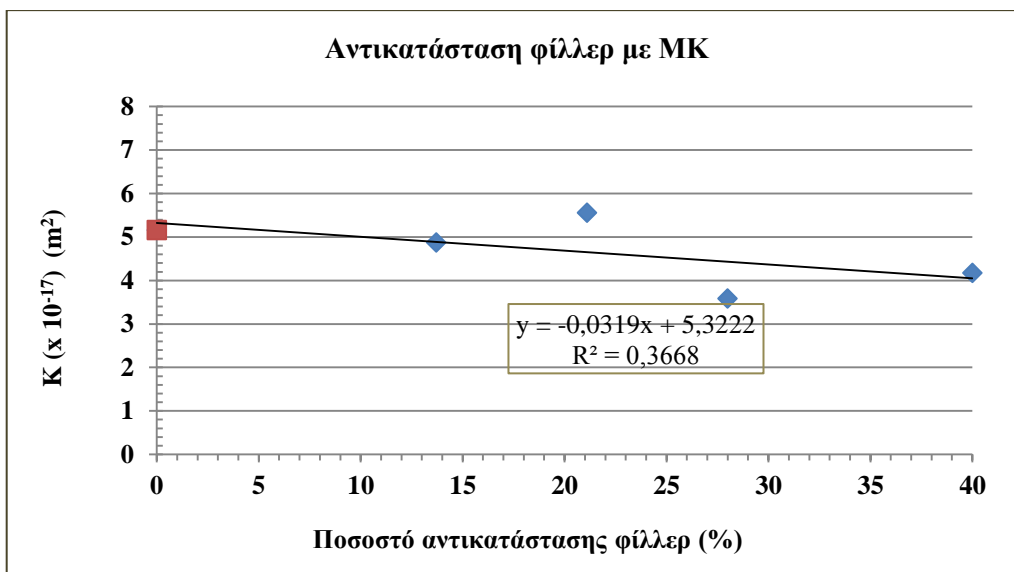


Σχήμα 28: Συντελεστής Διαπερατότητας σε αέρα, $K(x 10^{-17}) (m^2)$, ανά σύνθεση.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα επιμέρους διαγράμματα του συντελεστή διαπερατότητας K σε αέρα ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) και ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων), προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση του ποσοστού προσθήκης του μετακαολίνη για κάθε ομάδα σύνθεσης, στην διαπερατότητα του σκυροδέματος σε αέρα.



Σχήμα 29: Συντελεστής Διαπερατότητας σε αέρα, K ($\times 10^{-17}$) (m^2), ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem).



Σχήμα 30: Συντελεστής Διαπερατότητας σε αέρα, K ($\times 10^{-17}$) (m^2), ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φύλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20).

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως η προσθήκη μετακαολίνη μειώνει τη διαπερατότητα σε αέρα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης, διακρίνεται εν γένει μια πτωτική τάση στην τιμή του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K . Στις συνθέσεις όπου έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη, η χαμηλότερη τιμή για το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα, σημειώθηκε για ποσοστό αντικατάστασης ίσο με 6,86%, δηλαδή στη σύνθεση SCC- 02, ενώ την υψηλότερη διαπερατότητα παρουσίασε η σύνθεση SCC- 02, δηλαδή για ποσοστό αντικατάστασης 10,57%. Όλες, ωστόσο, οι συνθέσεις παρουσίασαν μικρότερη

τιμή του συντελεστή διαπερατότητας σε σύγκριση με το αμιγές. Σε παρόμοιας τάσης αποτελέσματα κατέληξαν οι **Valipour et al. (2013)**, οι οποίοι σε μελέτη τους, μεταξύ άλλων, εξέτασαν την επιρροή της αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη σε ποσοστά 5, 10 και 15% στην ιδιότητα της διαπερατότητας σε αέρα. Η μελέτη αφορούσε σε συμβατικό σκυρόδεμα και οι συνθέσεις με μετακαολίνη που παρασκευάστηκαν είχαν λόγο $w/b = 0,4$. Παρατηρήθηκε ότι, για αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου με MK από 5 σε 10%, σημειώθηκε αύξηση στη διαπερατότητα σε αέρα, ενώ για περαιτέρω αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης από 10 σε 15%, παρατηρείται εκ νέου μείωση της διαπερατότητας σε αέρα.

Στις συνθέσεις όπου έγινε αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη, η μικρότερη τιμή για το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα, σημειώθηκε για ποσοστό αντικατάστασης ίσο με 28%, δηλαδή στη σύνθεση SCC- 08, ενώ την υψηλότερη διαπερατότητα παρουσίασε η σύνθεση SCC- 07, δηλαδή για ποσοστό αντικατάστασης 21,1%.

5.6 Θλιπτική αντοχή (f_c)

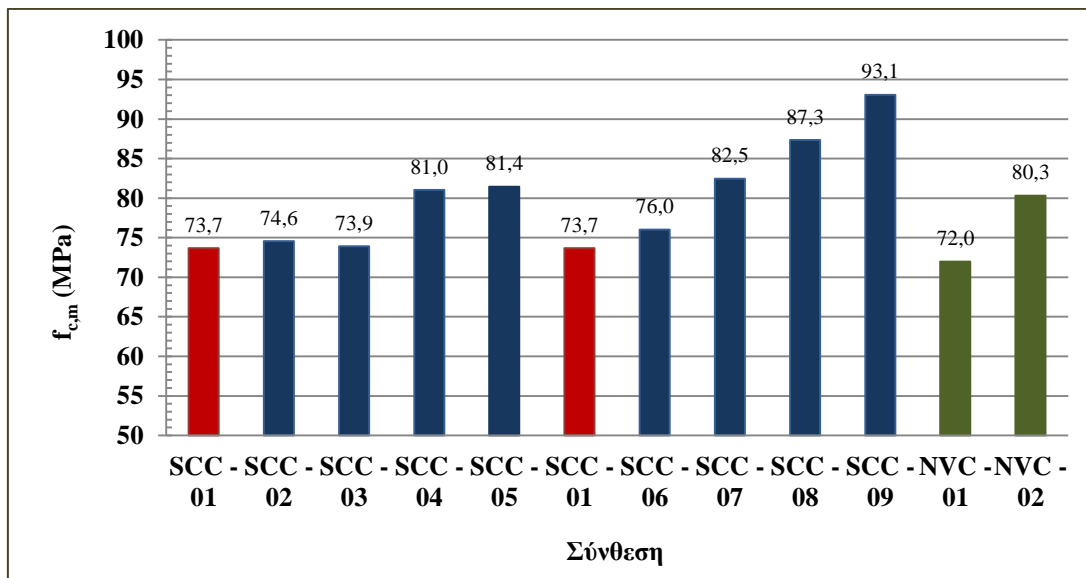
Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο (§ 4.5). Στον Πίνακα 12 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής $f_{c,m}$, όπως αυτές προέκυψαν ως μέσος όρος των επιμέρους αντοχών των τριών δοκιμίων που εξετάστηκαν για κάθε σύνθεση.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 31, η προσθήκη του μετακαολίνη στα μίγματα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος που εξετάστηκαν, αυξάνει εν γένει τη θλιπτική αντοχή. Η μεγαλύτερη τιμή θλιπτικής αντοχής σημειώθηκε στη σύνθεση SCC - 09, δηλαδή για ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ με μετακαολίνη ίσο με 40% (βελτίωση σε σχέση με τη σύνθεση ΑΣΣ χωρίς μετακαολίνη, SCC- 01, ίση με 26,33%), ενώ η μικρότερη τιμή θλιπτικής αντοχής παρατηρήθηκε στη σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος NVC- 01. Η τιμή αυτή είναι αρκετά κοντά στην τιμή της σύνθεσης SCC- 01. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί πως η σύνθεση NVC - 01 δεν περιέχει ρευστοποιητή και έχει λόγο w/c ίσο με 0,481 ο οποίος είναι αρκετά μικρότερος από τον αντίστοιχο λόγο w/c 0,595 της σύνθεσης SCC - 01. Η προσθήκη ρευστοποιητή στο μίγμα του ΣΣ (βλ. NVC - 02) αυξάνει την θλιπτική αντοχή στα 80,3 MPa.

Παράλληλα, παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη (2^η ομάδα συνθέσεων) οδηγεί σε υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής, συγκρινόμενη με την αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη (1^η ομάδα συνθέσεων).

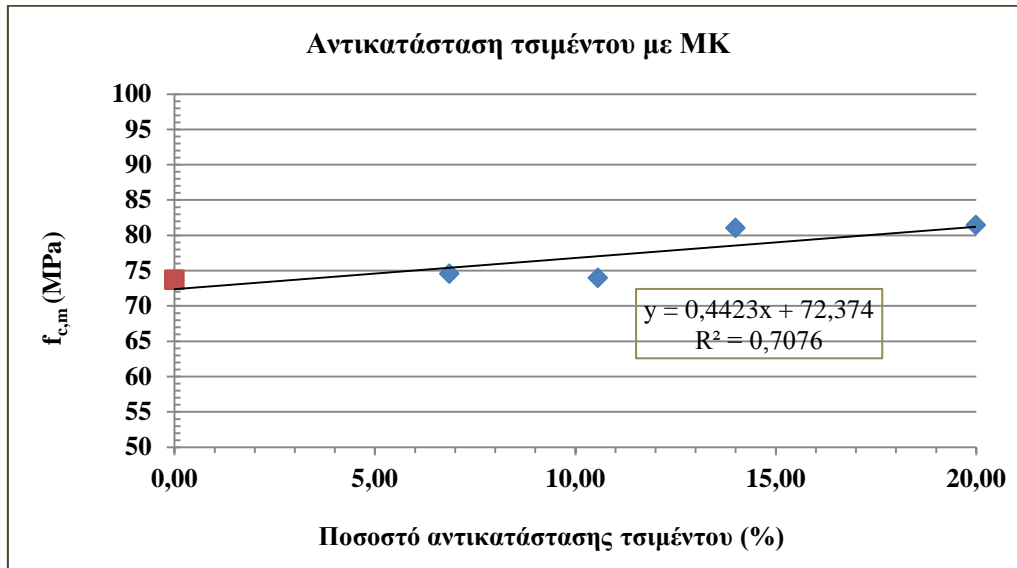
Πίνακας 12: Αποτελέσματα δοκιμής προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής για όλες τις συνθέσεις.

Χαρακτηριστικά Σύνθεσης					Θλιπτική αντοχή $f_{c,m}$ (MPa)	Ποσοστό μεταβολής $f_{c,m}$ ως προς SCC - 01 %
Σύνθεση		(%) προσθήκης MK				
		% mk/cem (κ.β.)	% mk/lp20 (κ.β.)			
	Σ170	SCC - 01	0	0	73,7	0,00
1η Ομάδα	Σ161	SCC - 02	6,86	-	74,6	1,20
	Σ164	SCC - 03	10,57	-	73,9	0,36
	Σ163	SCC - 04	14,00	-	81,0	10,00
	Σ165	SCC - 05	20,00	-	81,4	10,54
2η Ομάδα	Σ166	SCC - 06	-	13,71	76,0	3,21
	Σ168	SCC - 07	-	21,10	82,5	11,95
	Σ167	SCC - 08	-	28,00	87,3	18,55
	Σ169	SCC - 09	-	40,00	93,1	26,33
	Σ171	NVC - 01	0	0	72,0	-
	Σ172	NVC - 02	0	0	80,3	-

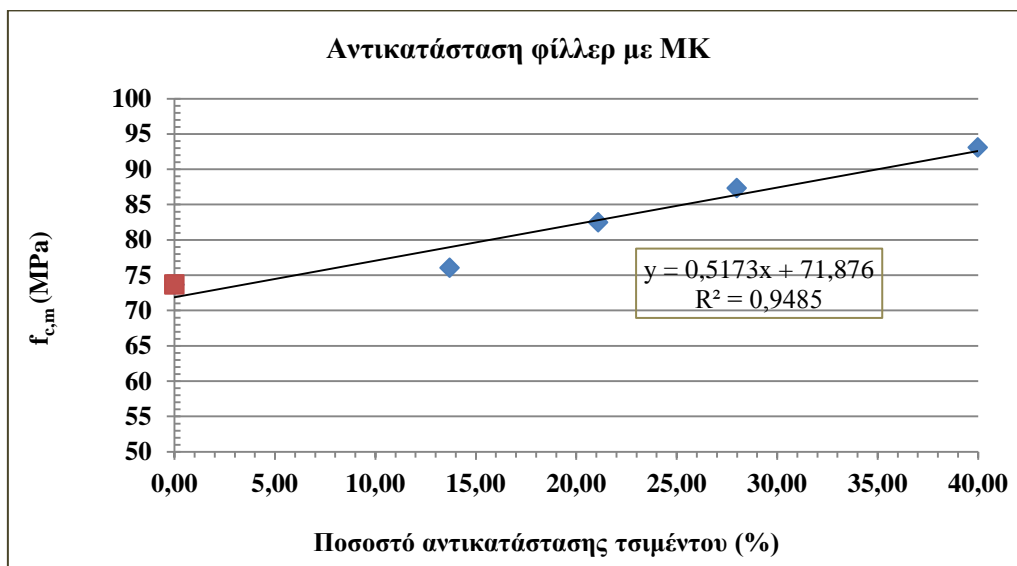


Σχήμα 31: Θλιπτική αντοχή $f_{c,m}$ (MPa), ανά σύνθεση.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα επιμέρους διαγράμματα της θλιπτικής αντοχής ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων) και ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων), προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση του ποσοστού προσθήκης του μετακαολίνης στην ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής, για κάθε ομάδα σύνθεσης.



Σχήμα 32: Θλιπτική αντοχή $f_{c,m}$ (MPa), ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem).



Σχήμα 33: Θλιπτική αντοχή $f_{c,m}$ (MPa), ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20).

Από το διάγραμμα της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης, αυξάνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η τάση αυτή είναι σχεδόν γραμμική ($R^2=0,708$). Η μέγιστη τιμή για τη θλιπτική αντοχή σημειώθηκε για το μεγαλύτερο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη, δηλαδή για ποσοστό 20% (σύνθεση SCC- 05). Στις συνθέσεις, όπου έγινε αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αύξηση της θλιπτικής όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης με τη μέγιστη τιμή της θλιπτικής αντοχής να ισούται με 93,1 MPa για ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ 40% (σύνθεση SCC- 09). Η αυξητική αυτή τάση μπορεί να θεωρηθεί με πολύ καλή ακρίβεια γραμμική, με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης $R^2=0,948$.

5.7 Συσχέτιση παραμέτρων ανθεκτικότητας

Στον Πίνακα 13 δίνεται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R^2 , όπως αυτός προέκυψε έπειτα από την γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ζευγών των συσχετιζόμενων μεγεθών. Δίνονται οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης ανά ομάδα συνθέσεως, καθώς και ο μέσος όρος των δύο αυτών συντελεστών συσχετίσεως.

Πίνακας 13: Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R^2 μεταξύ των μεγεθών S, OP, c_{w120} , lnT, K, f_c .

		ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ												
R^2		% mk/cm	% mk/lp2 0	S	OP	c_{w120}		lnT		K		f_c		
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	%mk/cm	1,00		0,57	0,71	0,22		0,34		0,31		0,71		
	%mk/lp20		1,00	0,92	0,81	0,03		0,07		0,37		0,95		
	S			1,00	0,99	0,75	0,05	0,09	0,05	0,14	0,70	0,21	0,83	0,84
						0,41	0,07		0,10		0,45		0,83	
	OP				1,00	0,00	0,02	0,08	0,00	0,33	0,15	0,23	0,61	
							0,01	0,04		0,24		0,59		
	c_{w120}						1,00	0,93	0,96	0,00	0,08	0,35	0,09	
								0,94	0,04		0,22			
lnT								1,00	0,01	0,19	0,33	0,13		
									0,10	0,23				
K										1,00	0,41	0,41		
											0,41			
f_c												1,00		

ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
R2 1 ^{ης} Ομάδας ΑΣΣ	R2 2 ^{ης} Ομάδας ΑΣΣ
Μέσος Όρος	

Όσον αφορά στη συσχέτιση των παραγόντων ανθεκτικότητας με το ποσοστό αντικατάστασης με μετακαολίνη, παρατηρείται ότι παρουσιάζεται σχετικά καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού αντικατάστασης m_k/cem με τα μεγέθη S , OP , f_c . Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και για το ποσοστό αντικατάστασης $m_k/lp20$, με τη διαφορά ότι οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης είναι σημαντικά υψηλότεροι.

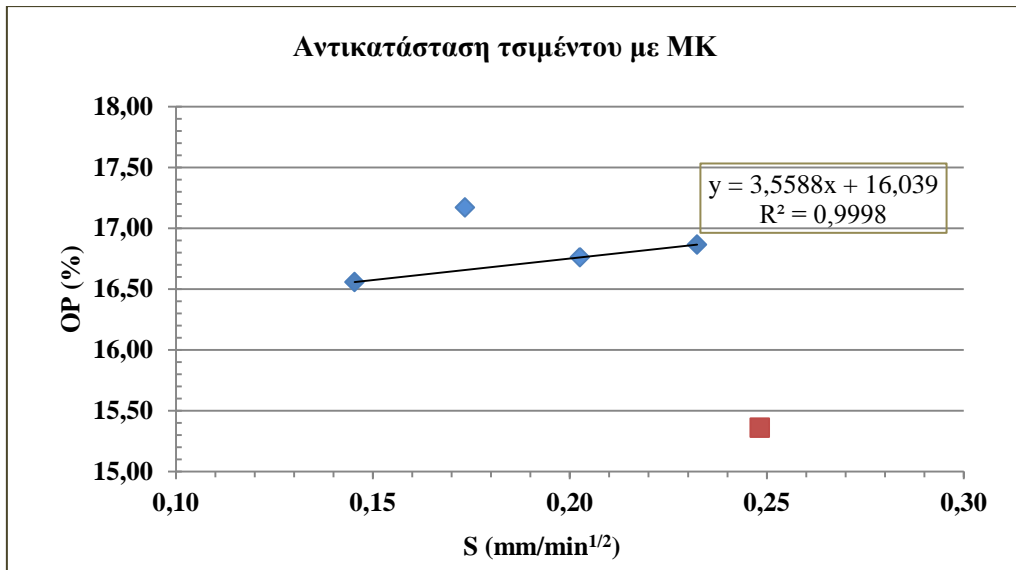
Όσον αφορά στη συσχέτιση των παραγόντων ανθεκτικότητας μεταξύ τους, καλή γραμμική συσχέτιση παρατηρήθηκε μεταξύ των μεγεθών:

- S και OP , τόσο για την 1^η ($R_2=0,99$) όσο και για την 2^η ($R_2=0,75$) ομάδα συνθέσεων ΑΣΣ. Σημειώνεται ότι η συσχέτιση αυτή έγινε μετά την απόρριψη συγκεκριμένων τιμών, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.
- S και K για την 1^η ομάδα συνθέσεων ΑΣΣ ($R_2=0,70$).
- S και f_c , τόσο για την 1^η ($R_2=0,83$) όσο και για την 2^η ($R_2=0,84$) ομάδα συνθέσεων ΑΣΣ.
- OP και f_c για την 2^η ομάδα συνθέσεων ΑΣΣ ($R_2=0,61$).
- c_{w120} και $\ln T$, τόσο για την 1^η ($R_2=0,93$) όσο και για την 2^η ($R_2=0,96$) ομάδα συνθέσεων ΑΣΣ (όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο).
- K και f_c τόσο για την 1^η ($R_2=0,41$) όσο και για την 2^η ($R_2=0,41$) ομάδα συνθέσεων ΑΣΣ.

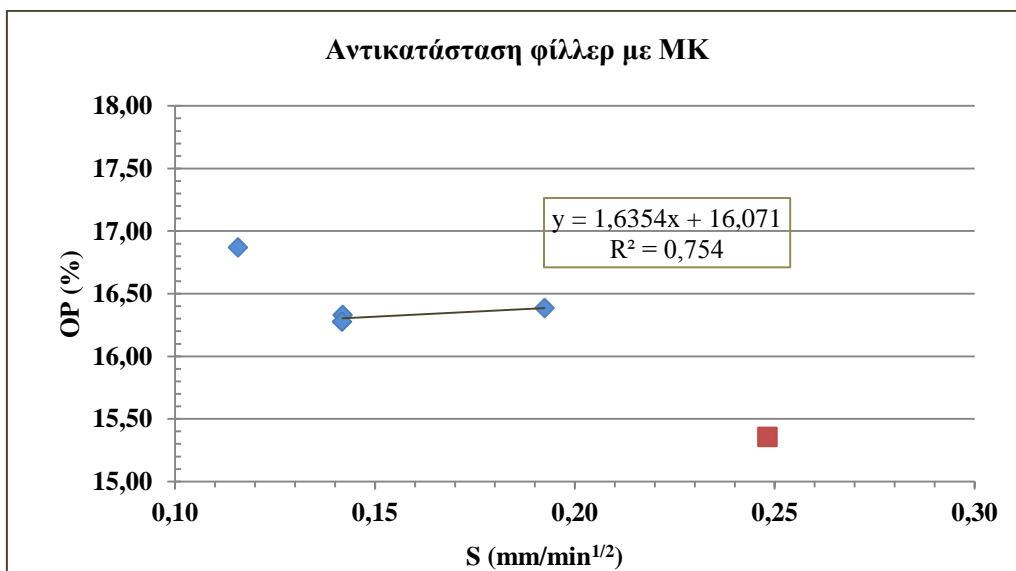
Εν συνεχεία, παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιμέρους συσχετίσεις του κάθε παράγοντα ανθεκτικότητας του Πίνακα 13 (ανεξάρτητη μεταβλητή), με τους υπόλοιπους παράγοντες ανθεκτικότητας (εξαρτημένες μεταβλητές).

5.7.1 Συσχέτιση του παράγοντα ανθεκτικότητας S με τους παράγοντες ανθεκτικότητας OP / c_{w120} / $\ln T$ / K και την θλιπτική αντοχή (f_c)

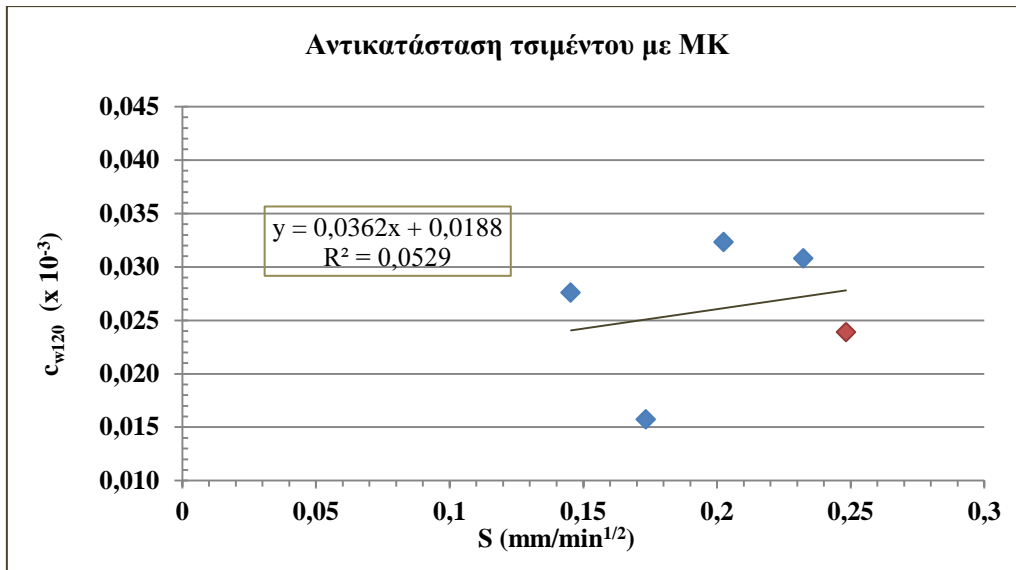
Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους διαγράμματα συσχετίσεως της τριχοειδούς απορρόφησης S (ανεξάρτητη μεταβλητή), με τους υπόλοιπους παράγοντες ανθεκτικότητας (εξαρτημένες μεταβλητές).



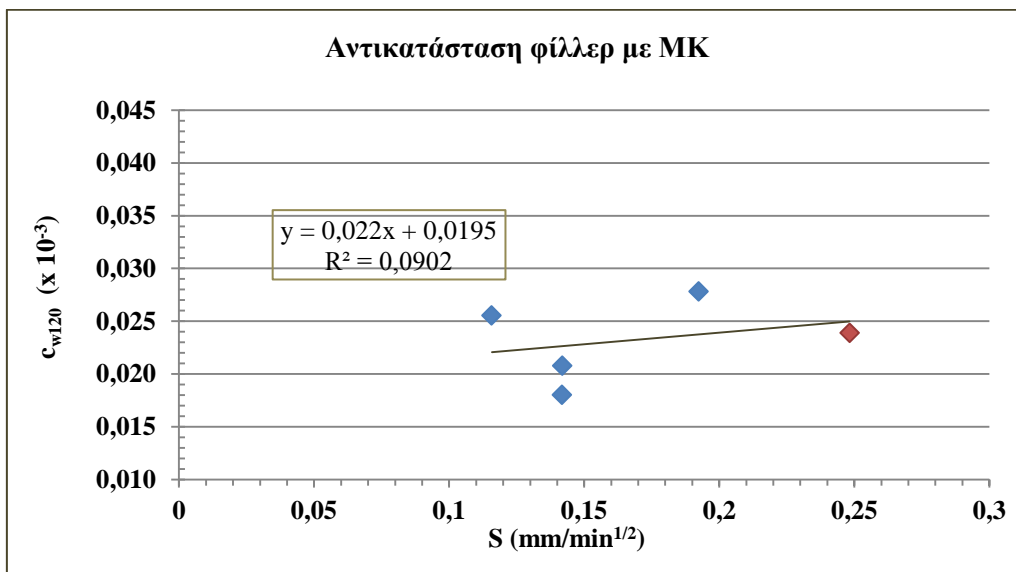
Σχήμα 34: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με το ανοικτό πορώδες OP (%), για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



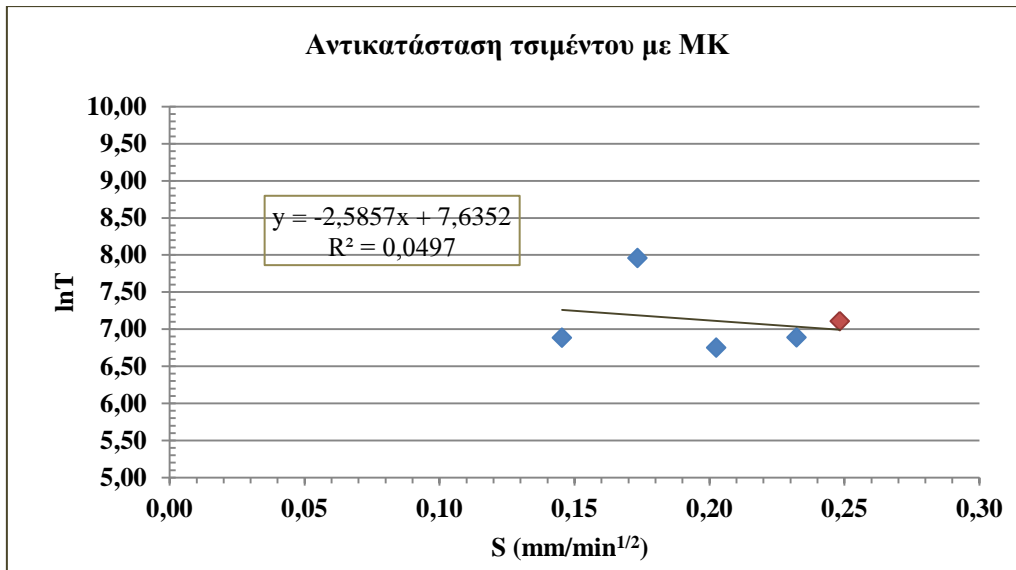
Σχήμα 35: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με το ανοικτό πορώδες OP (%), για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



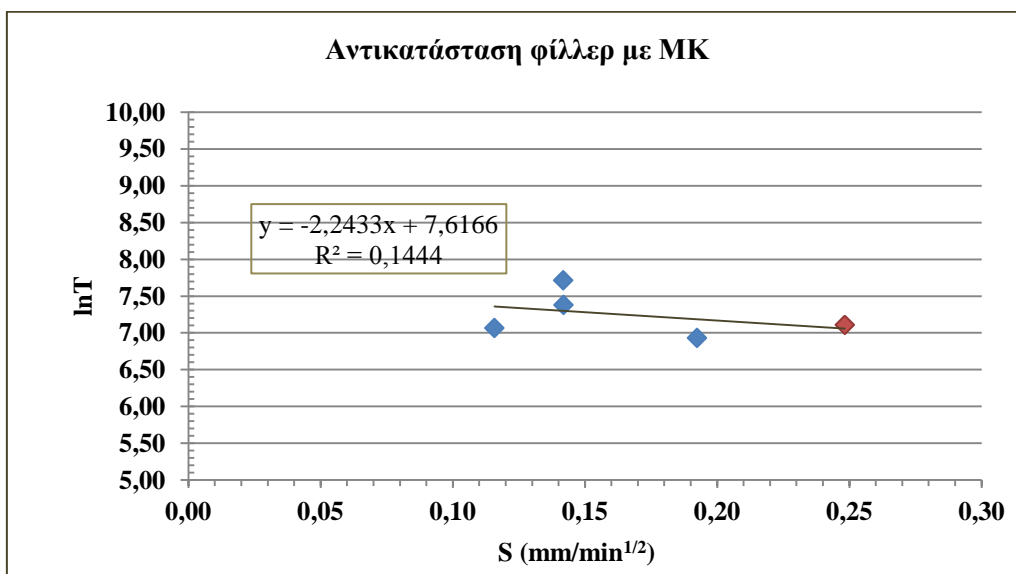
Σχήμα 36: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με το συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} (x 10⁻³), για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



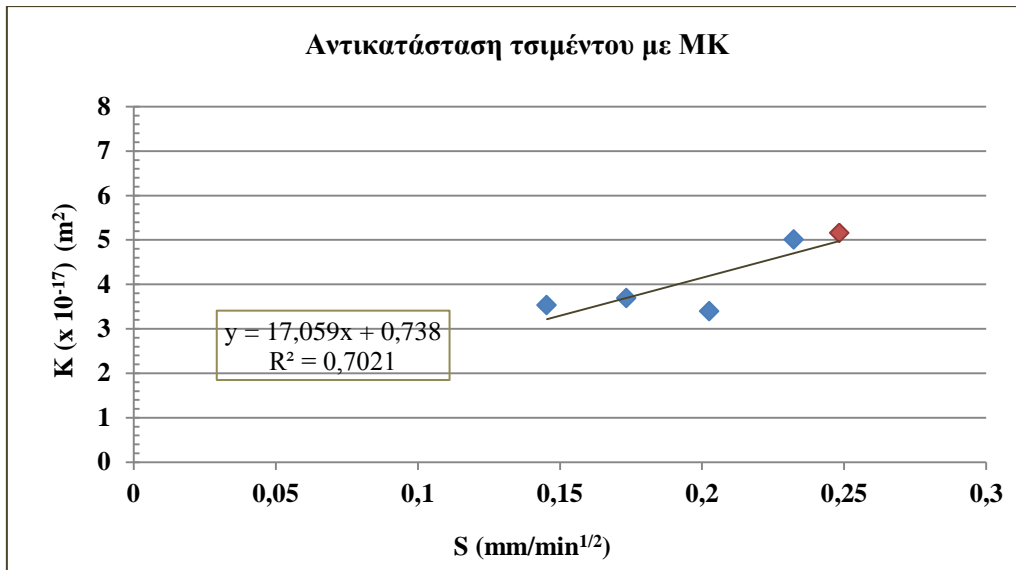
Σχήμα 37: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με το συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} (x 10⁻³) για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



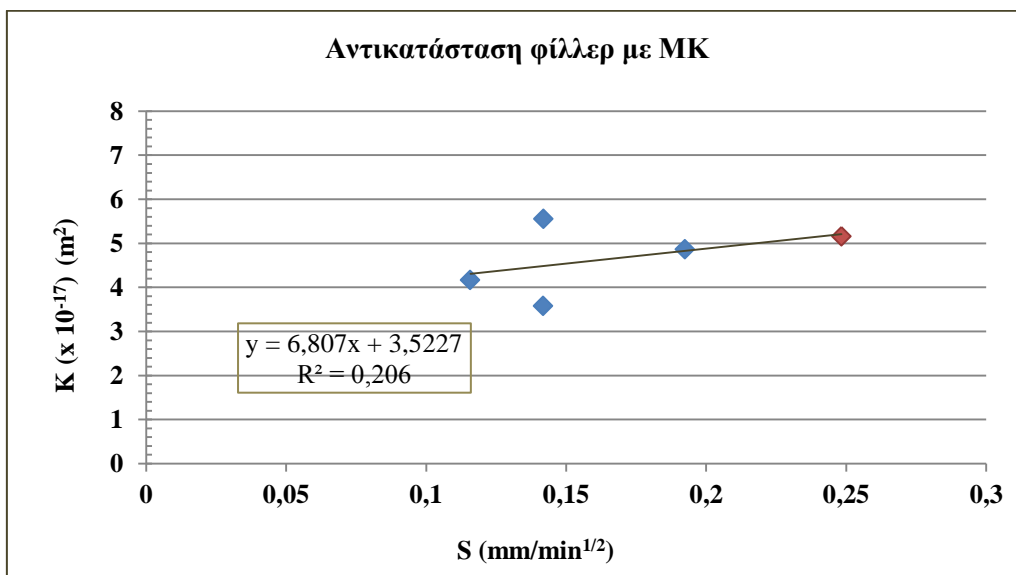
Σχήμα 38: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με το χρόνο εξίσωσης πίεσης lnT για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



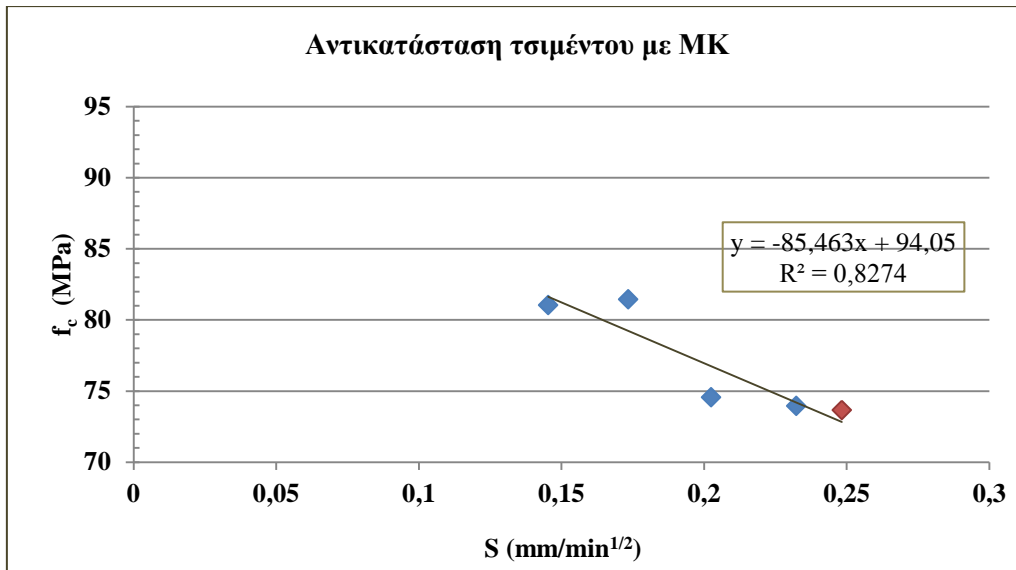
Σχήμα 39: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με το χρόνο εξίσωσης πίεσης lnT για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



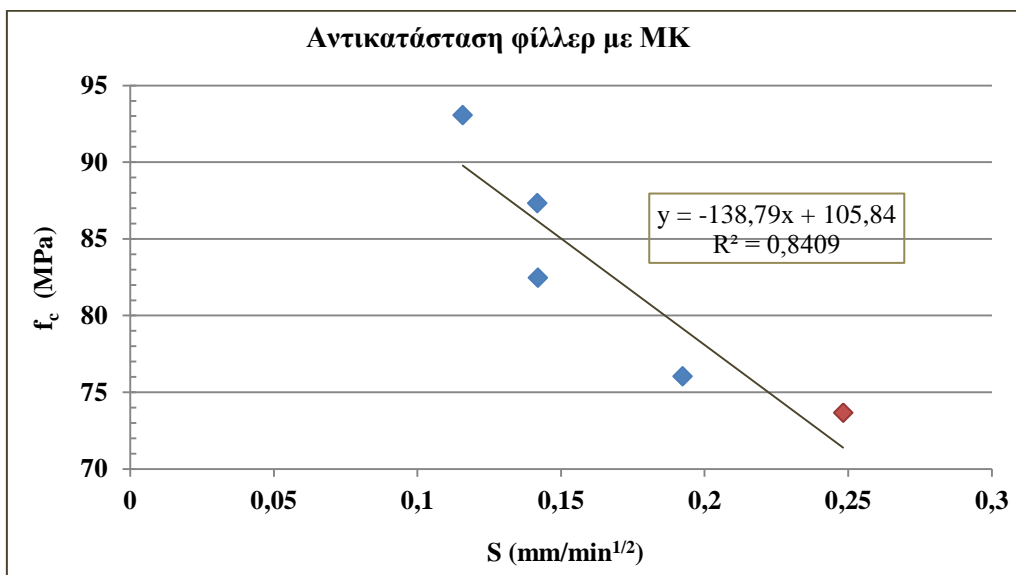
Σχήμα 40: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K (x 10⁻¹⁷) (m²) για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 41: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K (x 10⁻¹⁷) (m²) για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 42: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με τη θλιπτική αντοχή f_c (MPa) για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 43: Συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{1/2}) με τη θλιπτική αντοχή f_c (MPa) για την 2^η ομάδα συνθέσεων.

Όσον αφορά στη συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S με το ανοικτό πορώδες OP, οφείλει να σημειωθεί ότι ο μηχανισμός των δύο επιμέρους φαινομένων είναι παρόμοιος, με εξαίρεση την συμμετοχή της υδροστατικής πίεσεως στην πειραματική μέτρηση του ανοικτού πορώδους, ενώ και το μέσο μεταφοράς (νερό) είναι κοινό. Συνεπώς, θεωρητικά αναμένεται ενδεχομένως καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τους **Kanellopoulos, Petrou και Ioannou (2012)**, οι οποίοι σε σύνολο 6 μίγματος αυτοσυμπυκνούμενου

σκυροδέματος με διαφορετικούς w/b λόγους, παρατήρησαν πολύ καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών ($R^2 = 0,94$).

Παρατηρούμε ότι για την 1^η ομάδα συνθέσεων παρατηρείται σχεδόν απόλυτη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των ποσοστών αντικατάστασης 6,86% - 14,00%. Σημειώνεται, ότι το ζεύγος τιμών που αντιστοιχεί στη σύνθεση SCC- 01 (αμιγές ΑΣΣ), απορρίφθηκε διότι όπως προκύπτει και από το διάγραμμα, η τιμή του πορώδους που προέκυψε για τη συγκεκριμένη σύνθεση κρίνεται, συγκριτικά με τις άλλες συνθέσεις, χαμηλή και επομένως, ενδέχεται η συγκεκριμένη μέτρηση να είναι εσφαλμένη. Παράλληλα, απορρίφθηκε και το ζεύγος τιμών που αντιστοιχεί σε ποσοστό αντικατάστασης mk/cem ίσο με 20%, καθώς θα αναμενόταν πιθανόν μικρότερη τιμή ανοικτού πορώδους. Αν συμπεριληφθεί η εν λόγω τιμή τότε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης πέφτει σε $R^2 = 0,06$. Όσον αφορά στη 2^η ομάδα συνθέσεων, ομοίως έχει απορριφθεί το ζεύγος τιμών που αντιστοιχεί στο αμιγές ΑΣΣ, καθώς και το ζεύγος τιμών που αντιστοιχεί σε ποσοστό αντικατάστασης mk/lp20 ίσο με 40%, καθώς το ανοικτό πορώδες που υπολογίστηκε κρίθηκε πολύ υψηλό. Μεταξύ των ποσοστών αντικατάστασης 13,71% - 28,00% παρατηρήθηκε αρκετά καλή γραμμική συσχέτιση. Ωστόσο γίνεται αντιληπτό ότι υψηλό ποσοστό αντικατάστασης είτε τσιμέντου (>14%), είτε φίλερ (>28%) με ΜΚ, δεν συντελεί στη βελτίωση του πορώδους, όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο (§5.2).

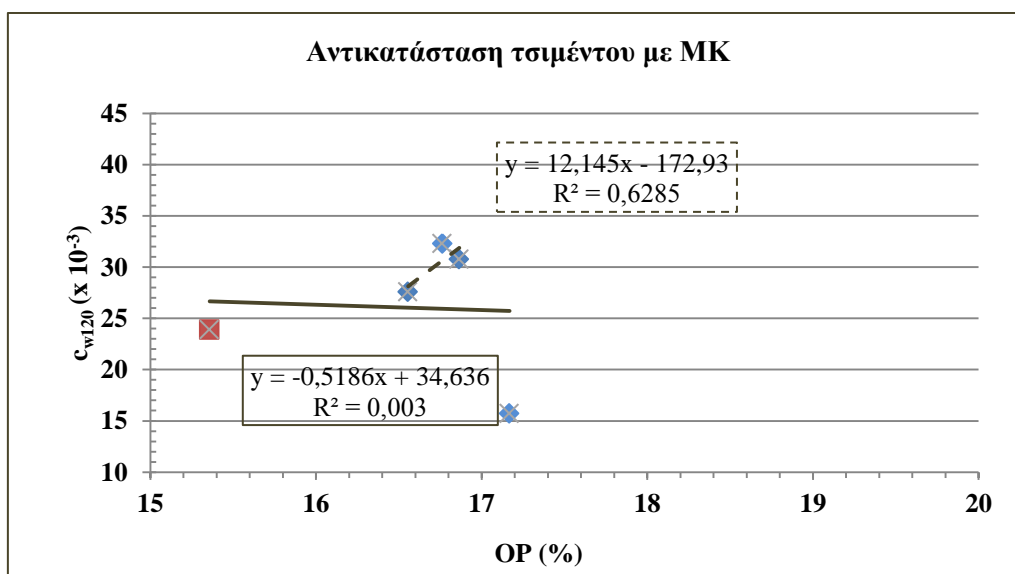
Όσον αφορά στη συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S με το συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} και το χρόνο εξίσωσης πίεσης $\ln T$, παρατηρείται μηδενική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των επιμέρους μεγεθών. Παρά το γεγονός ότι κατά την πειραματική μέτρηση και των δύο παραμέτρων ανθεκτικότητας ($S/\ln T$ ή c_{w120}), εξετάζεται η διαπερατότητα του σκυροδέματος στο ίδιο μέσο μεταφοράς, ωστόσο ο μηχανισμός διαφέρει. Στον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης έχουμε απορρόφηση νερού μέσω τριχοειδούς ανύψωσης, ενώ στη μέτρηση της υδατοπερατότητας μετράται ο ρυθμός ροής του νερού υπό την εφαρμογή πίεσης της τάξης των 2 bar.

Όσον αφορά στη συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K , σημειώνεται ότι, εκτός του γεγονότος ότι κατά την εκτίμηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος εφαρμόζεται διαφορετικό μέσο μεταφοράς (H_2O και N_2 αντίστοιχα), οι δύο μετρήσεις διέπονται και από διαφορετικό μηχανισμό. Όπως έχει αναφερθεί, στην τριχοειδή απορρόφηση η απορρόφηση του νερού γίνεται μέσω τριχοειδούς ανύψωσης, ενώ στη διαπερατότητα σε αέρα μετράται ο ρυθμός ροής του μέσου υπό την εφαρμογή υψηλών τιμών πίεσεων. Επομένως, θεωρητικά δεν αναμένεται κάποιους είδους γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών. Εντούτοις, για την 1^η ομάδα συνθέσεων, σημειώθηκε αρκετά καλή γραμμική συσχέτιση ($R^2 = 0,70$). Για τη 2^η ομάδα συνθέσεων ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης που προέκυψε μπορεί να θεωρηθεί ως χαμηλός ($R^2 = 0,21$). Γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η εφαρμοζόμενη πίεση κατά τη δοκιμή της διαπερατότητας σε αέρα, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό τριχοειδούς πορώδους αναμένεται να συμμετέχει στο φαινόμενο. Το γεγονός αυτό ίσως αιτιολογεί τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δύο πειραματικών μετρήσεων.

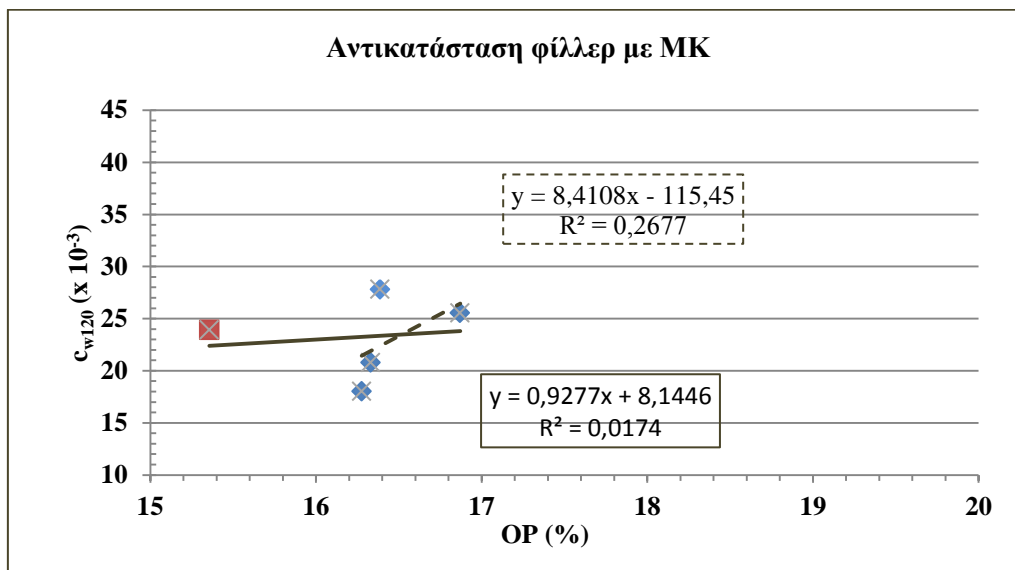
Τέλος, όσον αφορά στη συσχέτιση της τριχοειδούς απορρόφησης S με τη θλιπτική αντοχή f_c , παρατηρήθηκε αρκετά καλή γραμμική συσχέτιση τόσο για την 1^η ομάδα συνθέσεων ($R^2 = 0,83$), όσο και για τη 2^η ομάδα συνθέσεων ($R^2 = 0,84$). Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα των **Kanellopoulos, Petrou και Ioannou (2012)**, οι οποίοι σε σύνολο 6 μίγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με διαφορετικούς w/b λόγους, παρατήρησαν πολύ καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής και της τριχοειδούς απορρόφησης ($R^2 = 0,93$). Ομοίως, οι **Sidique και Kaur (2009)** σε μελέτη τους για τη διερεύνηση της επίδρασης της αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη (σε ποσοστά 5, 10 και 15%) στα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ζώνης του σκυροδέματος, παρατήρησαν ότι η τριχοειδής απορρόφηση και η θλιπτική αντοχή συνδέονται με μία αντιστρόφως ανάλογη σχέση. Αντίθετα, οι **Ramezianpour και Bahrami (2012)** σε μελέτη τους για τη συμπεριφορά μιγμάτων σκυροδέματος με μετακαολίνη (για ποσοστά αντικατάστασης 0, 10, 12,5 και 15% και λόγους w/b 0,35, 0,4 και 0,5), παρατήρησαν μία σχέση εκθετικής μορφής περιγράφει καλύτερα τη συσχέτιση ανάμεσα στα αποτελέσματα της τριχοειδούς απορρόφησης και της θλιπτικής αντοχής ($R^2 = 0,87$). Στην παρούσα εργασία, αν θεωρηθεί σύμφωνα και με τους **Ramezianpour και Bahrami (2012)**, ότι τα δύο μεγέθη συνδέονται εκθετικά, προκύπτουν συντελεστές συσχέτισης: $R^2 = 0,83$ για την 1^η ομάδα συνθέσεων και $R^2 = 0,86$ για τη 2^η ομάδα συνθέσεων, τιμές αντίστοιχες με αυτές που προέκυψαν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης.

5.7.2 Συσχέτιση του παράγοντα ανθεκτικότητας OP με τους παράγοντες ανθεκτικότητας $c_{w120} / \ln T / K$ και την θλιπτική αντοχή (f_c)

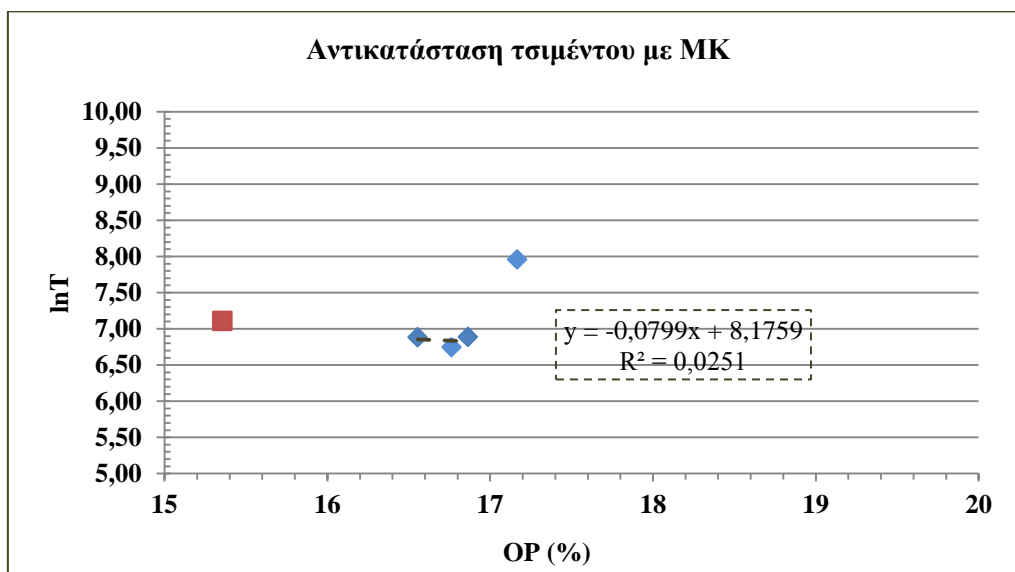
Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους διαγράμματα γραμμικής συσχέτισεως του ανοικτού πορώδους (ανεξάρτητη μεταβλητή), με τους υπόλοιπους παράγοντες ανθεκτικότητας (εξαρτημένες μεταβλητές).



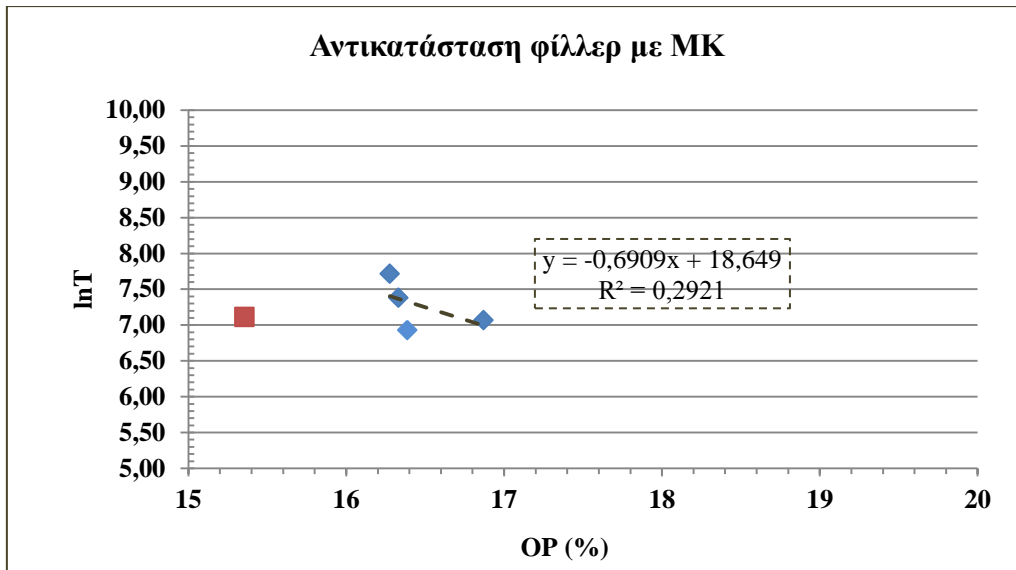
Σχήμα 44: Συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP (%) με το συντελεστή υδατοπερατότητας $c_{w120} (x 10^{-3})$ για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



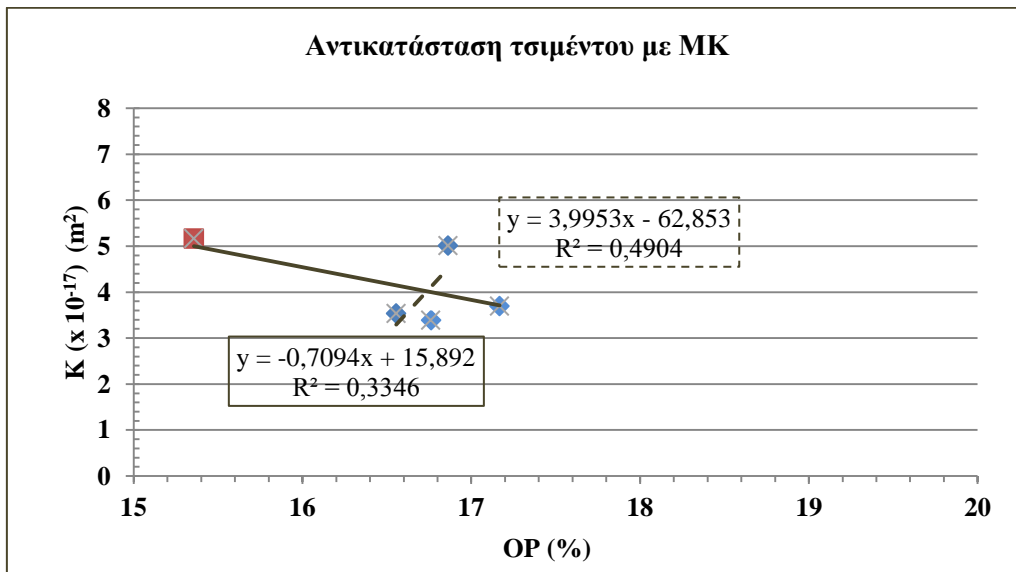
Σχήμα 45: Συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP (%) με το συντελεστή υδατοπερατότητας $c_{w120} (x 10^{-3})$ για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



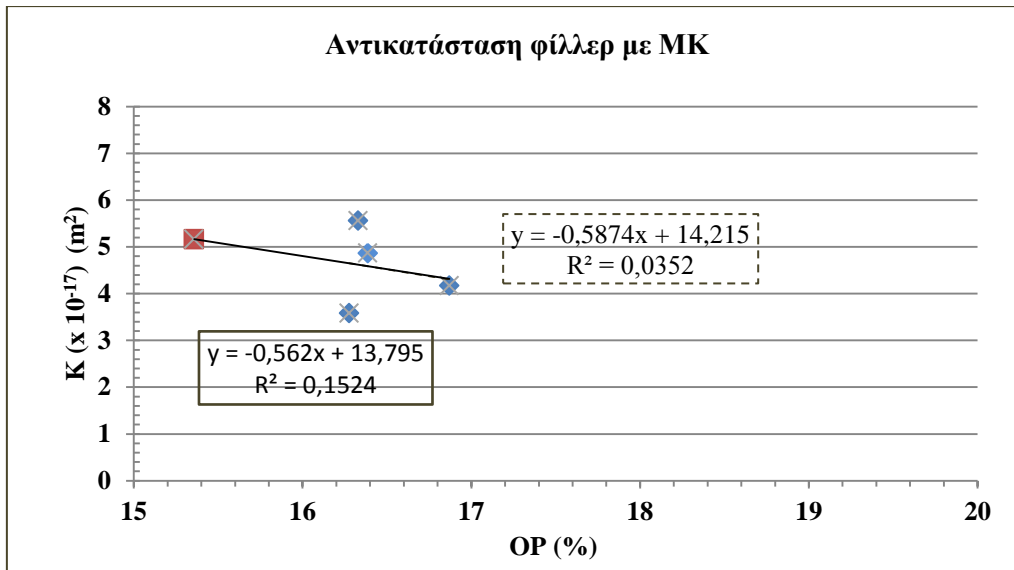
Σχήμα 46: Συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP (%) με το χρόνο εξίσωσης πίεσης lnT για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



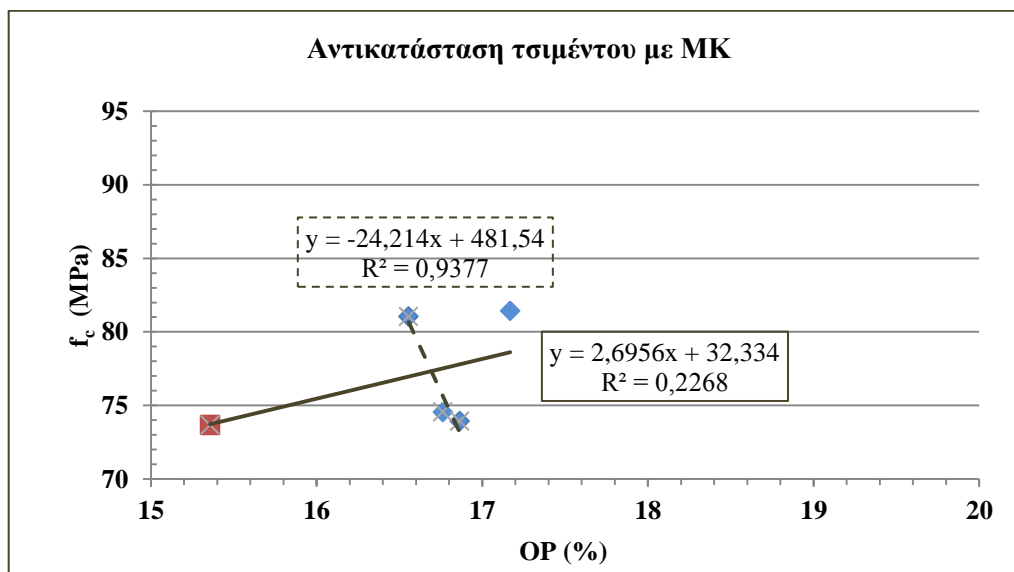
Σχήμα 47: Συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP (%) με το χρόνο εξίσωσης πίεσης lnT για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



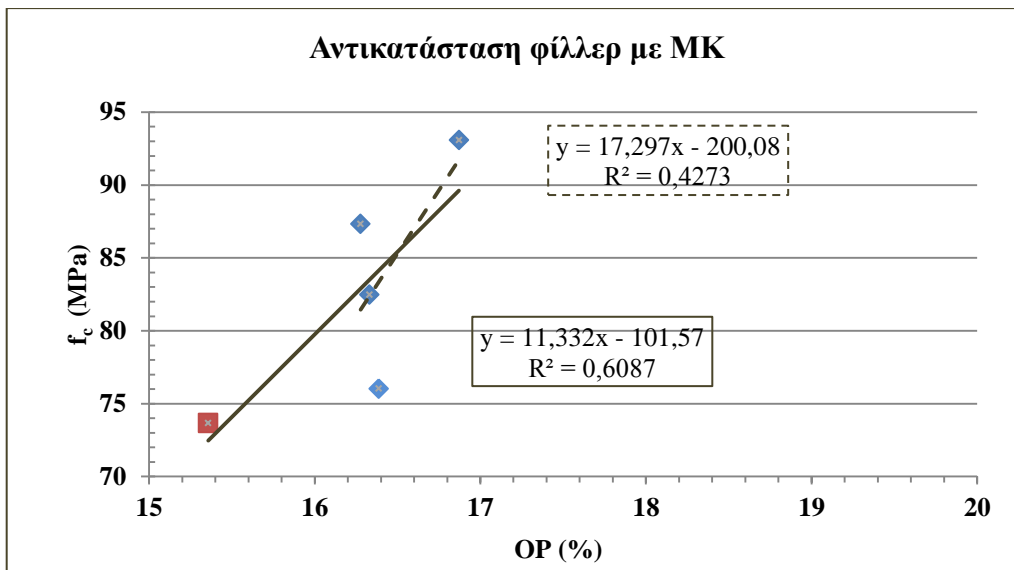
Σχήμα 48: Συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP (%) με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K (x 10⁻¹⁷) (m²) για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 49: Συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP (%) με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K (x 10⁻¹⁷) (m²) για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 50: Συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP (%) με τη θλιπτική αντοχή f_c (MPa) για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 51: Συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP (%) με τη θλιπτική αντοχή f_c (MPa) για την 2^η ομάδα συνθέσεων.

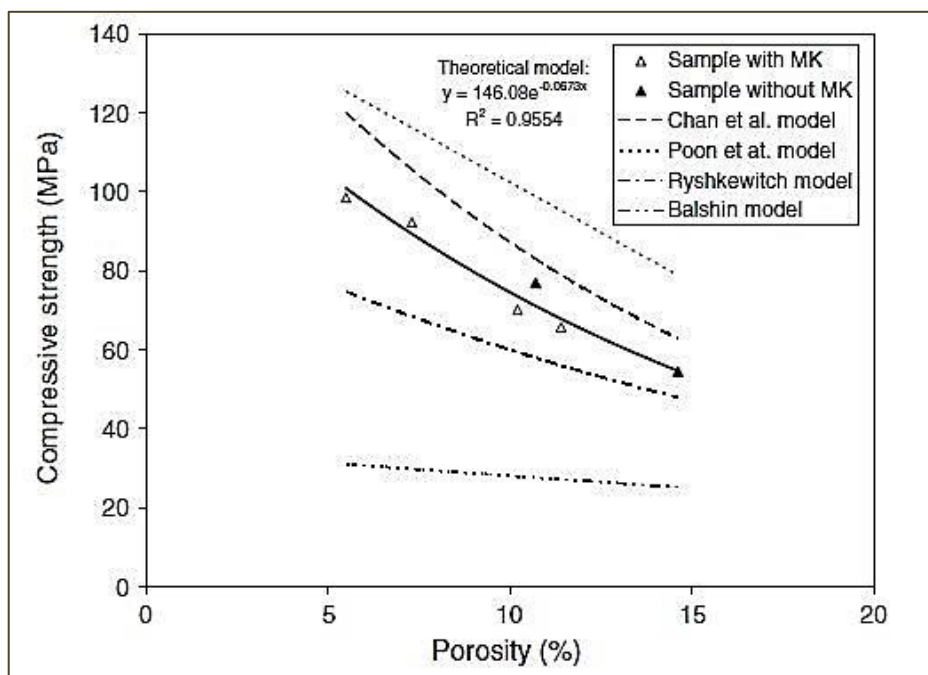
Σημειώνεται ότι στα επιμέρους διαγράμματα παρουσιάζονται οι ευθείες γραμμικής συσχέτισης και οι αντίστοιχοι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης που αντιστοιχούν α) στο σύνολο των ζευγών των μετρήσεων για κάθε ομάδα σύνθεσης (συνεχής γραμμή) και β) στα ζεύγη των τιμών των μετρήσεων, μετά από την απόρριψη συγκεκριμένων τιμών (διακεκομμένη γραμμή). Όπως παρατηρήθηκε και στην §5.7.2, το πορώδες που αντιστοιχεί στη σύνθεση SCC – 01 (αμιγές ΑΣΣ), κρίθηκε χαμηλότερο από το αναμενόμενο, και για το λόγο αυτό θεωρήθηκε ενδεχομένως εσφαλμένο. Ομοίως, η τιμή του πορώδους της σύνθεσης SCC – 05 (ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου ίσο με 20%), θεωρήθηκε υψηλότερη από το αναμενόμενο.

Όσον αφορά στη συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP με το συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} και το χρόνο εξίσωσης πίεσης $\ln T$, παρατηρείται ότι η απόρριψη των προαναφερθέντων τιμών οδηγεί σε βελτίωση της κλίσης της ευθείας της γραμμικής παλινδρόμησης, ωστόσο, οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης παραμένουν αρκετά χαμηλοί.

Όσον αφορά στη συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K, δεν παρατηρείται καλή γραμμική συσχέτιση. Θεωρητικά, πιθανόν δεν αναμένεται καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών, καθώς τόσο μέσο μεταφοράς, όσο και οι τιμές των πιέσεων που εφαρμόζονται στα δύο πειράματα διαφέρουν, διαφοροποιώντας αντίστοιχα

Τέλος, όσον αφορά στη συσχέτιση του ανοικτού πορώδους OP με τη θλιπτική αντοχή f_c , παρατηρούμε ότι για την 1^η ομάδα συνθέσεων, μετά την απόρριψη των ζευγών των τιμών που προαναφέρθηκαν, προκύπτει αύξηση της θλιπτική αντοχής με τη μείωση του πορώδους ($R^2 = 0,94$). Αντιθέτως, για τη 2^η ομάδα συνθέσεων, παρατηρείται ότι η αύξηση της θλιπτικής αντοχής, συνοδεύεται από την αύξηση του ανοικτού πορώδους, γεγονός που δεν κρίνεται αναμενόμενο.

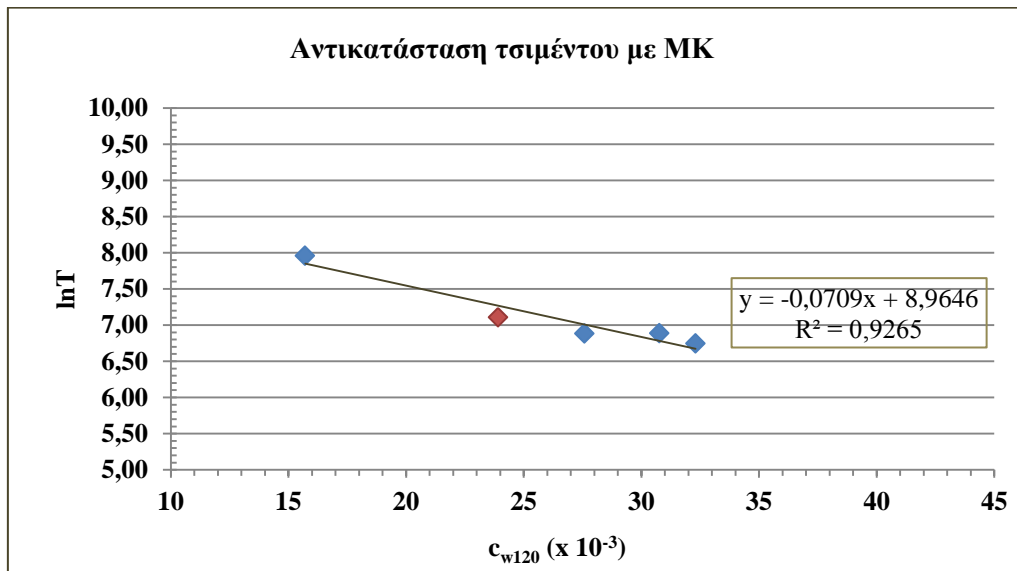
Σημειώνεται ότι οι **Güneyisi, Gesog'lu και Mermerdas (2007)** σε μελέτη τους για την επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη (σε ποσοστά 10 και 20% και λόγους w/b 0,35 και 0,55), διαπίστωσαν ότι η θλιπτική αντοχή και το πορώδες που μετρήθηκε με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας υδραργύρου (mercury intrusion porosimetry) συνδέονταν με μια σχέση εκθετικής μορφής. Από την εν λόγω έρευνα, παρατίθεται και το διάγραμμα του πορώδους συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα τις καμπύλες συσχέτισης και άλλων ερευνητών. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι με την ποροσιμετρία υδραργύρου εκτιμάται ποιοτικά και ποσοτικά το συνολικό πορώδες (ανοικτό και τριχοειδές). Καθώς όμως προσδιορισμός του στηρίζεται σε διαφορετικό μηχανισμό (επιβολή πίεσης, τριχοειδής καθίζηση), τα αποτελέσματα του πορώδους μεταξύ των δύο μεθόδων, δεν συσχετίζονται. Συνεπώς και η μορφή της συσχέτισης μεταξύ θλιπτικής αντοχής και πορώδους αναμένεται να διαφέρει.



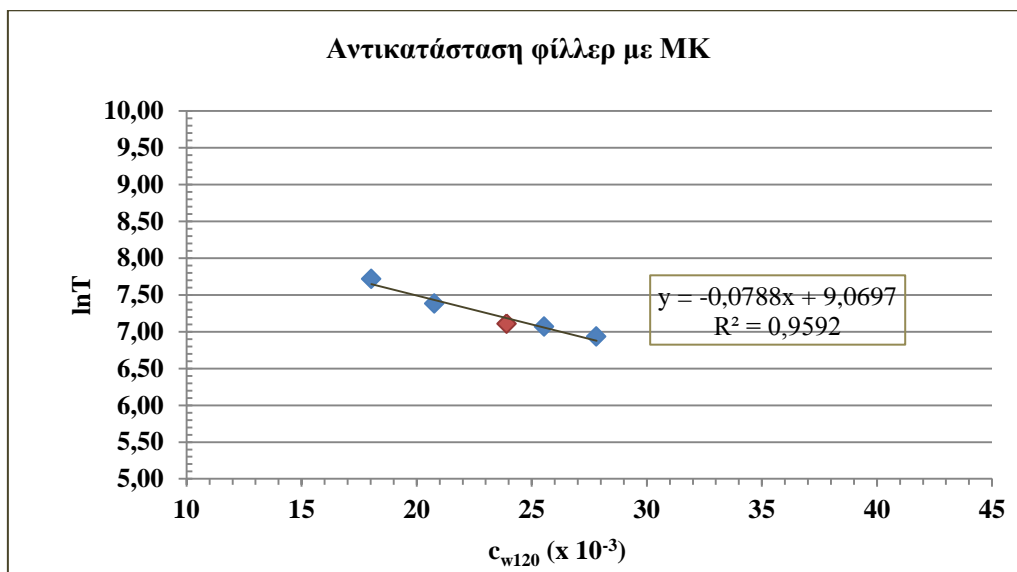
Σχήμα 52: Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του πορώδους σύμφωνα με τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών (Güneyisi, Gesog'lu and Mermerdas, 2008).

5.7.3 Συσχέτιση του παράγοντα ανθεκτικότητας c_{w120} με τους παράγοντες ανθεκτικότητας $\ln T / K$ και την θλιπτική αντοχή (f_c)

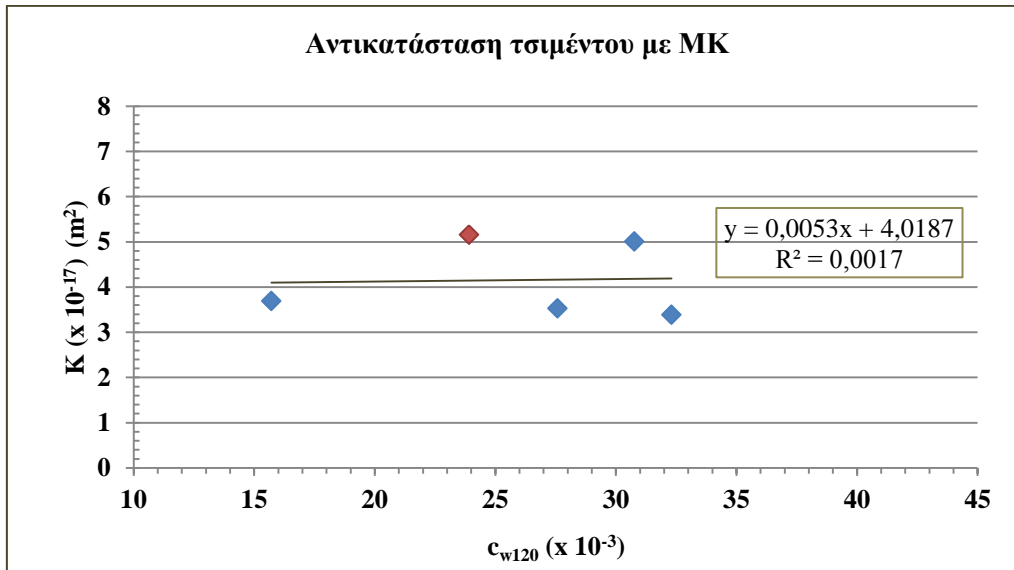
Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους διαγράμματα συσχέτισης του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} (ανεξάρτητη μεταβλητή), με τους υπόλοιπους παράγοντες ανθεκτικότητας (εξαρτημένες μεταβλητές).



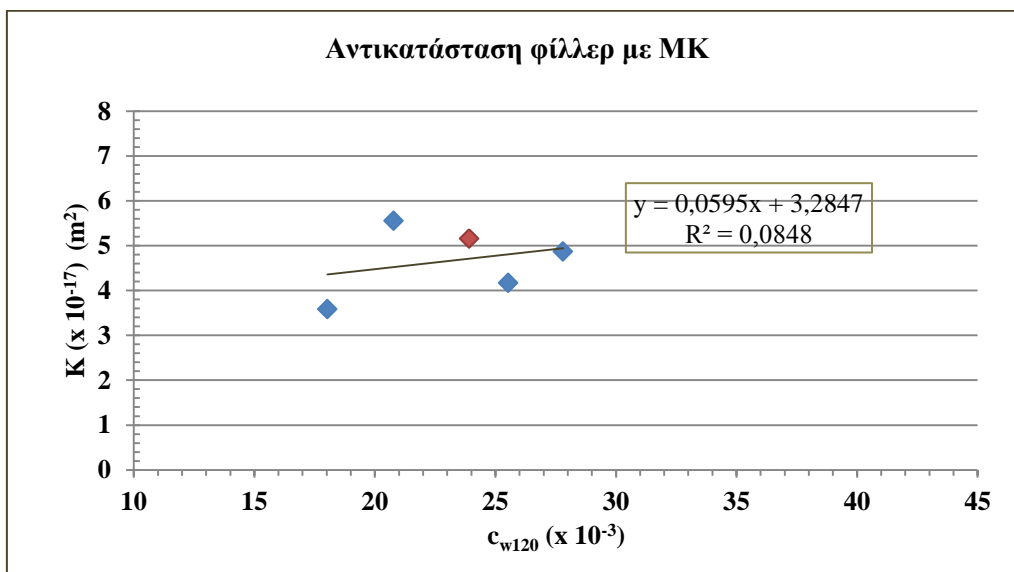
Σχήμα 53: Συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας $c_{w120} (x 10^{-3})$ με το χρόνο εξίσωσης πίεσης $\ln T$ για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



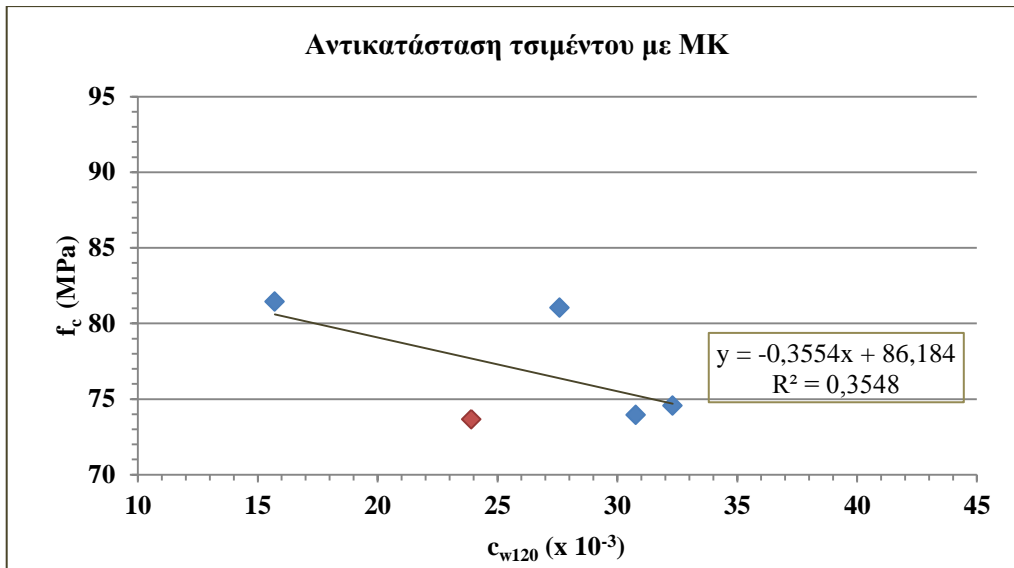
Σχήμα 54: Συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας $c_{w120} (x 10^{-3})$ με το χρόνο εξίσωσης πίεσης $\ln T$ για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



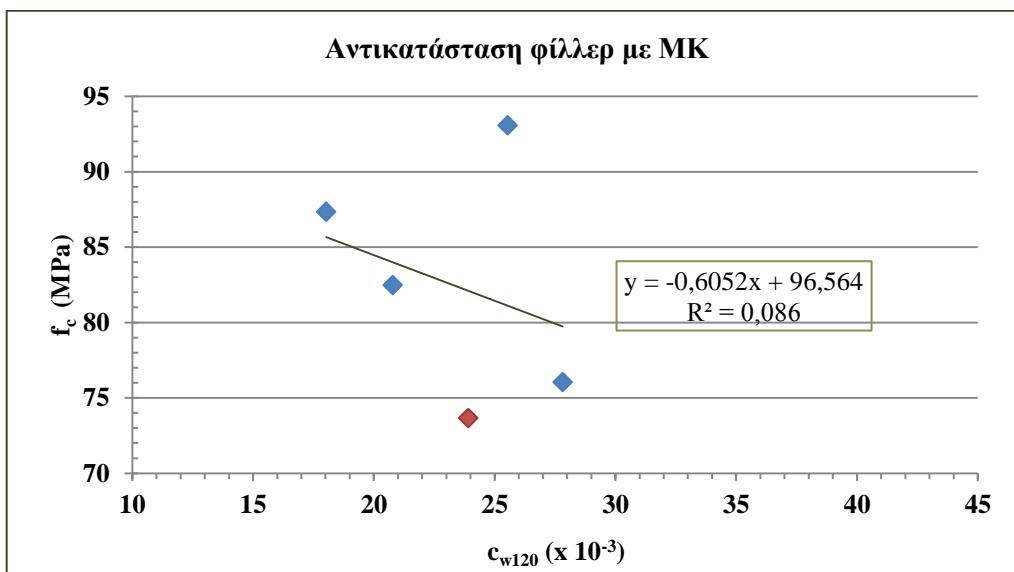
Σχήμα 55: Συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας $c_{w120} (x 10^{-3})$ με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα $K (x 10^{-17}) (m^2)$ για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 56: Συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας $c_{w120} (x 10^{-3})$ με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα $K (x 10^{-17}) (m^2)$ για την 2^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 57: Συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} ($x 10^{-3}$) με τη θλιπτική αντοχή f_c (MPa) για την 1^η ομάδα συνθέσεων.



Σχήμα 58: Συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} ($x 10^{-3}$) με τη θλιπτική αντοχή f_c (MPa) για την 2^η ομάδα συνθέσεων.

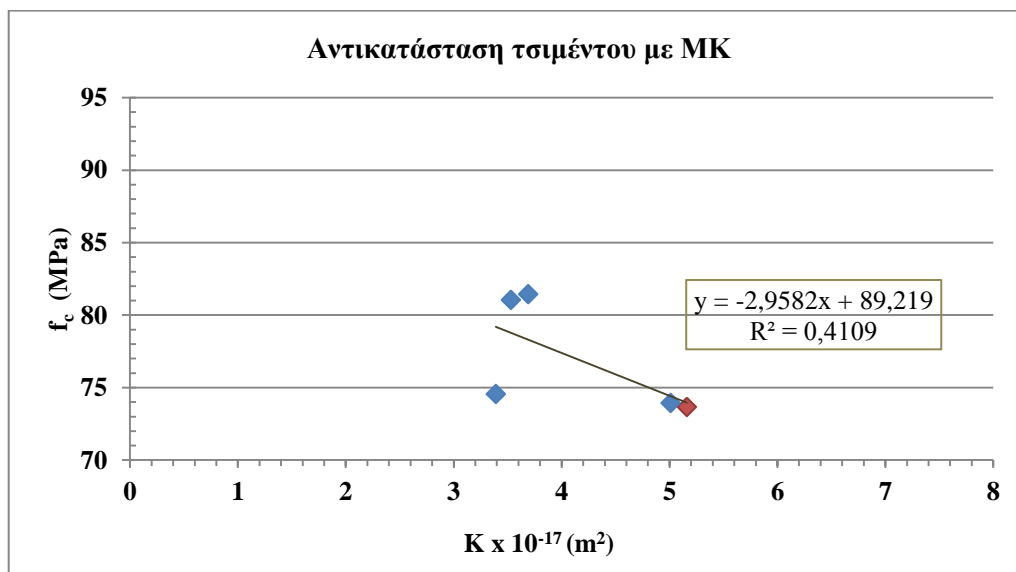
Όσον αφορά στη συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} με το χρόνο εξομοίωσης, παρατηρείται απόλυτη σχεδόν γραμμική συσχέτιση, όπως ήταν αναμενόμενο καθώς πρόκειται για δύο συντελεστές που προκύπτουν από την ίδια μέτρηση. Οι αντίστοιχοι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης προέκυψαν $R^2 = 0,93$ για την 1^η ομάδα συνθέσεων και $R^2 = 0,96$ για την 2^η ομάδα συνθέσεων.

Όσον αφορά στη συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} με το συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K , παρατηρείται μια μικρή αυξητική τάση του συντελεστή K , όσο αυξάνεται ο συντελεστής c_{w120} , παρότι η διασπορά των μετρήσεων κρίνεται μάλλον μεγάλη. Η ίδια τάση μεταβολής (αύξηση) των δύο συντελεστών δικαιολογείται θεωρητικά, διότι πρόκειται για την αξιολόγηση της ίδιας ιδιότητας του σκυροδέματος (διαπερατότητα). Ωστόσο, παρατηρείται μηδενική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών.

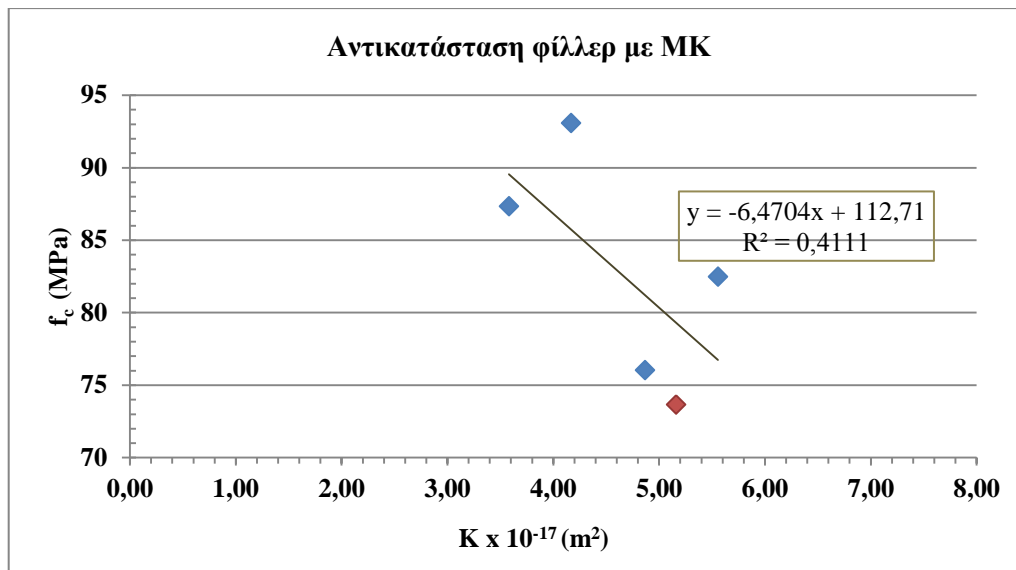
Τέλος, όσον αφορά στη συσχέτιση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} με τη θλιπτική αντοχή f_c , παρατηρείται μικρή γραμμική συσχέτιση για την 1^η ομάδα συνθέσεων ($R^2 = 0,35$), και μηδενική γραμμική συσχέτιση για την 2^η ομάδα συνθέσεων ($R^2 = 0,09$). Ωστόσο, και στις δύο ομάδες συνθέσεων, παρατηρείται ότι με αύξηση της θλιπτικής αντοχής, παρατηρείται μείωση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} , ακολουθείται από μία αντίστοιχη μείωση της θλιπτικής αντοχής.

5.7.4 Συσχέτιση του παράγοντα ανθεκτικότητας K με την θλιπτική αντοχή (f_c)

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους διαγράμματα συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K (ανεξάρτητη μεταβλητή), με τη θλιπτική αντοχή f_c (εξαρτημένη μεταβλητή).



Σχήμα 59: Συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K ($\times 10^{-17}$) (m^2) με τη θλιπτική αντοχή f_c (MPa) για την 1^η ομάδα συνθέσεων.

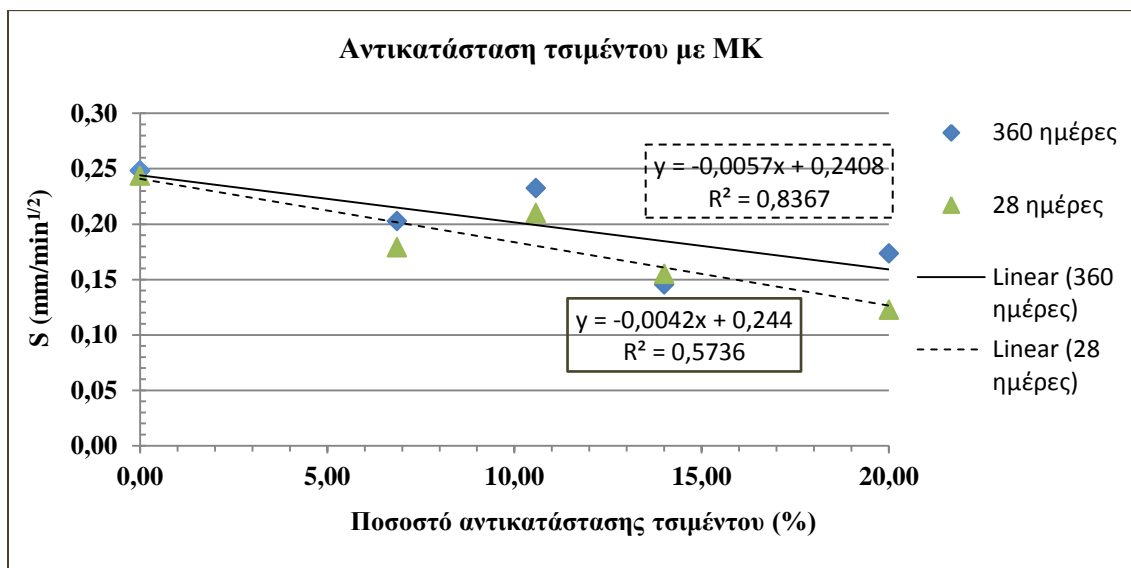


Σχήμα 60: Συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K ($x 10^{-17}$) (m^2) με τη θλιπτική αντοχή f_c (MPa) για την 2^η ομάδα συνθέσεων.

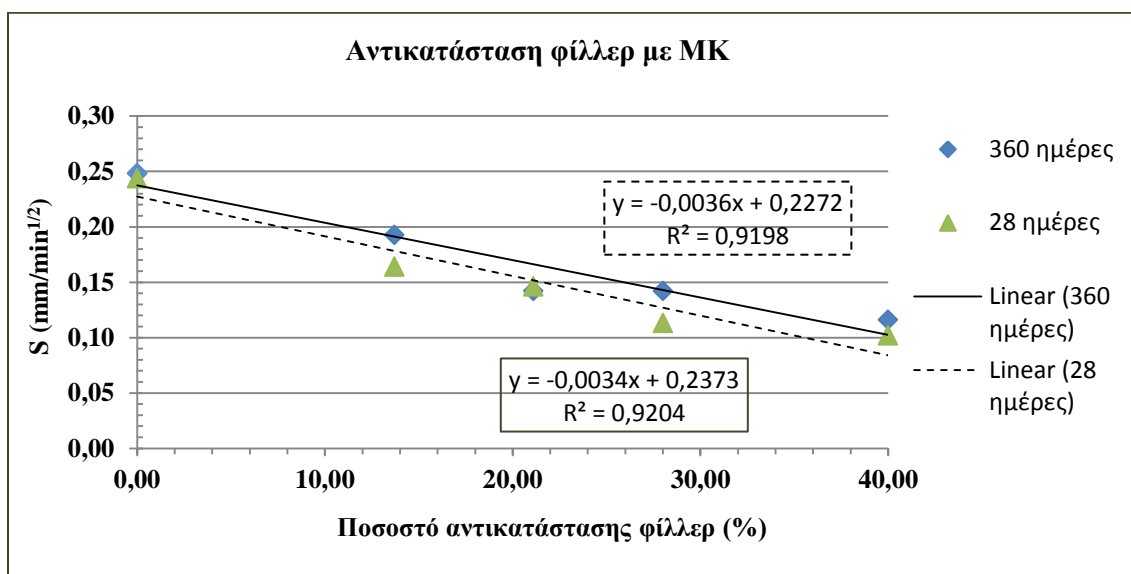
Όσον αφορά στη συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K με τη θλιπτική αντοχή f_c , παρατηρείται και στις δύο ομάδες συνθέσεων, ότι αυξάνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, όσο μειώνεται ο συντελεστής διαπερατότητας K . Οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης ανέρχονται σε $R^2 = 0,41$ και για τις δύο επιμέρους ομάδες συνθέσεων.

5.8 Επίδραση του χρόνου συντήρησης στις ιδιότητες ανθεκτικότητας και στην θλιπτική αντοχή

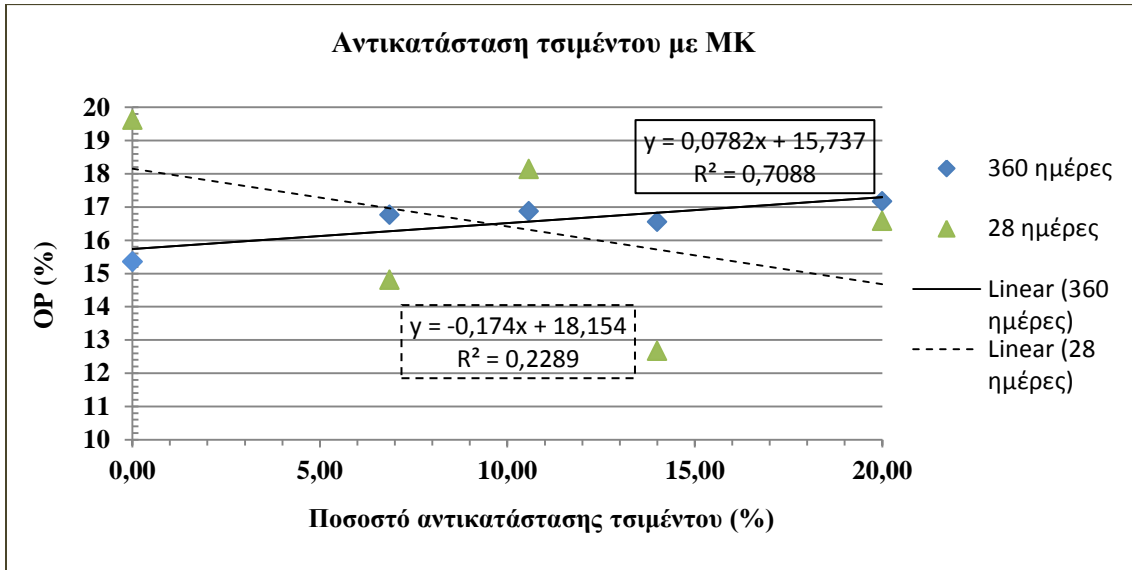
Στον παρόν κεφάλαιο επιχειρείται να εξεταστεί η επίδραση του χρόνου συντήρησης στις ιδιότητες της ανθεκτικότητας που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Για το σκοπό αυτό παρατίθενται τα διαγράμματα της κάθε επιμέρους ιδιότητας, όπως αυτά προέκυψαν για χρόνο συντήρησης στο νερό ίσο με α) 28 ημέρες και β) 360 ημέρες. ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη - mk/cem (1^η Ομάδα Συνθέσεων), όσο και ως προς το ποσοστό αντικατάστασης του φύλλερ με μετακαολίνη - mk/lp20 (2^η Ομάδα Συνθέσεων). Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρθηκε ήδη στην §4.1 ,τα αποτελέσματα των 28 ημερών προέρχονται από τη διπλωματική εργασία των **Μακρής και Σμαργιανάκη (2012)**, ενώ τα αποτελέσματα των 360 ημερών αφορούν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.



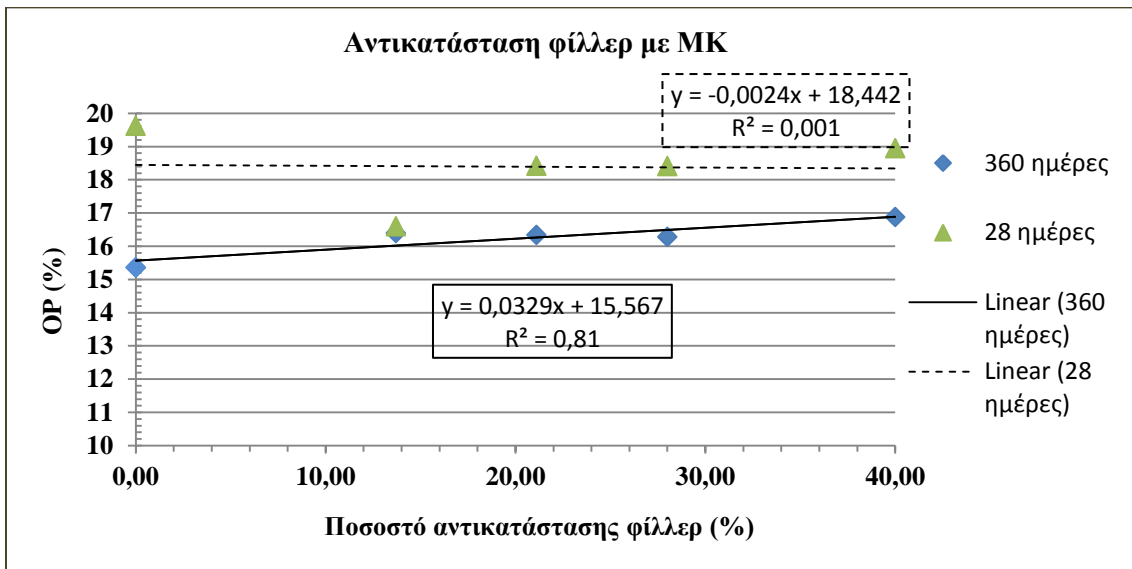
Σχήμα 61: Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min^{1/2}) ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



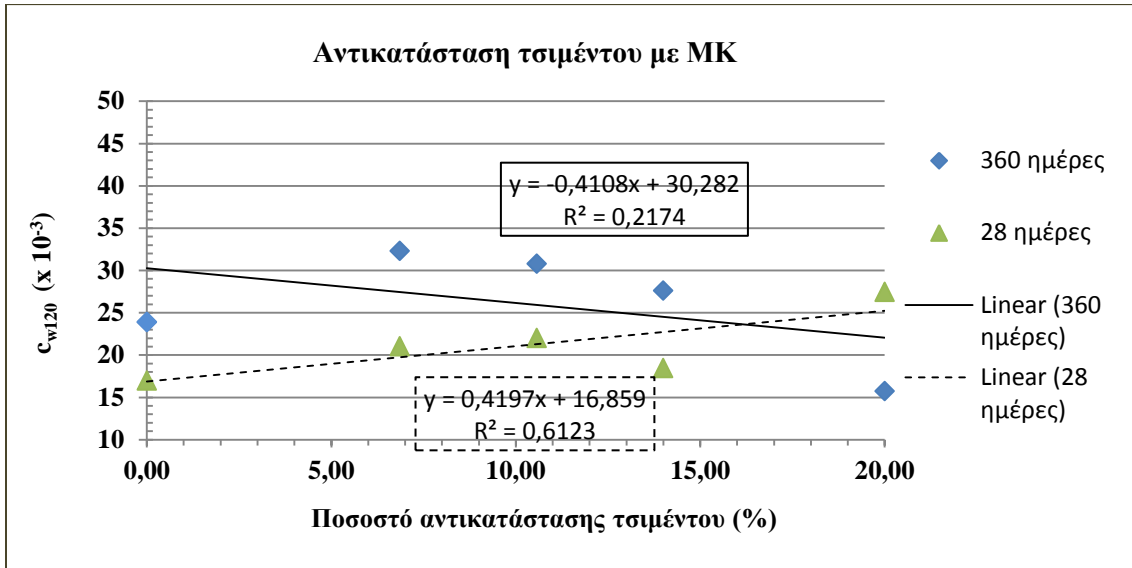
Σχήμα 62: Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min^{1/2}) ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



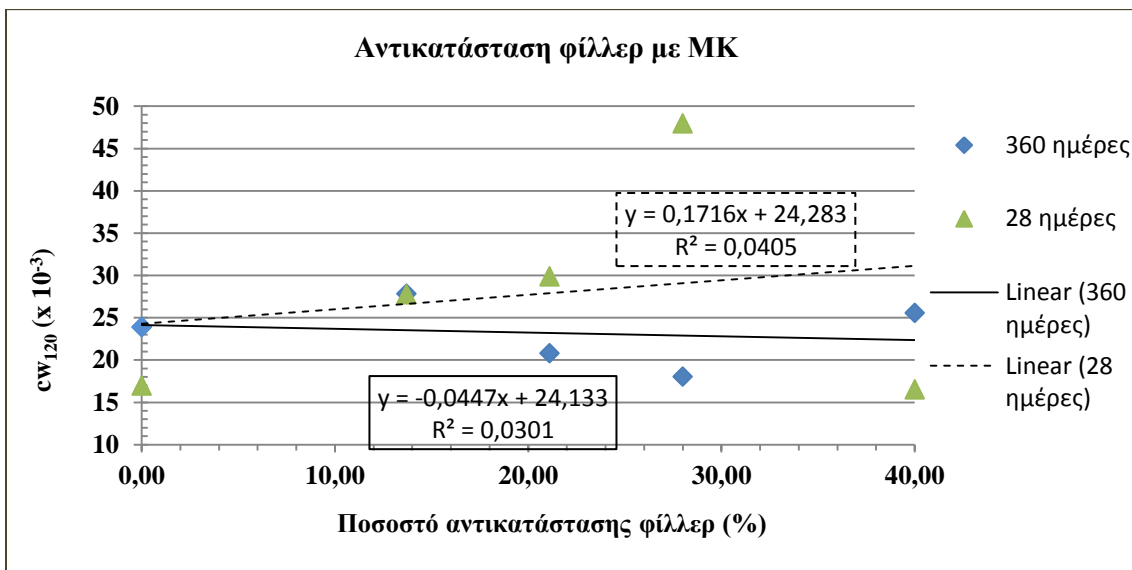
Σχήμα 63: Ανοικτό πορώδες OP (%) ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



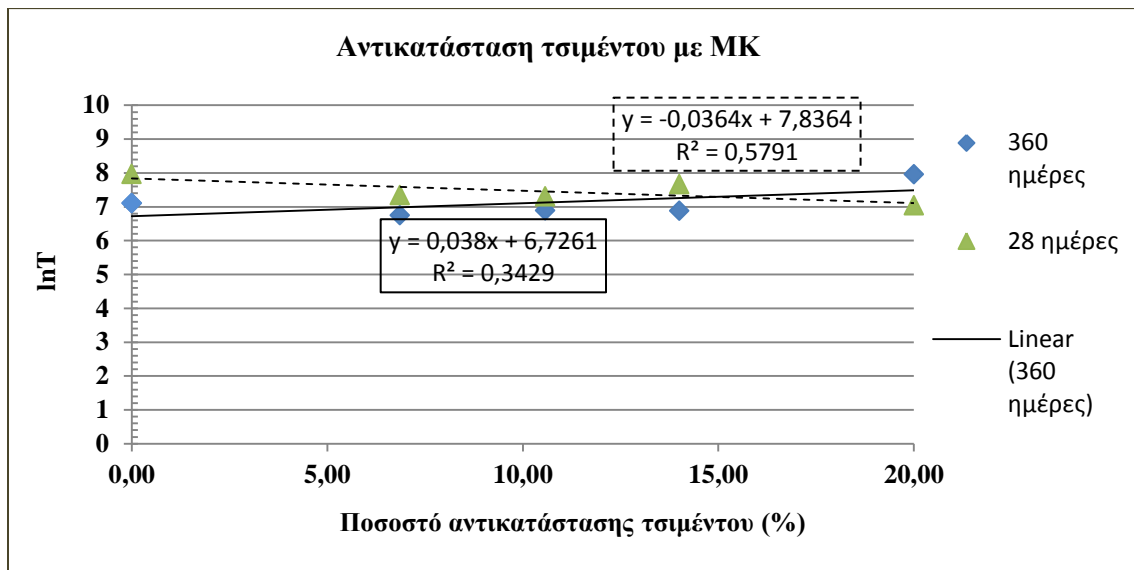
Σχήμα 64: Ανοικτό πορώδες OP (%) ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



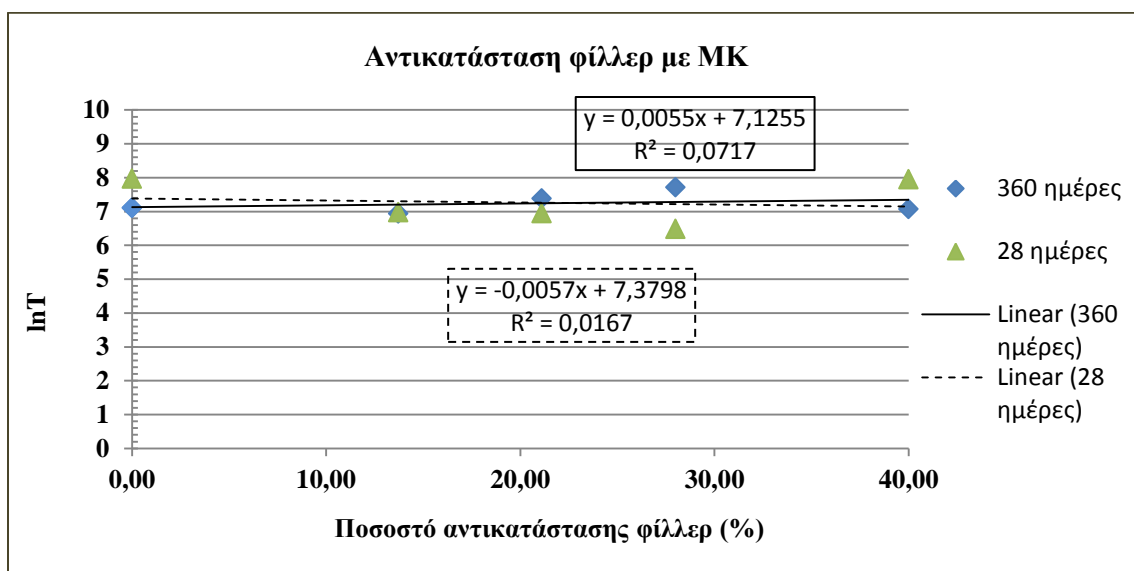
Σχήμα 65: Συντελεστής υδατοπερατότητας c_{w120} ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



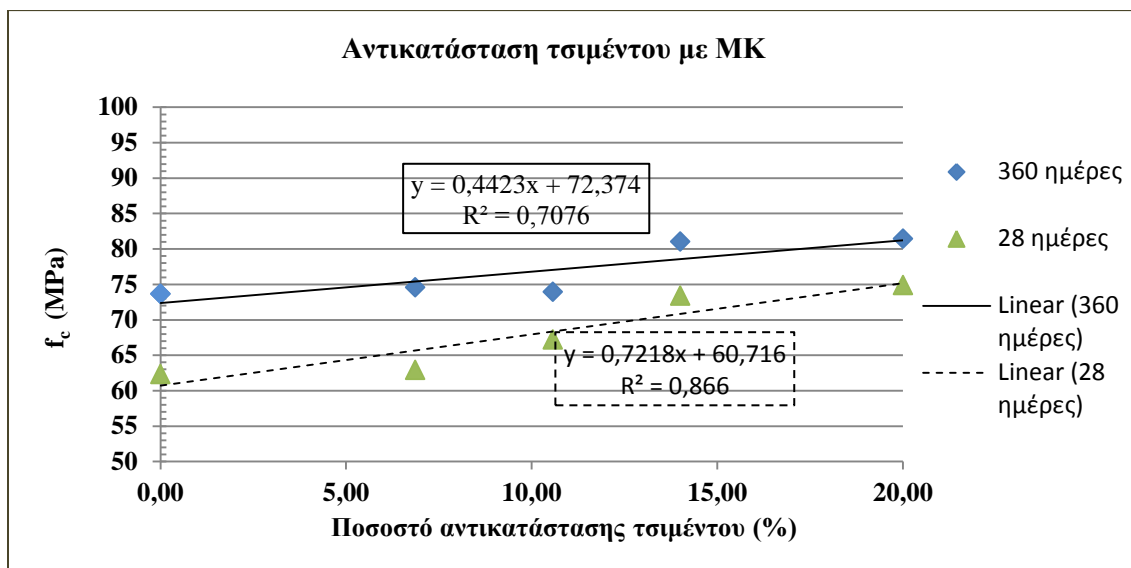
Σχήμα 66: Συντελεστής υδατοπερατότητας c_{w120} ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φύλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



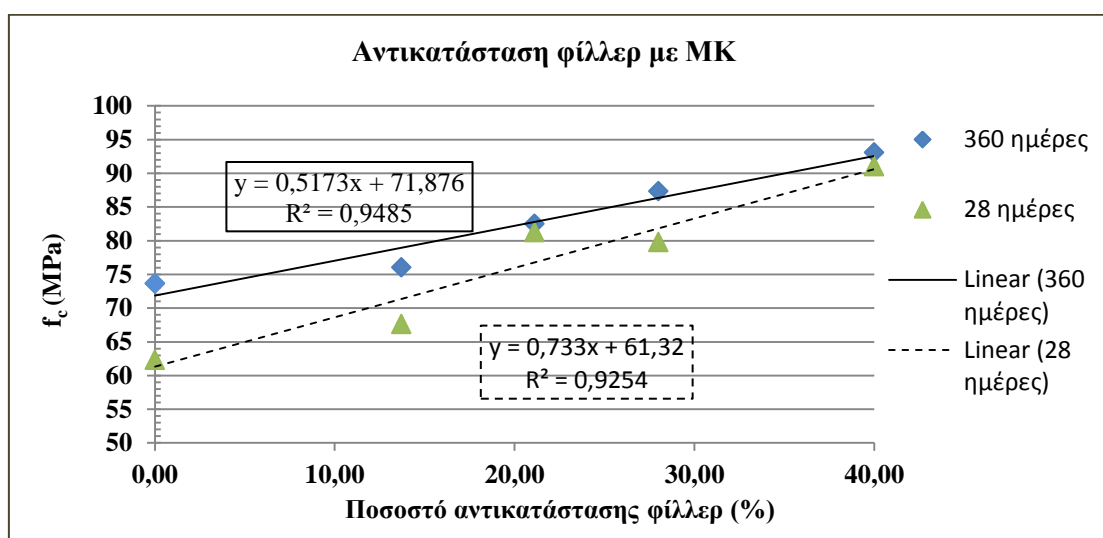
Σχήμα 67: Χρόνος εξίσωσης πίεσης lnT ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



Σχήμα 68: Χρόνος εξίσωσης πίεσης lnT ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



Σχήμα 69: Θλιπτική αντοχή f_c (MPa) ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη (%mk/cem) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.



Σχήμα 70: Θλιπτική αντοχή f_c (MPa) ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη (%mk/lp20) και τη διάρκεια συντήρησης των δοκιμίων.

Εν συνεχεία παρατίθεται ο Πίνακας 14, στον οποίο φαίνεται το ποσοστό μεταβολής των τιμών κάθε ιδιότητας ανθεκτικότητας για κάθε σύνθεση, όπως αυτές μετρήθηκαν στα δοκίμια ηλικίας 360 ημερών σε σύγκριση με τα δοκίμια ίδιων συνθέσεων ηλικίας 28 ημερών.

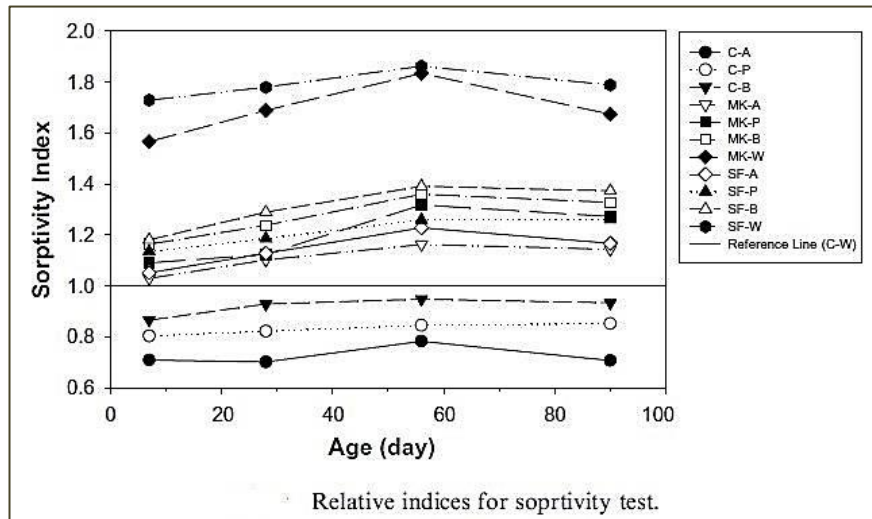
Πίνακας 14: Ποσοστά μεταβολής των τιμών των ιδιοτήτων της ανθεκτικότητας των 360 ημερών, ως προς τις 28 μέρες.

Χαρακτηριστικά Σύνθεσης					Ιδιότητα ανθεκτικότητας				
Σύνθεση		(% προσθήκης MK (κ.β.))		Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min ^{1/2})	Ανοικτό πορώδες OP (%)	Συντελεστής υδατοπερατότητας $c_{w120}(x 10^{-3})$	Χρόνος εξίσωσης πίεσης lnT	Θλιπτική αντοχή f_c (Mpa)	
		mk/ce m	mk/lp 20	Ποσοστό μεταβολής S των 360 ημερών ως προς τις 28 ημέρες	Ποσοστό μεταβολής OP των 360 ημερών ως προς τις 28 ημέρες	Ποσοστό μεταβολής c_{w120} των 360 ημερών ως προς τις 28 ημέρες	Ποσοστό μεταβολής lnT των 360 ημερών ως προς τις 28 ημέρες	Ποσοστό μεταβολής f_c των 360 ημερών ως προς τις 28 ημέρες	
	Σ170	SCC-01	0	0	1,96	-21,73	40,95	-10,80	18,25
1η Ομάδα	Σ161	SCC-02	6,86	-	13,28	13,18	53,63	-8,07	18,52
	Σ164	SCC-03	10,57	-	10,75	-7,03	39,87	-5,65	10,02
	Σ163	SCC-04	14,00	-	-6,16	30,67	49,43	-10,15	10,40
	Σ165	SCC-05	20,00	-	41,46	3,55	-42,72	13,04	8,72
2η Ομάδα	Σ166	SCC-06	-	13,71	17,47	-1,23	0,27	-0,56	12,43
	Σ168	SCC-07	-	21,10	-2,82	-11,29	-30,46	6,33	1,52
	Σ167	SCC-08	-	28,00	25,52	-11,54	-62,41	19,05	9,48
	Σ169	SCC-09	-	40,00	13,85	-10,93	54,70	-11,13	2,24
	Σ171	NVC-01	0	0	6,63	-10,46	-23,93	3,68	15,28
	Σ172	NVC-02	0	0	-32,02	-7,61	28,11	-7,46	14,11

Από τα συγκριτικά διαγράμματα της τριχοειδούς απορρόφησης S στις 28 και στις 360 ημέρες, παρατηρείται:

- η ιδιότητα της τριχοειδούς απορρόφησης πρακτικά έχει παραμείνει αμετάβλητη. Στην 1^η ομάδα συνθέσεων, παρατηρείται αρκετά καλή γραμμική συσχέτιση στις 28 ημέρες ($R^2=0,84$) και σχετικά καλή γραμμική συσχέτιση στις 360 ημέρες ($R^2=0,57$). Στην 2^η ομάδα συνθέσεων, παρατηρείται πολύ καλή γραμμική συσχέτιση στα δεδομένα που αφορούν τόσο στις 28, όσο και στις 360 ημέρες ($R^2=0,92$). Οι **Razak, Chai και Wong (2004)** σε μελέτη τους εξέτασαν την επίδραση της προσθήκης μετακαολίνη και της πυριτικής παιπάλης σε ποσοστό αντικατάστασης 10%, και μέτρησαν την τριχοειδή απορρόφηση για διαφορετικά χρονικά διαστήματα συντήρησης και διαφορετικές μεθόδους συντήρησης (νερό-W, βρεγμένη λινάτσα-B, πλαστικό φύλλο-P και αέρα-A). Παρατηρήθηκε ότι για το μίγμα με μετακαολίνη και τη συντήρηση στο νερό (καμπύλη MK-W), αύξηση του χρόνου συντήρησης από 7 σε 56 ημέρες οδήγησε σε μικρή αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης, ενώ για συντήρηση έως και 90 ημέρες παρατηρήθηκε εκ νέου μείωση του δείκτη τριχοειδούς απορρόφησης. Οι **Ramezaniapour και Bahrami (2012)** σε μελέτη τους για την επίδραση του μετακαολίνη στο σκυρόδεμα (σε ποσοστά αντικατάστασης 0, 10, 12,5 και 15% και λόγους w/b 0,35, 0,4 και 0,5), παρατήρησαν ότι η αύξηση του χρόνου συντήρησης από 7 σε 180 ημέρες, οδήγησε

σε μείωση του δείκτη τριχοειδούς απορρόφησης, μείωση που ήταν πιο σημαντική για $w/b = 0,5$ (-55% για τα ποσοστά αντικατάστασης 10 και 12%).



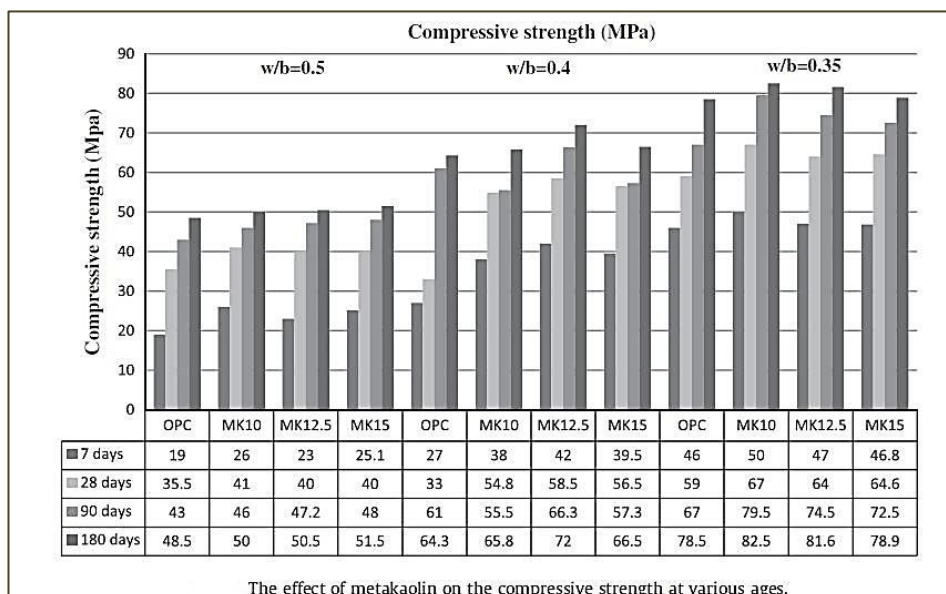
Σχήμα 71: Μεταβολή της τριχοειδούς απορρόφησης συναρτήσει της χρονικής διάρκειας συντήρησης, σύμφωνα με τους Razak, Chai και Wong, 2004.

- Όσον αφορά στην ιδιότητα του ανοικτού πορώδους OP για την 1η ομάδα συνθέσεων, παρατηρούμε ότι στις 28 ημέρες διακρίνεται μια συνολικά πτωτική τάση του ανοικτού πορώδους με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη. Η τάση αυτή, ωστόσο, χαρακτηρίζεται από μεγάλη διακύμανση των αποτελεσμάτων. Για τις 360 ημέρες η τάση αυτή είναι συνολικά αυξητική. Αν θεωρήσουμε, ωστόσο, ότι η τιμή του ανοικτού πορώδους για τη σύνθεση SCC- 01 είναι χαμηλότερη από όσο αναμενόταν και ενδεχομένως εσφαλμένη και η τιμή της σύνθεσης SCC- 05 ίσως μεγαλύτερη από το αναμενόμενο, όπως αναφέρθηκε και στην §5.7.2, η τάση που προκύπτει δείχνει ότι μάλλον δεν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή του πορώδους στην ηλικία των 360 ημερών. Στη 2^η ομάδα συνθέσεων, παρατηρούμε ότι οι τιμές του ανοικτού πορώδους που μετρήθηκαν στις 360 ημέρες είναι εν γένει χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές στις 28 ημέρες, υποδηλώνοντας ποιοτικά βελτίωση του ανοικτού πορώδους με την αύξηση του χρόνου συντήρησης. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι σε ένα σχετικά υψηλό ποσοστό προσθήκης του MK, απαιτείται σαφώς περισσότερος χρόνος (>28 ημέρες) προκειμένου να ολοκληρωθούν οι ποζολανικές αντιδράσεις, συγκριτικά με την 1η ομάδα συνθέσεων. Ομοίως, και στη 2^η ομάδα συνθέσεων μπορούμε να παρατηρήσουμε στις 360 ημέρες ότι για ποσοστά αντικατάστασης 13,71% - 28,00%, παρατηρείται μια μικρή πτωτική τάση του πορώδους, ενώ

συνολικά δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές του πορώδους, όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης.

- Όσον αφορά στην ιδιότητα της υδατοπερατότητας, παρατηρούμε μια συνολικά πτωτική τάση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη. (αντιθέτως, για τα αποτελέσματα των 28 ημερών, είχε καταγραφεί μια συνολικά αυξητική τάση). Παράλληλα, παρατηρείται ότι οι τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} που μετρήθηκαν στις 360 ημέρες, είναι συνολικά υψηλότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές των 28 ημερών, με εξαίρεση την τιμή της σύνθεσης SCC-05 (ποσοστό αντικατάστασης mk/cem ίσο με 20%), όπου παρατηρείται βελτίωση της υδατοπερατότητας. Όσον αφορά στην 2^η ομάδα συνθέσεων, παρατηρείται επίσης πτωτική τάση του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} στις 360 ημέρες, η οποία είναι πιο χαρακτηριστική μεταξύ των ποσοστών αντικατάστασης mk/lp20 13,71% - 28,00% (στις 28 ημέρες είχε καταγραφεί μεγάλη διακύμανση αποτελεσμάτων). Όσον αφορά στο χρόνο εξίσωσης πίεσης lnT που μετρήθηκε για τα δύο επιμέρους χρονικά διαστήματα συντήρησης των δοκιμών (28-360 ημέρες), παρατηρούμε ότι στην 1^η ομάδα συνθέσεων, σημειώνεται μικρή μεταβολή των αποτελεσμάτων. Στα αποτελέσματα των 360 ημερών, παρατηρείται αύξηση του χρόνου εξίσωσης πίεσης, όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη, γεγονός που συνάδει και με τις αντίστοιχες μετρήσεις του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} . Όμοια τάση παρατηρείται και στις 28 ημέρες, μεταξύ των ποσοστών αντικατάστασης 6,86% - 14,00%. Στη 2^η ομάδα συνθέσεων, παρατηρείται και πάλι πολύ μικρή μεταβολή των αποτελεσμάτων ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο επιμέρους χρονικών διαστημάτων συντήρησης των δοκιμών. Η μεγαλύτερη διαφορά στο χρόνο εξίσωσης πίεσης lnT παρατηρείται στη σύνθεση SCC-08 (ποσοστό αντικατάστασης mk/lp20 ίσο με 28,00%), η οποία ωστόσο είναι μικρότερη από την αντίστοιχη διαφορά των συντελεστών υδατοπερατότητας c_{w120} , που μετρήθηκαν για την ίδια σύνθεση. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας c_{w120} που μετρήθηκε στη σύνθεση SCC-08 στις 28 ημέρες ($c_{w120} = 47,97 \times 10^{-3}$), είναι πιθανόν υψηλότερη από το αναμενόμενο και ενδεχομένως εσφαλμένη. Πάντως συγκρίνοντας τις τιμές των 2 αυτών χαρακτηριστικών μεγεθών που εκφράζουν την διαπερατότητα σε νερό, παρατηρείται μικρή βελτίωση την αντίστασης στη διαπερατότητα σε νερό, για τα δοκίμια σκυροδέματος των 360 ημερών.
- Τέλος, όσον αφορά στη θλιπτική αντοχή f_c , παρατηρούμε ότι τόσο στις 28, όσο και στις 360 ημέρες για την 1^η ομάδα συνθέσεων, σημειώνεται αύξηση της θλιπτικής αντοχής, όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη. Η τάση αυτή μπορεί να θεωρηθεί με πολύ καλή προσέγγιση γραμμική ($R^2 = 0,87$ για τις 28 ημέρες και $R^2 = 0,71$ για τις 360 ημέρες). Παράλληλα, παρατηρείται ότι τα δοκίμια που είχαν συντηρηθεί 360 ημέρες στο νερό, έδωσαν υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής, συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα

δοκίμια των 28 ημερών. Όμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στη 2^η ομάδα συνθέσεων, όπου παρουσιάζεται πολύ καλή γραμμική συσχέτιση και για τα δύο επιμέρους χρονικά διαστήματα συντήρησης των δοκιμίων ($R^2= 0,93$ για τις 28 ημέρες και $R^2= 0,93$ για τις 360 ημέρες). Οι αυξημένες τιμές θλιπτικής αντοχής που παρατηρήθηκαν και στη 2^η ομάδα συνθέσεων για τα δοκίμια των 360 ημερών, υποδηλώνουν εν γένει ότι η αύξηση της διάρκειας συντήρησης των δοκιμίων με μετακαολίνη, οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από πλήθος αποτελεσμάτων στη βιβλιογραφία. Οι **Guneyisi, Gesog˘lu και Mermerdas (2008)**, σε μελέτη τους για την επίδραση του μετακαολίνη στο συμβατικό σκυρόδεμα (σε ποσοστά αντικατάστασης 0, 10 και 20% και λόγους w/b 0,35 και 0,55), παρατήρησαν ότι όσο αυξάνεται η διάρκεια συντήρησης του σκυροδέματος (από 1 έως 120 ημέρες), παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος της τάξης του 30%. Ομοίως, οι **Ramezianpour και Bahrami (2012)** σε μελέτη τους για την επίδραση του μετακαολίνη στο σκυρόδεμα (σε ποσοστά αντικατάστασης 0, 10, 12,5 και 15% και λόγους w/b 0.35, 0.4 και 0.5), παρατήρησαν ότι η αύξηση του χρόνου συντήρησης από 7 σε 180 ημέρες, οδήγησε σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της εν λόγω μελέτης που παρατίθεται:



Σχήμα 72: Επίδραση του χρόνου στη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με μετακαολίνη, σύμφωνα με τους **Ramezianpour και Bahrami, 2012.**

Τέλος, οι **Madandoust και Mousavi (2012)**, μελέτησαν τις ιδιότητες του νεπού και σκληρυμένου ΑΣΣ παρασκευάζοντας 15 μίγματα με διαφορετικά ποσοστά μετακαολίνη (0, 5, 10, 15, 20% του βάρους του τσιμέντου) και 3 διαφορετικούς λόγους νερού/τσιμέντο (0,32, 0,48 και 0,52).

Παρατήρησαν ότι η αύξηση του χρόνου συντήρησης έως και 60 ημέρες, οδήγησε σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής έως και 27%.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτέλεσε η μελέτη της επίδρασης της προσθήκης μετακαολίνη σε συνθέσεις αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, στις ιδιότητες του σκυροδέματος που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα, και πιο συγκεκριμένα με τη διαπερατότητά του. Συνολικά, εξετάστηκαν δύο ομάδες συνθέσεων:

- η 1^η Ομάδα Συνθέσεων με αντικατάσταση του τσιμέντου (cem) με μετακαολίνη, σε ποσοστά 6,86%, 10,57%, 14,00% και 20,00% κ.β.
- η 2^η Ομάδα Συνθέσεων με αντικατάσταση του φίλλερ (Ip20) με μετακαολίνη, σε ποσοστά 13,71%, 21,10%, 28,00% και 40,00% κ.β.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια που είχαν διατηρηθεί στη δεξαμενή νερού για χρονικό διάστημα 360 ημερών.

Επιγραμματικά, τα πειράματα που διεξήχθησαν, σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι:

- Τριχοειδής απορρόφηση (*S*) και πορώδες (*OP*)
- Διαπερατότητα σε νερό
 - Υδατοπερατότητα με τη διάταξη GWT-4000, (w_{p120})
 - Υδατοπερατότητα κατά BS EN 12390-8:2000, (w_{p500})
- Διαπερατότητα σε αέρα *gp*
- Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής f_c

Από τη μελέτη και την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1) Όσον αφορά στον κάθε παράγοντα ανθεκτικότητας που εξετάστηκε, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή της προσθήκης του μετακαολίνη στις συνθέσεις αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος:

- **Τριχοειδής απορρόφηση (S):** Η προσθήκη του μετακαολίνη οδήγησε σε σημαντική μείωση της τριχοειδούς απορρόφησης, βελτιώνοντας την υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος. Παρατηρήθηκε ότι, όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο του τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων), όσο και του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων), διακρίνεται μια πτωτική τάση στην τιμή της τριχοειδούς απορρόφησης, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν γραμμική. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη, οδήγησε σε χαμηλότερες τιμές τριχοειδούς απορρόφησης, σε σχέση με την τριχοειδή απορρόφηση των μιγμάτων της

1^{ης} ομάδας συνθέσεων. Για την 1^η ομάδα συνθέσεων, η χαμηλότερη τιμή του S σημειώθηκε για ποσοστό αντικατάστασης 14%, ενώ για τη 2^η ομάδα συνθέσεων για ποσοστό αντικατάστασης 40%.

- **Ανοικτό πορώδες (OP):** Η προσθήκη του μετακαολίνης δε φάνηκε να μεταβάλλει ουσιαστικά το ανοικτό πορώδες. Ωστόσο, αν η τιμή του ανοικτού πορώδους για τη σύνθεση χωρίς μετακαολίνη απορριφθεί, σημειώνεται σταδιακή μείωση του ανοικτού πορώδους για τα ποσοστά αντικατάστασης φίλλερ με μετακαολίνη από 13,71% έως 28%. Για την 1^η ομάδα συνθέσεων, η χαμηλότερη τιμή του OP σημειώθηκε για ποσοστό αντικατάστασης 14%, ενώ για τη 2^η ομάδα συνθέσεων για ποσοστό αντικατάστασης 28%.
- **Υδατοπερατότητα (w_{p120}) με τη διάταξη GWT-4000:** Παρατηρήθηκε ότι, η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη, οδήγησε εν γένει σε μείωση του συντελεστή υδατοπερατότητας του σκυροδέματος (και κατ' αντιστοιχία σε αύξηση του χρόνου εξίσωσης πίεσης). Η πτωτική τάση στην τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας κατέσκει σαφής για ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη ίσο με 20%. Όσον αφορά στην αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη, η πτωτική τάση στην τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας κατέσκει σαφής για τα ποσοστά αντικατάστασης 21% και 28%.
- **Υδατοπερατότητα κατά BS EN 12390-8:2000, (w_{p500}):** Η προσθήκη του μετακαολίνης δε φαίνεται να επηρεάζει με συγκεκριμένο τρόπο την υδατοπερατότητα. Η δοκιμή θεωρείται ότι διέπεται από αρκετές αβεβαιότητες, και συνεπώς, τα αποτελέσματα δε χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.
- **Διαπερατότητα σε αέρα g_p :** Παρατηρήθηκε ότι με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης, τόσο του τσιμέντου τσιμέντου (1^η ομάδα συνθέσεων), όσο και του φίλλερ (2^η ομάδα συνθέσεων), υπήρξε μια εν γένει πτωτική τάση στην τιμή του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα K. Για την 1^η ομάδα συνθέσεων, η χαμηλότερη τιμή του K σημειώθηκε για ποσοστό αντικατάστασης 6,86%, ενώ για τη 2^η ομάδα συνθέσεων για ποσοστό αντικατάστασης 28%.
- **Θλιπτικής αντοχής f_c :** Παρατηρήθηκε ότι, η προσθήκη του μετακαολίνης αυξάνει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με πολύ καλή προσέγγιση γραμμική, ειδικά για τη 2^η ομάδα συνθέσεων. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η αντικατάσταση του φίλλερ με μετακαολίνη (2^η ομάδα συνθέσεων) οδήγησε σε υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής, συγκρινόμενη με την αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη (1^η ομάδα συνθέσεων). Έτσι, στην 1^η ομάδα συνθέσεων η υψηλότερη τιμή της θλιπτικής αντοχής σημειώθηκε για ποσοστό αντικατάστασης 14 - 20%. Για τη 2^η ομάδα η υψηλότερη τιμή της θλιπτικής αντοχής σημειώθηκε στο υψηλότερο ποσοστό αντικατάστασης (40%).

Συνολικά, θα μπορούσε να εξαχθεί ως γενικό συμπέρασμα ότι, για την 1^η ομάδα συνθέσεων προκύπτει βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη της τάξης του 14,00% - 20,00%, ενώ για την 2^η ομάδα συνθέσεων προκύπτει βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης του φίλλερ με μετακαολίνη της τάξης του 28%.

- 2) Όσον αφορά στη συσχέτιση του κάθε επιμέρους παράγοντα ανθεκτικότητας που εξετάστηκε με το ποσοστό αντικατάστασης με μετακαολίνη, προέκυψε ότι υπάρχει σχετικά καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού αντικατάστασης mk/cem με τα μεγέθη S , OP , f_c . Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και για το ποσοστό αντικατάστασης $mk/lp20$, με τη διαφορά ότι οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης ήταν σημαντικά υψηλότεροι.
- 3) Από τη συσχέτιση των παραγόντων ανθεκτικότητας μεταξύ τους, παρατηρήθηκε καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών:
 - S και OP , και για τις δύο ομάδες συνθέσεων ΑΣΣ. (μετά την απόρριψη τιμών).
 - S και K , για την 1^η ομάδα συνθέσεων ΑΣΣ.
 - S και f_c , και για τις δύο ομάδες συνθέσεων ΑΣΣ.
 - OP και f_c για την 2^η ομάδα συνθέσεων ΑΣΣ.
 - c_{w120} και lnT , και για τις δύο ομάδες συνθέσεων ΑΣΣ (όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο).
 - K και f_c και για τις δύο ομάδες συνθέσεων ΑΣΣ.
- 4) Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των ιδιοτήτων ανθεκτικότητας και της θλιπτικής αντοχής, μεταξύ 28 και 360 ημερών, παρατηρείται:
 - Η ιδιότητα της τριχοειδούς απορρόφησης (S) πρακτικά έχει παραμείνει αμετάβλητη.
 - Δεν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή του πορώδους (OP) στην ηλικία των 360 ημερών, για τη 1η ομάδα συνθέσεων. Στη 2^η ομάδα συνθέσεων, παρατηρούμε ότι οι τιμές του ανοικτού πορώδους που μετρήθηκαν στις 360 ημέρες είναι εν γένει χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές στις 28 ημέρες.
 - Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά μεγέθη υδατοπερατότητας c_{w120} και lnT , παρατηρείται μικρή βελτίωση την αντίστασης στη διαπερατότητα σε νερό, για τα δοκίμια σκυροδέματος των 360 ημερών.
 - Υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής καταγράφηκαν για τα δοκίμια των 360 ημερών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κόλιας Στ., 2010-2011. *Προχωρημένη τεχνολογία σκυροδέματος*. Σημειώσεις διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Ε.Μ.Π. «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών», Αθήνα.

Μακρής Ε. Κ., Σμαργιανάκη Ν. Δ., 2012. *Η επίδραση του μετακαολίνης στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες και στην ανθεκτικότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Μπαδογιάννης Ε., 2002. *Αξιοποίηση καολινών στην τεχνολογία σκυροδέματος*. Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Παύλου Δ., 2010. *Χαρακτηριστικά ρεολογίας και ανθεκτικότητας αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος*. Μεταπτυχιακή εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Σφήκας Ι., 2007. *Τεχνολογία Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*. Μεταπτυχιακή εργασία, Σχολή Πολιτικών μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Abbas A., Fathifazl G., Isgor O., Razaqpur A., Fournier B. and Foo S., 2009. *Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method*. Cement and Concrete Composites, 31, pp.555–63

ASTM C 1543-02, 2002. *Standard method of test for determining the penetration of chloride ion into Concrete by Ponding*, ASTM, USA.

Atis C., 2003. *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*. Construction and Building Materials, 17, pp.147–5..

Badogiannis E. and Tsvivilis S., 2009. *Exploitation of poor Greek kaolins: durability of metakaolin concrete*. Cement and Concrete Composites, 31, pp.128–133.

Bai J., Wild S. and Sabir B., 2002. *Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC–PFA–MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth*. Cement and Concrete Research, 32, pp.1813–21.

Basheer L., Kropp J. and Cleland D. J., 2001. *Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review*. Construction and Building Materials, 15, pp.93-103.

British Standards Institution, 1996. *BS 1881 - 208 - 1996, Part 5 Testing concrete-Recommendation for the determination of the initial surface absorption of concrete*. London.

British Standards Institution, 2000. *BS EN 12390-8:2000 Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure*.

British Standards Institution, *BS EN 14630 – 2006 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method*.

Buyle-Bodin F. and Hadjieva-Zaharieva R.,2002. *Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete*. Materials and Structures, 35, pp. 504–9.

Chang C-F.and Chen J-W., 2006. *The experimental investigation of concrete carbonation depth*. Cement and Concrete Research, 36, pp.1760–7.

Chatveera B. and Lertwattanak P.,2011. *Durability of conventional concretes containing black rice husk ash*. Journal of Environmental Management, 92, pp.59–66.

Currie R. J., 1986. *Carbonation depths in structural-quality concrete*. Building Research Establishment Report, p. 19, Watford, U.K..

De Beer F. C., Le Roux J. J. and Kearsley E. P., 2005. *Testing the durability of concrete with neutron radiography*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 542,pp.226–231.

Delagrave A., Bigas J. P., Ollivier J. P., Marchand J. and Pigeon M., 1997. *Influence of the interfacial zone on the chloride diffusivity of mortars*. Advanced Cement Based Materials, 5(3), pp. 86–92.

Deutsches Institut für Normung, *DIN 1048- 5 Prüfverfahren für Beton: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper*.

Dhir R., Limbachiya M., McCarthy M. and Chaipanich A.,2007. *Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction*.Materials and Structures, 40, pp.459–73.

Dias W.P.S., 2000. *Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation*. Cement and Concrete Research, 30,pp.1255-1261.

Dinakar P., Babu K. and Santhanam M.,2007. *Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes*. Cement and Concrete Composites, 29, pp.136–45.

German Instruments A/S, Copenhagen, Denmark, (1999), Available at: www.germann.org.

Gonen T. and Yazicioglu S., 2007. *The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete*. Building and Environment, 42, pp.3080–5.

Güneyisi E., Gesog˘lu M. and Mermerdas M., 2008. *Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin*. Materials and Structures, 41, pp.937–949.

Güneyisi E., Gesoglu M., Karaoglu S. and Mermerdas K., 2012. *Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes*. Construction and Building Materials, 34, pp.120-130.

Hassan A., Lachemi M. and Hossain K., 2012. *Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Composites, Canada.

Hui-Sheng S., Bi-Wan X. and Xiao-Chen Z., 2009. *Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete*. Construction and Building Materials, 23, pp.1980–5.

Kanellopoulos A., Petrou M. F. and Ioannou I., 2012. *Durability performance of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 37, pp.320-325.

Katz A., 2003. *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*. Cement and Concrete Research, 33, pp.703–11.

Khunthongkeaw K., Tangtermsirikul S. and Leelawat T., 2006. *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete*. Construction and Building Materials, 20, pp.744–53.

Kim H. S., Lee S. H. and Moon H. Y., 2007. *Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin*. Construction and Building Materials, 21, pp.1229-1237.

Kubissa W. and Jaskulski R., 2013. Measuring and time variability of the sorptivity of concrete. In: *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*, pp. 634-641, MBMST.

Kulakowski M., Pereira F. and Dal Molin D., 2009. *Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete*. Construction and Building Materials, 23, pp.1189–95.

Larbi L. A., 1993. *Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete*, Heron, 38, No. 1, p. 69.

Limbachiya M., Meddah M. S. and Ouchagour Y.,2012. *Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete*. Construction and Building Materials, 27, pp.439–49.

Lo Y. and Lee H.,2002. *Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy*. Building and Environment, 37, pp.507–14.

Lovato P. S., Possan E., Molin D.C.C.D., Masuero B. B. and Ribeiro J. L. D., 2012. *Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes*. Construction and Building Materials, 26, pp.437–47.

Madandoust R. and Mousavi S. Y., 2012. *Fresh and hardened properties of self–compacting concrete containing metakaolin*. Construction and Building Materials, 35, pp.752-760.

Matthews J. D., 1984. *Carbonation of ten-year concretes with and without pulverized fuel ash*. In Proc. ASHTECH Conf., p. 12, London.

Neville A. M., 2002. *Properties of concrete, Fourth and Final Edition Standards updated to 2002*. Essex: Pearson.

Newman J. and Choo B. S. eds., 2003. *Advanced Concrete Technology-Concrete Properties*. Oxford: Elsevier, Butterworth-Heinemann.

Otsuki N., Miyazato S. and Yodsudjai W., 2003. *Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 443–51.

Pacheco Torgal F., Miraldo S., Labrincha J. A. and De Brito J.,2012. *An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC*. Construction and Building Materials, 36, pp. 141-150.

Papadakis V.,2000. *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*. Cement and Concrete Research, 30, pp. 291–9.

Parrott L. J.,1987. *A review of carbonation in reinforced concrete*. Waterford: Building Research Establishment, UK.

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.

Razak H. A., Chai H. K. and Wong H. S., 2004. *Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials*. Cement and Concrete Composites, 26, pp.883–889.

- Roziere E., Loukili A. and Cussigh F., 2009. *A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation*. Construction and Building Materials, 23, pp.190–9.
- Sanjuan M. A. and Munoz-Martialay R., 1996. *Oven-drying as a preconditioning method for air permeability test on concrete*. Materials Letters, 27, pp.263-268.
- 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.
- Sidique R. and Kaur A., 2009. *Effect of metakaolin on the near surface characteristics of concrete*. Materials and Structures, 44, pp.77-88.
- Sim J. and Park C., 2011. *Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate*. Waste Management, 31, pp.2352–60.
- Technical Report No. 31, 2008. *Permeability testing of site concrete - a review of methods and experience*. Camberley: Concrete Society.
- Torrent R. and Fernandez Luco L. eds., 2007. *RILEM, Report 40, Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, RILEM TC 189-NEC: State-of-the-Art Report*. Bagnoux: RILEM Publications S.A.R.L..
- Tsivilis S., Chaniotakis E., Batis G., Meletiou C., Kasselouri V., Kakali G., Sakellariou A., Pavlakis G. and Psimadas C., 1999. *The effect of clinker and limestone quality on the gas permeability, water absorption and pore structure of limestone cement concrete*. Cement and Concrete Composites, 21, pp.139-146.
- Tsivilis S., Tsantilas J., Kakali G., Chaniotakis E. and Sakellariou A., 2003. *The permeability of Portland limestone cement concrete*. Cement and Concrete Research, 33, pp.1465-1471.
- Valipour M., Pargar F., Shekarchi M. and Khani S., 2013. *Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study*. Construction and Building Materials, 41, pp.879–888.
- Vejmelkova E., Keppert M., Grzeszczyk S., Skalinski B. and Cerny R., 2010. *Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag*. Construction and Building Materials, 25, pp.1325-1331.

- Velmelkova E., Keppert M., Grzeszczyk S., Skalinski B. and Cerny R., 2011. *Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag*. Construction and Building Materials, 25, pp.1325-1331.
- Villain J., Thierry M. and Platret G., 2007. *Measurement methods of carbonation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry*. Cement and Concrete Research, 37, pp.1182-92.
- Wassermann R., Katz A. and Bentur A., 2009. *Minimum cement content requirements: a must or a myth?*. Materials and Structures, 42, pp.973-82.
- Werle A., Kazmierczak C. and Kulakowski M., 2011. *Carbonation of concrete with recycled concrete aggregates*. Ambiente Construído, Porto Alegre, 11(2), pp.213-28.
- Whiting D., 1988. *Permeability of selected concretes*. In Permeability of Concrete, ACI SP-108, pp. 195-221, Detroit, Michigan.
- Wiering P., 1984. *Long time studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure*. In: RILEM symposium on durability of concrete under normal outdoor exposure, Hannover.
- Wilson M. A., Carter M. A. and Hoff W. D., 1999. *British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation*. Materials and Structures, 32, pp.571-578.
- Yoon I-S., Copuroglu O. and Park K-B., 2007. *Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete*. Atmospheric Environment, 41, pp.7274-85.
- Younsi A., Turcry P., Rozière E., Aït-Mokhtar A. and Loukili A., 2011. *Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content*. Cement and Concrete Composites, 33, pp.993-1000.
- Zega C. J. and Di Maio A., 2011. *Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements*. Waste Management, 31, pp.2336-40.
- Zhao H., Sun W., Wu X. and Gao B., 2012. *Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete*. Mater. Des., 35, pp.194-200.
- Zheng J. J. and Zhou X. Z., 2007. *Prediction of the chloride diffusion coefficient of concrete*. Materials and Structures, 40, pp. 693-701.