



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

Διδακτορική Διατριβή

**Εφαρμογή γεωπολυμερισμού για την αξιοποίηση της
ιπτάμενης τέφρας στην τεχνολογία σκυροδέματος**

Νικόλαος Δ. Νικολουτσόπουλος

Εκπαιδευτικός Τεχνολόγος Πολιτικός Μηχανικός, ΑΣΠΑΙΤΕ

M.Sc. Management in Construction, Kingston Uni. Of London

M.B.A. Διοίκηση Επιχειρήσεων, ΠΑΔΑ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Σωτήριος Τσιβιλής (Επιβλέπων),
Καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Γλυκερία Κακάλη,
Καθηγήτρια ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Αναστασία Σωτηροπούλου,
Καθηγήτρια ΑΣΠΑΙΤΕ, Τμήμα Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Σωτήριος Τσιβιλής,
Καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Γλυκερία Κακάλη,
Καθηγήτρια ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Αναστασία Σωτηροπούλου,
Καθηγήτρια ΑΣΠΑΙΤΕ, Τμήμα Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών

Ευάγγελος Πλεύρης,
Καθηγητής Oslo Met. Uni., Department of Built Environment

Αστέριος Μπακόλας,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Ευστράτιος Μπαδογιάννης,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Κωνσταντίνος Κολοβός,
Αναπληρωτής Καθηγητής Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων

Στους γονείς μου...

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του Τομέα Ι της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ελέγχου και Αντοχής Υλικών του Τμήματος Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών της ΑΣΠΑΙΤΕ.

Αντικείμενο της εργασίας ήταν η εφαρμογή γεωπολυμερισμού για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στην τεχνολογία σκυροδέματος. Παρασκευάστηκαν γεωπολυμερικά σκυροδέματα χρησιμοποιώντας πάστα γεωπολυμερούς ως συνδετική κονία και αφού ελέγχθηκαν οι ιδιότητες τους, στη συνέχεια συγκρίθηκαν με αυτές των συμβατικών σκυροδεμάτων.

Στη δεδομένη στιγμή θα ήθελα να ευχαριστήσω αρκετούς ανθρώπους που τόσα χρόνια μου συμπαραστάθηκαν και με βοήθησαν για την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής, αλλά πιο συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον κ. Σωτήριο Τσιβιλή, Καθηγητή του ΕΜΠ, για την τιμή που μου έκανε να μου αναθέσει την εκπόνηση της συγκεκριμένης διατριβής. Τον ευχαριστώ θερμά όχι μόνο για την άψογη και ευχάριστη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και που με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε αυτή την ευκαιρία.
- Την κα. Γλυκερία Κακάλη, Καθηγήτρια του ΕΜΠ και Κοσμήτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών, μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής, που ήταν πάντα πρόθυμη να με βοηθήσει με τις πολύτιμες συμβουλές της σε κρίσιμα σημεία της διατριβής.
- Την κα. Αναστασία Σωτηροπούλου, Καθηγήτρια της ΑΣΠΑΙΤΕ, που μου έκανε την τιμή να είναι μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής, για τις σημαντικές συμβουλές και την καθοδήγησή της. Την ευχαριστώ που με συμβούλευε και με στήριζε από τότε που ήμουν προπτυχιακός φοιτητής και για όλα τα υπόλοιπα χρόνια συνεργασίας που είχαμε μέχρι και σήμερα.
- Τους κ. Ευάγγελο Πλεύρη Καθηγητή του Oslo Met. Uni., κ. Αστέριο Μπακόλα Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΜΠ, κ. Ευστράτιο Μπαδογιάννη Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ και κ. Κωνσταντίνο Κολοβό Αναπληρωτή Καθηγητή της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων, που με τίμησαν με τη συμμετοχή τους στην εξεταστική μου επιτροπή.
- Την κα. Σταματία Γκαβέλα, Δρ. Χημικό Μηχανικό, φίλη και συνεργάτιδα, όπου με δική της παρότρυνση και προτροπή ξεκίνησα αυτό το όμορφο ταξίδι.
- Την κα. Δήμητρα Πασσά, ΕΔΙΠ της ΑΣΠΑΙΤΕ, φίλη και συνεργάτιδα, όπου ήταν σημαντική η βοήθεια της σε αρκετά από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο όπου βρίσκεται.
- Την εταιρεία Εδαφομηχανική ΑΤΕ, που μου επέτρεπε να χρησιμοποιώ τον εργαστηριακό της εξοπλισμό καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής μου, και πιο συγκεκριμένα τον κ. Απόστολο Ρίτσο, Διευθυντή του Εργαστηρίου, για όσα μου έμαθε στα πρώτα μου βήματα ως πολιτικός μηχανικός.

- Τις εταιρείες Sika Hellas ABEE, Titan Greece, ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ και ΛΑΤΟΜΕΙΑ ΛΑΜΙΑΣ ABEE για τη χορηγία υλικών καθώς και για όλη τη στήριξη που μου παρείχαν.
- Την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου, Δρ. Αγγελική Σκαροπούλου, Δρ. Δημήτρη Κιούπη, Δρ. Κωνσταντίνο Ασπιώτη και Υ.Δ. Ολγιάνα Πανίτσα, για το ευχάριστο και ενωτικό κλίμα που υπήρχε στο εργαστήριο και που μου προσέφεραν τη βοήθεια τους όποτε τη χρειαζόμουν.
- Τον ΕΛΚΕ του ΕΜΠ για τη χορήγηση υποτροφίας τα τέσσερα τελευταία χρόνια της διδακτορικής διατριβής μου.

Νικόλας,
Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η εφαρμογή γεωπολυμερισμού για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στην τεχνολογία σκυροδέματος. Η ιπτάμενη τέφρα (IT) είναι ένα παραπροϊόν της καύσης του άνθρακα στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με συμμετοχή περίπου στο 37% του παγκόσμιου ενεργειακού μίγματος των τελευταίων 50 χρόνων. Η ετήσια παραγωγή της IT παγκοσμίως κυμαίνεται στα 600 εκατ. τόνους και προβλέπεται μέχρι το 2030 να ξεπεράσει τους 1.04 δισ. τόνους, από την οποία αξιοποιείται μόνο το 6.5%. Η εγχώρια παραγωγή της IT από το 2019 έως και το 2022 είναι περίπου 3.5 εκατ. τόνοι ετησίως, εκ των οποίων χρησιμοποιείται μόλις το 3%. Η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας του γεωπολυμερισμού σε ένα ευρύ φάσμα στερεών βιομηχανικών αποβλήτων και παραπροϊόντων αργιλοπυριτικής σύστασης, με στόχο την παραγωγή δομικών υλικών, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Σε πρώτη φάση, παρασκευάστηκαν γεωπολυμερικές πάστες (GFA) με βάση την IT, με σταθερούς μοριακούς λόγους πυρίτιο προς αργίλιο ($Si/Al=2.40$) και αλκάλια προς αργίλιο ($R/Al=0.85$), αλλά σε διάφορους λόγους στερεό προς υγρό (S/L). Οι λόγοι S/L που επιλέχθηκαν είναι 2.8, 2.9, 3.0, 3.1 και 3.2, αφού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ο συνηθέστερος λόγος που επιλέγεται για το γεωπολυμερισμό της IT είναι 3.0. Η αλλαγή του λόγου S/L οφειλόταν αποκλειστικά και μόνο στην προσθήκη ή αφαίρεση ορισμένης ποσότητας νερού. Στη συνέχεια, σε επιλεγμένους λόγους S/L (3.0 και 3.2) χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα χημικά πρόσμικτα τσιμεντοειδών, διαφορετικών ιδιοτήτων, σε διάφορα ποσοστά προσθήκης. Στα παραγόμενα GFA όλων των παραπάνω συνθέσεων μετρήθηκε ο χρόνος πήξης, η εργασιμότητα, η συστολή ξήρανσης, η υδατοαπορροφητικότητα και η αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη. Τα GFA, κατά περίπτωση, στην ωρίμανσή τους ή συντηρήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου ή πραγματοποιήθηκε ένα αρχικό στάδιο θερμικής ωρίμανσης, στους 70°C για 2 ημέρες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις απαιτήσεις και τα κριτήρια συμμόρφωσης που αναφέρει το αντίστοιχο πρότυπο για τα τσιμέντα, ΕΛΟΤ EN 197-1, καθώς και με αντίστοιχες σχετικές έρευνες.

Σε δεύτερη φάση, μετά την αξιολόγηση των παραπάνω, παρασκευάστηκαν τρία γεωπολυμερικά σκυροδέματα (GC) με περιεκτικότητα κατ' όγκο σε IT 15%, 22.5% και 30%. Η επιλογή της περιεκτικότητας έγινε σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές της μέγιστης περιεκτικότητας τσιμέντου στο σκυρόδεμα. Σε όλες τις συνθέσεις GC παρέμειναν σταθεροί οι λόγοι $S/L=3.20$, $Si/Al=2.90$ και $R/Al=1.00$. Ακόμη, για συγκριτικούς λόγους, παρασκευάστηκαν τρία συμβατικά σκυροδέματα (CC), κατάλληλης σύνθεσης και μηχανικών ιδιοτήτων για να γίνει άμεση σύγκριση με τα GC. Τα CC συντηρήθηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-2016, ενώ τα GC είχαν ένα αρχικό στάδιο θερμικής ωρίμανσης στους 70°C για 2 ημέρες και στη συνέχεια αφέθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου μέχρι την ηλικία δοκιμής τους. Στα παραγόμενα GC και CC όλων των συνθέσεων μετρήθηκε η εργασιμότητα τους, η αεροπεριεκτικότητα και η πυκνότητά τους, η θλιπτική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson, η εφελκυστική αντοχή μέσω διάρρηξης κυλίνδρου και κάμψης

δοκού, η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων (UPV), η υδατοαπορροφητικότητα και το ελεύθερο πορώδες τους, η ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης – απόψυξης και κύκλους ξήρανσης – εμβάπτισης, ο συντελεστής διάχυση χλωριόντων, η ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα θεικών ιόντων σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες (5°C και 20°C), καθώς και σε οξέα, οξικό και θεικό. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις απαιτήσεις των σε ισχύ κανονισμών για το σκυρόδεμα, του ΚΤΣ-2016 και του ΕΚΩΣ 2000, καθώς και με αντίστοιχες σχετικές έρευνες.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο λόγος S/L στη γεωπολυμερική πάστα δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή μονοαξονικής θλίψης και το χρόνο πήξης, αλλά έχει σημαντική συμβολή στη διαμόρφωση της εργασιμότητας του γεωπολυμερούς. Επίσης, φαίνεται ότι τα μελετηθέντα χημικά πρόσμικτα δεν λειτουργούν όλα όπως στο συμβατικό σκυρόδεμα. Το GC έδειξε ανταγωνιστική αντοχή σε θλίψη σε σύγκριση με το CC, αντοχή σε εφελκυσμό εντός των ορίων που καθορίζονται από ΕΚΩΣ 2000 για το CC και μέτρο ελαστικότητας περίπου 50% μικρότερο από αυτό του CC. Η περιεκτικότητα γεωπολυμερικής πάστας φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του GC. Σε περιβάλλον θεικών ιόντων και στις δύο θερμοκρασίες τα GC δείχνουν να έχουν πλήρη ανθεκτικότητα. Στην έκθεση σε οξέα, τα GC παρουσιάζουν 60% απώλεια μάζας σε περιβάλλον θεικού οξέος και 20% σε οξικό οξύ. Το GC με τη μέγιστη περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα (750 kg/m³) φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ως τελικό συμπέρασμα, προκύπτει ότι οι ιπτάμενες τέφρες μπορούν να αξιοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δομικών υλικών και ειδικότερα γεωπολυμερικών κονιαμάτων και σκυροδεμάτων.

Λέξεις κλειδιά: γεωπολυμερές, σκυρόδεμα, ιπτάμενη τέφρα, μηχανικές ιδιότητες, φυσικές ιδιότητες, ανθεκτικότητα.

SUMMARY

The subject of the doctoral thesis is the application of geopolymers for the utilization of fly ash in concrete technology. Fly ash (FA) is a by-product of coal combustion in power generation plants, accounting for approximately 37% of the global energy mix over the past 50 years. The annual global production of FA is around 600 million tons, and it is projected to exceed 1.04 billion tons by 2030, of which only 6.5% is currently utilized. The domestic production of FA from 2019 to 2022 is approximately 3.5 million tons per year, with only 3% being used. The application of geopolymer technology to a wide range of solid industrial waste and byproducts of aluminosilicate composition for the production of structural materials presents a particular interest.

In the initial phase, geopolymer pastes (GFA) were prepared using fly ash (FA) with fixed molar ratios of silicon to alumina ($\text{Si/Al}=2.40$) and alkalis to alumina ($\text{R/Al}=0.85$), but at different solid-to-liquid (S/L) ratios. The selected S/L ratios were 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, and 3.2, as the literature suggests that the most commonly chosen ratio for fly ash geopolymerisation is 3.0. The variation in the S/L ratio was solely due to the addition or removal of a certain amount of water. Subsequently, for selected S/L ratios (3.0 and 3.2), four chemical additives of cementitious materials with different properties were used at various addition percentages. The produced GFAs of all the mentioned compositions were measured for setting time, workability, drying shrinkage, sorptivity and uniaxial compression strength. Depending on the case, the GFAs were either kept in the laboratory environment during their curing or underwent an initial stage of curing at 70°C for 2 days. The obtained results were compared with the requirements and conformity criteria specified in the corresponding cement standard, ELOT EN 197-1, as well as relevant related research.

In the second phase, three geopolymer concretes (GC) were prepared with different content of FA by volume, 15%, 22.5%, and 30%. The selection of the content was based on literature references regarding the maximum cement content in concrete. For all GC compositions, the S/L ratio was fixed at 3.20, Si/Al ratio at 2.90, and R/Al ratio at 1.00. Additionally, for comparative purposes, three conventional concretes (CC) of suitable composition and mechanical properties were prepared for direct comparison with GC. The CC specimens were cured according to the requirements of the national Concrete Technology Regulation (KTS-2016), while the GC specimens underwent an initial stage of curing at 70°C for 2 days and were subsequently maintained in the laboratory environment until they were tested. The produced GC and CC specimens of all compositions were measured for their workability, air content, density, compressive strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio, tensile strength via cylinder splitting and beam bending, ultrasonic pulse velocity (UPV), sorptivity and porosity, durability to freeze – thaw and wet – dry cycles, chloride ion penetration, resistance to corrosive environments containing sulfur ions at two different temperatures (5°C and 20°C), as well as resistance to acids, acetic and sulfuric. The obtained results were compared with

the requirements of the prevailing regulations for concrete, KTS-2016 and Greek Reinforced Concrete Regulation (EKOS 2000), as well as relevant related research.

Taking the above into consideration, it is evident that the S/L ratio in geopolymer paste does not significantly affect the uniaxial compressive strength and setting time but does have a significant contribution to the workability of the geopolymer. Additionally, it appears that the studied chemical additives do not all perform in the same manner as in conventional concrete. The GC demonstrated competitive strength in compression comparable to CC, tensile strength within the limits specified by EKOS 2000 for CC, and an elastic modulus approximately 50% lower than that of CC. The content of geopolymer paste seems to have a significant impact on the properties of GC. In the presence of sulfur ions at both temperatures, GC exhibits complete resistance. When exposed to acids, GC experiences a mass loss of 60% in a sulfuric acid environment and 20% in acetic acid. GC with the maximum content of fly ash (750 kg/m^3) appears to be the best choice considering the mechanical properties, durability, and environmental impacts. In conclusion, fly ashes can be utilized as a raw material for the production of structural materials, particularly geopolymer concrete and mortar.

Keywords: geopolymer, concrete, fly ash, mechanical properties, physical properties, durability.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1. Κανονιστικό Πλαίσιο	4
2.1.1. Πάστα – Κονία Συγκόλλησης.....	4
2.1.2. Σκυρόδεμα.....	5
2.2. Σχετικές Έρευνες.....	7
2.2.1. Γεωπολυμερική Πάστα – Κονία Συγκόλλησης.....	7
2.2.2. Γεωπολυμερικό Σκυρόδεμα	9
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	13
3.1. Πειραματικός Σχεδιασμός.....	13
3.2. Πρώτες Ύλες	14
3.2.1. Ιπτάμενη Τέφρα.....	14
3.2.2. Διάλυμα Ενεργοποίησης.....	16
3.2.3. Τσιμέντο.....	16
3.2.4. Αδρανή Υλικά.....	17
3.2.5. Χημικά Πρόσμικτα και Άλλα Υλικά.....	18
3.3. Μελέτη Σύνθεσης, Παραγωγή και Συντήρηση	19
3.3.1. Γεωπολυμερική Πάστα (GFA)	19
3.3.2. Γεωπολυμερικό Σκυρόδεμα (GC)	21
3.3.3. Συμβατικό Σκυρόδεμα (CC)	22
3.4. Δοκιμές.....	23
3.4.1. Δοκιμές Γεωπολυμερικής Πάστας (GFA)	23
3.4.1.1. Νωπό GFA.....	23
3.4.1.2. Σκληρυμένο GFA.....	24
3.4.2. Δοκιμές Σκυροδέματος (GC και CC).....	27
3.4.2.1. Νωπό Σκυρόδεμα.....	27
3.4.2.2. Σκληρυμένο Σκυρόδεμα	29
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	35
4.1. Δοκιμές Γεωπολυμερικής Πάστας (GFA).....	35
4.1.1. Νωπό GFA.....	35
4.1.1.1. Χρόνος Πήξης.....	35
4.1.1.2. Εργασιμότητα.....	38
4.1.2. Σκληρυμένο GFA.....	41
4.1.2.1. Θλιπτική Αντοχή.....	41

4.1.2.2. Υδατοαπορροφητικότητα.....	44
4.1.2.3. Σύστολης Ξήρανσης.....	47
4.2. Δοκιμές Σκυροδέματος (GC – CC)	50
4.2.1. Νωπό Σκυρόδεμα (GC – CC)	50
4.2.1.1. Εργασιμότητα.....	50
4.2.1.2. Αεροπεριεκτικότητα.....	51
4.2.2. Σκληρωμένο Σκυρόδεμα (GC και CC)	52
4.2.2.1. Θλιπτική Αντοχή.....	53
4.2.2.2. Εφελκυστική Αντοχή.....	54
4.2.2.3. Ταχύτητα Μετάδοσης Υπερήχων (UPV)	57
4.2.2.4. Υδατοαπορροφητικότητα.....	60
4.2.2.5. Ανοιχτό Πορώδες	61
4.2.2.6. Ανθεκτικότητα σε Κύκλους Ψύξης – Απόψυξης.....	62
4.2.2.7. Ανθεκτικότητα σε Κύκλους Ξήρανσης – Εμβάπτισης.....	63
4.2.2.8. Μέτρηση Διάχυσης Χλωριόντων	64
4.2.2.9. Ανθεκτικότητα σε Διαβρωτικό Περιβάλλον.....	66
4.3. Συγκριτικά Αποτελέσματα.....	72
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
5.1. Γεωπολυμερική Πάστα (GFA).....	77
5.2. Γεωπολυμερικό Σκυρόδεμα (GC).....	78
5.3. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	89
Βιογραφικό Σημείωμα.....	90

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντου κατά ΕΛΟΤ EN 197-1.....	5
Πίνακας 2.2: Κατηγορίες Κάθισης.....	5
Πίνακας 2.3: Κατηγορίες Εξάπλωσης.....	6
Πίνακας 2.4: Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος σε MPa.....	6
Πίνακας 2.5: Επιβατικό μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος.....	7
Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση ιπτάμενης τέφρας (% κ.β.).....	15
Πίνακας 3.2: Απαιτήσεις και αποτελέσματα ελέγχου αδρανών υλικών.....	17
Πίνακας 3.3: Συνθέσεις πάστας γεωπολυμερών (GFA) με διαφοροποίηση του λόγου S/L.....	19
Πίνακας 3.4: Ποσοστό προσθήκης χημικών προσμίκτων στις συνθέσεις γεωπολυμερικής πάστας (GFA).....	20
Πίνακας 3.5: Σύνθεση γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) σε 1 m ³	21
Πίνακας 3.6: Σύνθεση συμβατικών σκυροδεμάτων (CC) σε 1 m ³	22
Πίνακας 4.1: Υδατοαπορροφητικότητα γεωπολυμερικής πάστας διαφορετικού λόγου S/L.....	45
Πίνακας 4.2: Υδατοαπορροφητικότητα (mm/min ^{0.5}) γεωπολυμερικής πάστας με λόγο S/L 3.0 και 3.2, με προσθήκη υπερρυστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) σε διάφορα ποσοστά.....	45
Πίνακας 4.3: Υδατοαπορροφητικότητα (mm/min ^{0.5}) γεωπολυμερικής πάστας με λόγο S/L 3.0 και 3.2, με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) σε διάφορα ποσοστά.....	46
Πίνακας 4.4: Υδατοαπορροφητικότητα (mm/min ^{0.5}) γεωπολυμερικής πάστας με λόγο S/L 3.0 και 3.2, με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST) σε διάφορα ποσοστά.....	46
Πίνακας 4.5: Υδατοαπορροφητικότητα (mm/min ^{0.5}) γεωπολυμερικής πάστας με λόγο S/L 3.0 και 3.2, με προσθήκη υπερρυστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) σε διάφορα ποσοστά.....	46
Πίνακας 4.6: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σκυροδεμάτων σε ηλικία 28 ημερών για τα συμβατικά (CC) και 7 ημερών για τα γεωπολυμερικά (GC) και κατηγοριοποίηση κατά ΚΤΣ-2016.....	54
Πίνακας 4.7: Πειραματικό Μέτρο Ελαστικότητας (E _{cm}) και Λόγος Poisson (ν) των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.....	54
Πίνακας 4.8: Εκτιμώμενη εφελκυστική αντοχή συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος υπολογισμένη σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ 2000 από τη θλιπτική αντοχή κύβου.....	55
Πίνακας 4.9: Μέγιστο βέλος κάμψης στο αντίστοιχο μέγιστο φορτίο κατά τη δοκιμή της κάμψης δύο σημείων σε πρισματικά δοκίμια συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.....	55
Πίνακας 4.10: Μέγιστη αντοχή σε κάμψη και εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση της κάτω ίνας των πρισματικών δειγμάτων συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.....	56
Πίνακας 4.11: Μέγιστη εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου (f _{ct,sp}) συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.....	56
Πίνακας 4.12: Πειραματική εφελκυστική αντοχή συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος και όρια αντίστοιχης κατηγορίας κατά ΕΚΩΣ 2000.....	57
Πίνακας 4.13: Ποιοτική κατάταξη σκυροδεμάτων με βάση την ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων (UPV) (Farhan et al., 2019).....	58
Πίνακας 4.14: Υδατοαπορροφητικότητα συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος... 60	60
Πίνακας 4.15: Ανοιχτό πορώδες συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.....	61
Πίνακας 4.16: Συντελεστής διάχυσης γλωριόντων και επιφανειακή συγκέντρωση σε συμβατικά (CC) και γεωπολυμερικά (GC) σκυροδέματα.....	65

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος (c =θλίψη, t =εφελκυσμός)....6	
Σχήμα 3.1: Περιεκτικό σκαρίφημα πειραματικής διαδικασίας. 14	14
Σχήμα 3.2: Κοκκομετρική ανάλυση ιπτάμενων τεφρών που χρησιμοποιήθηκαν στη γεωπολυμερική πάστα (GFA) και στο γεωπολυμερικό σκυρόδεμα (GC)..... 15	15
Σχήμα 3.3: XRD IT που χρησιμοποιήθηκε στα GFA και GC. 16	16
Σχήμα 3.4: Κοκκομετρική ανάλυση άμμου και γαρμπαλιού..... 18	18
Σχήμα 3.5: Μέτρηση του χρόνου τέλους πήξης της γεωπολυμερικής πάστας..... 23	23
Σχήμα 3.6: Μέτρηση του μέτρου εξάπλωσης της γεωπολυμερικής πάστας 24	24
Σχήμα 3.7: Κυβικά δοκίμια γεωπολυμερικής πάστας ακμής 50 mm πριν (πάνω) και μετά (κάτω) τη δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη..... 25	25
Σχήμα 3.8: Πειραματική διάταξη μέτρησης τριχοειδούς υδατοαπορροφητικότητας..... 25	25
Σχήμα 3.9: Δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης (δοκίμια GFA)..... 26	26
Σχήμα 3.10: Δοκίμια έτοιμα για μέτρηση συστολής ξήρανσης..... 26	26
Σχήμα 3.11: Συσκευή μέτρησης συστολής ξήρανσης, με δοκίμιο. 27	27
Σχήμα 3.12: Σκυρόδεμα CC (αριστερά) και GC (δεξιά) κατά τη δοκιμή μέτρησης του μέτρου εξάπλωσης..... 28	28
Σχήμα 3.13: Σκυρόδεμα CC (αριστερά) και GC (δεξιά) κατά τη δοκιμή της κάθισης. 28	28
Σχήμα 3.14: Συσκευή μέτρησης αεροπεριεκτικότητας και πυκνότητας 29	29
Σχήμα 3.15: Δοκίμιο GC με ηλεκτρομηκυνσίόμετρο πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης..... 30	30
Σχήμα 3.16: Δοκίμιο GC σε διάταξη κάμψης δύο σημείων..... 30	30
Σχήμα 3.17: Δοκίμιο CC (αριστερά) και GC (δεξιά) μετά τη δοκιμή διάρρηξης..... 31	31
Σχήμα 3.18: Δοκίμιο GC κατά τη μέτρηση UPV με τη συσκευή Ruidit-7..... 31	31
Σχήμα 3.19: Διάφορες φάσεις δοκιμής διάχυσης χλωριόντων: μόνωση δοκιμίου (αριστερά), λήψη υλικού σε διάφορα βάθη (κέντρο) και τιτλοδότηση - χρωματισμός διαλύματος (δεξιά)..... 33	33
Σχήμα 4.1: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση με το λόγο S/L. 35	35
Σχήμα 4.2: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM)..... 36	36
Σχήμα 4.3: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG)..... 37	37
Σχήμα 4.4: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST). 37	37
Σχήμα 4.5: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF). 38	38
Σχήμα 4.6: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση με το λόγο S/L..... 38	38
Σχήμα 4.7: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) σε διάφορα ποσοστά..... 39	39
Σχήμα 4.8: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) σε διάφορα ποσοστά..... 39	39
Σχήμα 4.9: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST). σε διάφορα ποσοστά..... 40	40
Σχήμα 4.10: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) σε διάφορα ποσοστά..... 40	40
Σχήμα 4.11: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη γεωπολυμερικής πάστας 7 ημερών με θερμική ωρίμανση και 28 ημερών χωρίς θερμική ωρίμανση σε συνάρτηση με το λόγο S/L..... 41	41
Σχήμα 4.12: Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) σε διάφορα ποσοστά..... 42	42
Σχήμα 4.13: Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) σε διάφορα ποσοστά..... 43	43

Σχήμα 4.14: Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST) σε διάφορα ποσοστά.....	43
Σχήμα 4.15: Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρυστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) σε διάφορα ποσοστά.....	44
Σχήμα 4.16: Απορρόφηση νερού ανά μονάδα επιφανείας γεωπολυμερικής πάστας ως προς την τετραγωνική ρίζα του χρόνου για διάφορους λόγους S/L.....	44
Σχήμα 4.17: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L και της ηλικίας συντήρησης.....	47
Σχήμα 4.18: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L, του ποσοστού προσθήκης υπερρυστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) και της ηλικίας συντήρησης.....	48
Σχήμα 4.19: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L, του ποσοστού προσθήκης επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) και της ηλικίας συντήρησης.....	48
Σχήμα 4.20: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L, του ποσοστού προσθήκης σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST) και της ηλικίας συντήρησης.....	49
Σχήμα 4.21: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L, του ποσοστού προσθήκης υπερρυστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) και της ηλικίας συντήρησης.....	49
Σχήμα 4.22: Μέτρο εξάπλωσης των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.....	50
Σχήμα 4.23: Εργασιμότητα με τη μέθοδο του κώνου κάθισης των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.....	51
Σχήμα 4.24: Περιεχόμενο ποσοστό αέρα των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.....	51
Σχήμα 4.25: Πειραματική και θεωρητική Πυκνότητα νεπού σκυροδέματος των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) συνθέσεων.....	52
Σχήμα 4.26: Ανάπτυξη αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων έως τα 2 έτη.....	53
Σχήμα 4.27: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και ταχύτητας μετάδοσης υπερήχων (UPV) συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.....	58
Σχήμα 4.28: Σχέση μετρούμενης θλιπτικής αντοχής και εκτιμώμενης μέσω UPV συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.....	59
Σχήμα 4.29: Απορρόφηση νερού ανά μονάδα επιφανείας συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων ως προς την τετραγωνική ρίζα του χρόνου.....	60
Σχήμα 4.30: Μέτρηση pH στο νερό κορεσμού του συμβατικού (CC) και του γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.....	61
Σχήμα 4.31: Απώλειες μάζας σε κύκλους ψύξης – απόψυξης των συνθέσεων συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.....	62
Σχήμα 4.32: Δοκίμια συμβατικών σκυροδεμάτων (CC) κατά τη δοκιμή ανθεκτικότητας σε ψύξη – απόψυξη σε διάφορες φάσης, μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής στους 100 κύκλους (c).....	63
Σχήμα 4.33: Δοκίμια γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) κατά τη δοκιμή ανθεκτικότητας σε ψύξη – απόψυξη σε διάφορες φάσης, μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής στους 100 κύκλους (c).....	63
Σχήμα 4.34: Απώλεια μάζας σε κύκλους ξήρανσης – εμβάπτισης των συνθέσεων συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.....	64
Σχήμα 4.35: Συνολικά χλωριόντα (%) συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων σε συνάρτηση του μέσου βάθους και προσαρμογή στο 2 ^ο νόμο του Fick.....	66
Σχήμα 4.36: Απώλεια μάζας συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος εκτεθειμένου σε περιβάλλον θεικών ιόντων σε θερμοκρασία 20°C.....	67
Σχήμα 4.37: Απώλεια μάζας συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος εκτεθειμένου σε περιβάλλον θεικών ιόντων σε θερμοκρασία 5°C.....	67
Σχήμα 4.38: Εξέλιξη απώλειας μάζας των συμβατικών σκυροδεμάτων (CC) κατά τη δοκιμή ανθεκτικότητας σε περιβάλλον θεικών ιόντων σε θερμοκρασία 5°C.....	68
Σχήμα 4.39: Απώλεια μάζας συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος εκτεθειμένου σε περιβάλλον θεικού οξέος.....	69

Σχήμα 4.40: Εξέλιξη απώλειας μάζας των συμβατικών σκυροδεμάτων (CC) κατά τη έκθεσή τους σε διάλυμα θεικού οξέος έως τις 200 ημέρες (d).....	69
Σχήμα 4.41: Εξέλιξη απώλειας μάζας των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) κατά τη έκθεσή τους σε διάλυμα θεικού οξέος έως τις 200 ημέρες (d).....	70
Σχήμα 4.42: Απώλεια μάζας συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος εκτεθειμένου σε περιβάλλον οξικού οξέος.....	70
Σχήμα 4.43: Φωτογραφίες των συμβατικών σκυροδεμάτων (GC) κατά την έκθεση τους σε διάλυμα οξικού οξέος έως τις 200 ημέρες (d).....	71
Σχήμα 4.44: Φωτογραφίες των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) κατά την έκθεση τους σε διάλυμα οξικού οξέος έως τις 200 ημέρες (d).....	72
Σχήμα 4.45: Σύγκριση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των συνθέσεων των συμβατικών σκυροδεμάτων (CC).....	73
Σχήμα 4.46: Σύγκριση της ανθεκτικότητας των συνθέσεων των συμβατικών σκυροδεμάτων (CC).....	74
Σχήμα 4.47: Σύγκριση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των συνθέσεων των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC).....	75
Σχήμα 4.48: Σύγκριση της ανθεκτικότητας των συνθέσεων των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC).....	76

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα είναι το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό στην κατασκευή υποδομών όπως κτίρια, γέφυρες, αυτοκινητόδρομοι, φράγματα και πολλές άλλες κατασκευές. Η αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής του τσιμέντου για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών σε υποδομές, δείχνει ότι το σκυρόδεμα θα εξακολουθήσει να αποτελεί το πλέον συνηθισμένο υλικό κατασκευής στο μέλλον. Όμως, η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου καταναλώνει πολλή ενέργεια και αυξάνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα. Μια άλλη εναλλακτική λύση για να γίνει το σκυρόδεμα φιλικό προς το περιβάλλον είναι η ανάπτυξη του γεωπολυμερούς (Shehab et al., 2016).

Τα γεωπολυμερή υλικά, θεωρείται ότι αποτελούνται από τρισδιάστατες, πολυμερικές δομές που δημιουργούνται μέσω της πολυσυμπύκνωσης ολιγομερών του τύπου -Si-O-Al-O-, τα οποία αναπτύσσονται ευθύς αμέσως μόλις τα στερεά αργιλοπυριτικά υλικά αναμειχθούν με τις τρεις διαδοχικές φάσεις, την ισχυρά αλκαλική, την πυριτική και την υδατική φάση (Κακάλη et al., 2013).

Η ανάμειξη των δύο φάσεων, στερεής και υγρής, οδηγεί στο σχηματισμό ενός ιξώδους πολτού που μπορεί εύκολα να μορφοποιηθεί, προσδίδοντας στα τελικά προϊόντα το επιθυμητό σχήμα. Στη συνέχεια, τα μορφοποιημένα προϊόντα υφίστανται ωρίμανση σε θερμοκρασία, συνήθως, 50–90°C και μετατρέπονται σε συμπαγή, ανθεκτικά υλικά με εξαιρετικές φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες (Komnitsas et al., 2015).

Ο χρόνος της αντίδρασης του γεωπολυμερισμού είναι ιδιαίτερα μικρός και τα παραγόμενα υλικά είναι άμορφα ή ημι-κρυσταλλικά, ανάλογα με τις συνθήκες ωρίμανσης. Ο γεωπολυμερισμός χρησιμοποιεί ως δότες πυριτίου και αργιλίου αργιλοπυριτικά ορυκτά αργιλοπυριτικής σύστασης (Xu και Van Deventer, 2000).

Έτσι λοιπόν, με τον όρο γεωπολυμερές χαρακτηρίζεται ένα ανόργανο αργιλοπυριτικό υλικό, που περιέχει ποικιλία άμορφων και ημικρυσταλλικών φάσεων, συντιθέμενο από ορυκτά ή παραπροϊόντα, όπως η ιπτάμενη τέφρα, πλούσια σε οξείδιο του πυριτίου και του αργιλίου. Λόγω του ότι το υλικό αποτελείται κυρίως από αργίλιο, πυρίτιο και οξυγόνο, δηλαδή τα πιο κοινά συστατικά του φλοιού της γης, ο Joseph Davidovits, Γάλλος ερευνητής και δημιουργός της λέξης γεωπολυμερές, χρησιμοποίησε το τμήμα «γεω-» αναφερόμενος στην ελληνική λέξη γαία.

Η ιπτάμενη τέφρα (IT) είναι ένα παραπροϊόν που προέρχεται από την καύση στερεών καυσίμων στις μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα, το στερεό καύσιμο αυτό είναι ο λιγνίτης, το οποίο χρησιμοποιείται στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ. Η IT είναι αργιλοπυριτικής σύστασης με μικροποσότητες οξειδίων σιδήρου και ασβεστίου και μικρές συγκεντρώσεις Νατρίου (Na), Μαγνησίου (Mg), Φωσφόρου (P), Θείου (S), Καλίου (K), Τιτανίου (Ti), Στρόντιου (Sr) και Βάριου (Ba). Η χημική σύσταση της IT εξαρτάται από την αρχική σύσταση του στερεού καυσίμου. Η ορυκτολογική της σύσταση ωστόσο, εξαρτάται από το σχεδιασμό της μονάδας παραγωγής ισχύος και τον τρόπο και τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Για το

λόγο αυτό, η ΙΤ είναι ένα πολύ ετερογενές υλικό. Τα χαρακτηριστικά της διαφέρουν με βάση τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, την πηγή του γαιάνθρακα και τις συνθήκες καύσης. Κύριες κρυσταλλικές φάσεις της είναι ο χαλαζίας και ο μολύβδος ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό τους, που αγγίζει το 80% (w/w) βρίσκεται σε άμορφη φάση (μη κρυσταλλική). Οι επιπτώσεις της ΙΤ στο περιβάλλον είναι γνωστές, έτσι επιβάλλεται όχι μόνο η περισυλλογή της, αλλά και η αξιοποίησή της.

Τα παραγόμενα από ΙΤ γεωπολυμερή επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των σωματιδίων της, τη μορφολογία της και την παρουσία κρυσταλλικών φάσεων. Για τη σύνθεση γεωπολυμερών με μεγάλη θλιπτική αντοχή ενδείκνυται η χρήση ΙΤ με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων σωματιδίων (Παναγιωτοπούλου, 2009).

Για να παρασκευαστούν τα γεωπολυμερή, συνήθως χρησιμοποιείται ένα διάλυμα ενεργοποίησης, το οποίο περιλαμβάνει ενώσεις του νατρίου ή/και του καλίου. Τα δύο στοιχεία αυτά είναι ικανά να σχηματίσουν υδατικά διαλύματα υψηλής συγκέντρωσης και να διαλυτοποιήσουν μεγάλες ποσότητες πυριτίου και αργιλίου από την αργιλοπυριτική πρώτη ύλη. Τα διαλύματα ενεργοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως πυριτικά αλκάλια, υδροξειδία αλκαλίων, ανθρακικά αλκάλια ή μίγματα αυτών, όμως μπορούν και άλλα πρόσθετα να χρησιμοποιηθούν, όπως το αργιλικό νάτριο (Ασπρογέρακας, 2013).

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ΙΤ να ενταχθεί στη τεχνολογία σκυροδέματος όχι ως ορυκτό πρόσθετο, αλλά ως το αποκλειστικό συνδετικό υλικό (αντί του τσιμέντου) του σκυροδέματος.

Αρχικά, παρασκευάστηκαν γεωπολυμερικές πάστες (GFA) με βάση την ΙΤ, όπου σε επιλεγμένους λόγους S/L χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα χημικά πρόσμικτα τσιμεντοειδών, διαφορετικών ιδιοτήτων. Στα παραγόμενα GFA όλων των παραπάνω συνθέσεων μετρήθηκε ο χρόνος πήξης, η εργασιμότητα, η συστολή ξήρανσης, η υδατοαπορροφητικότητα και η αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη. Στη συνέχεια, παρασκευάστηκαν γεωπολυμερικά σκυροδέματα (GC) με διαφορετική περιεκτικότητα κατ' όγκο ΙΤ. Ακόμη, για συγκριτικούς λόγους, παρασκευάστηκαν συμβατικά σκυροδέματα (CC) με τσιμέντο Portland, κατάλληλης σύνθεσης και μηχανικών ιδιοτήτων για να γίνει άμεση σύγκριση των ιδιοτήτων τους με τα GC. Τα CC συντηρήθηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-2016.

Πέραν του εισαγωγικού πρώτου κεφαλαίου, η εργασία αποτελείται από τέσσερα ακόμη κεφάλαια, τα περιεχόμενα των οποίων περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

Στο 2^ο Κεφάλαιο, γίνεται αρχικά μία παρουσίαση των απαιτήσεων των προδιαγραφών και του σε ισχύ κανονιστικού πλαισίου που αφορά τα τσιμέντα και τα σκυροδέματα, ώστε να γίνει μία πραγματική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της έρευνας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες σχετικές έρευνες με το αντικείμενο της παρούσας διατριβής, έτσι ώστε να έρθουν και σε μια πιο άμεση σύγκριση και αξιοπιστία τα αποτελέσματά της.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση της μεθοδολογίας της έρευνας της παρούσας διατριβής, καθώς και μία παρουσίαση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν. Για την κάθε δοκιμή αναφέρεται το αντίστοιχο πρότυπο ή οδηγία που χρησιμοποιήθηκε μαζί με κάποιες ενδεικτικές φωτογραφίες.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα, ενώ ταυτόχρονα τα ακολουθεί ένας σχολιασμός συγκρίνοντας τα με τους σχετικούς ισχύοντες κανονισμούς και τη βιβλιογραφία.

Στο 5^ο Κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο για τη γεωπολυμερική πάστα όσο και για το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα και δίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, δίνεται αναλυτικά, με τη μέθοδο Harvard, η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Παγκοσμίως έχουν πραγματοποιηθεί λίγες έρευνες που αφορούν την ένταξη των γεωπολυμερών από ιπτάμενη τέφρα στην τεχνολογία του σκυροδέματος ως κονία συγκόλλησης των αδρανών για την παραγωγή γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των πιο σημαντικών ερευνών αυτών θα παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε έρευνα είναι διαφορετικής σύστασης, λόγω της πρωτογενούς ύλης και της συνθήκης καύσης αυτής. Επίσης, θα δοθούν οι απαιτούμενες πληροφορίες από το θεωρητικό υπόβαθρό και τους σχετικούς σε ισχύ κανονισμούς τσιμέντου και σκυροδέματος.

2.1. Κανονιστικό Πλαίσιο

Οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες προδιαγράφονται στην Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή (ΕΤΕΠ) που δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ 551/2007, στο οποίο αναφέρονται οι απαιτήσεις ή τα όρια που πρέπει να πληρούνται από τις ασβεστούχες τέφρες για τη χρήση τους ως ποζολανικά πρόσμικτα με υδραυλικές ιδιότητες σε σκυρόδεμα (χυτό ή προκατασκευασμένο), καθώς επίσης και σε κονιάματα, ενέματα ή άλλες εφαρμογές σε συνεργασία με τσιμέντο Portland σύμφωνα με ότι ορίζει το ΕΛΟΤ EN 206-1 και το εθνικό προσάρτημα.

Έτσι λοιπόν, γίνεται αντιληπτό ότι δεν υπάρχει κάποια προδιαγραφή – κανονισμός που να αφορά την ιπτάμενη τέφρα (ΙΤ) ως υλικό πλήρης αντικατάστασης του τσιμέντου και γενικά που να αφορά τη γεωπολυμερική πάστα ως συνδετική κονία. Στην παρούσα έρευνα, εφόσον η γεωπολυμερική πάστα έχει αντικαταστήσει πλήρως την πάστα του τσιμεντοπολτού, δίνονται παρακάτω οι απαραίτητες πληροφορίες από τους κανονισμούς που διέπουν το τσιμέντο και το σκυρόδεμα.

2.1.1. Πάστα – Κονία Συγκόλλησης

Το μοναδικό πρότυπο που βασίστηκε η παρούσα έρευνα για τη γεωπολυμερική πάστα ως κονία συγκόλλησης είναι το ΕΛΟΤ EN 197-1, το οποίο αναφέρει τις απαιτήσεις για την αντοχή, το χρόνο πήξης και τη διόγκωση του τσιμέντου. Οι απαιτήσεις για αυτές τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντου κατά ΕΛΟΤ EN 197-1.

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή σε Θλίψη (MPa)			Αρχικός Χρόνος Πήξης	Διόγκωση
	Πρώιμες Αντοχές		Αντοχή Απαιτήσης		
	2 μέρες	7 μέρες	28 μέρες		
32.5 L*	-	≥ 12.0			
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5 ≤ 52.5	≥ 75	
32.5 R	≥ 10.0	-			
42.5 L*	-	≥ 16.0			
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5 ≤ 62.5	≥ 60	≤ 10
42.5 R	≥ 20.0	-			
52.5 L*	≥ 10.0	-			
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5 -	≥ 45	
52.5 R	≥ 30.0	-			

*Strength class only defined for CEM III cements.

2.1.2. Σκυρόδεμα

Οι κανονισμοί στους οποίους βασίστηκε η παρούσα έρευνα για το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα είναι ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ-2016) και ο Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 (ΕΚΩΣ-2000), αφού είναι οι μόνοι εν ισχύ κανονισμοί. Σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016 η εργασιμότητα μπορεί να ελεγχθεί με τέσσερις μεθόδους, όμως μόνο οι δύο χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα, η δοκιμή κάθισης και η δοκιμή του μέτρου εξάπλωσης. Έτσι λοιπόν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 τα όρια των κατηγοριών του εργάσιμου του σκυροδέματος για τη δοκιμή της κάθισης και στον Πίνακα 2.3 για τη δοκιμή της εξάπλωσης.

Πίνακας 2.2: Κατηγορίες Κάθισης.

Κατηγορία	Ονομασία	Κάθιση (mm)*
S1	Ελάχιστα Πλαστικό	10 - 40
S2	Μέτρια Πλαστικό	50 - 90
S3	Πλαστικό	100 - 150
S4	Ημίρρευστο	160 - 210
S5	Ρευστό	> 220

*Η μετρούμενη κάθιση θα στρογγυλεύεται στα πλησιέστερα 10 mm

Πίνακας 2.3: Κατηγορίες Εξάπλωσης.

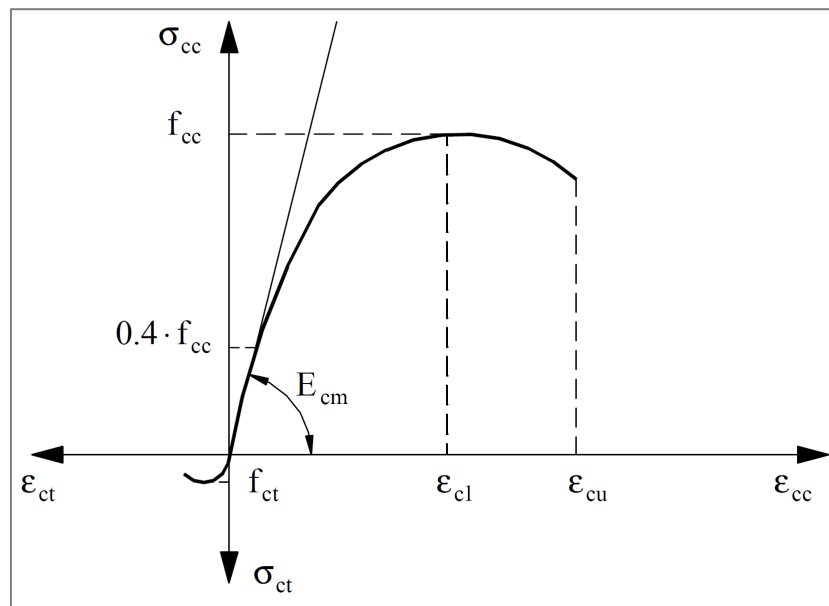
Κατηγορία	Διάμετρος Εξάπλωσης (mm)
F1	≤ 340
F2	350 - 410
F3	420 - 480
F4	490 - 550
F5	560 - 620
F6	≥ 630

Στον ΕΚΩΣ 2000 παρουσιάζεται ανά κατηγορία σκυροδέματος η εφελκυστική αντοχή, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί βάση της χαρακτηριστικής αντοχής του κυλίνδρου. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 2.4: Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος σε MPa.

f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ctk0.05}$	1.10	1.30	1.50	1.80	2.00	2.20	2.50	2.70	2.90
f_{ctm}	1.60	1.90	2.20	2.60	2.90	3.20	3.50	3.80	4.10
$f_{ctk0.95}$	2.00	2.50	2.90	3.30	3.80	4.20	4.60	4.90	5.30

Στο Σχήμα 2.1, παρουσιάζεται σχηματικά η γενική μορφή των διαγραμμάτων τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος όπως αυτό δίνεται και στον ΕΚΩΣ 2000.

**Σχήμα 2.1:** Σχηματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος (c =θλίψη, t =εφελκυσμός).

Πέραν της μορφής του διαγράμματος του Σχήματος 2.1, που παρουσιάζει σχηματικά πως προκύπτει η μέση τιμή του επιβατικού Μέτρου Ελαστικότητας (E_{cm}), στον Πίνακα 2.5 δίνεται ανά κατηγορία σκυροδέματος, όπως αυτό δίνεται στον ΕΚΩΣ 2000.

Πίνακας 2.5: Επιβατικό μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος.

f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
E_{cm} (GPa)	26.0	27.5	29.0	30.5	32.0	33.5	35.0	36.0	37.0

Τέλος, από όλα τα παραπάνω προκύπτει ο λόγος Poisson του σκυροδέματος, ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0.00 και 0.20, όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο ΕΚΩΣ 2000.

2.2. Σχετικές Έρευνες

Όπως αναφέρθηκε και εισαγωγικά, μέχρι σήμερα έχουν γίνει λίγες έρευνες που αφορούν το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα κάποιων εξ αυτών αρχικά για τη γεωπολυμερική πάστα και εν συνεχεία για το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα.

2.2.1. Γεωπολυμερική Πάστα – Κοιλία Συγκόλλησης

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες του γεωπολυμερούς, σε νωπή ή σκληρυμένη κατάσταση, είναι οι μοριακοί λόγοι αλκάλια προς αργίλιο (R/Al) και πυρίτιο προς αργίλιο (Si/Al) (Γιαννοπούλου και Πάνιας, 2008, Trocheza et al., 2015, Κακάλη et al., 2015).

Εκτός από τους μοριακούς αυτούς λόγους, φαίνεται πως και η σχέση μεταξύ στερεών και υγρών του μίγματος γεωπολυμερούς επηρεάζει σημαντικά κάποιες από τις ιδιότητες του. Η μάζα των στερεών (S) αποτελείται από τη μάζα της ΙΤ και τη μάζα των διαλελυμένων στερεών του διαλύματος ενεργοποίησης, ενώ η μάζα των υγρών (L) είναι η μάζα του νερού που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης. Σε σχετικές έρευνες, η σχέση αυτή παρουσιάζεται είτε ως λόγος στερεό προς υγρό (S/L) ή υγρό προς στερεό (L/S). Στις έρευνες αυτές, παρασκευάστηκαν γεωπολυμερή με διαφορετικούς λόγους L/S και κατέληξαν όλες στο συμπέρασμα, ότι ο λόγος αυτός παίζει ρόλο στις αντοχές, αφού όσο αυξάνονταν τα υγρά έδειχναν να μειώνονται οι αντοχές (Adak και Mandal, 2012, Κακάλη et al., 2015).

Πέραν της σύνθεσης του γεωπολυμερούς, σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των αντοχών του έχει και η μέθοδος ωρίμανσής του. Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες μέθοδοι ωρίμανσης των γεωπολυμερών, οι οποίες περιλαμβάνουν θέρμανση σε πυριατήριο, τυλιγμένα με μεμβράνη, εκτεθειμένα με ατμό, θερμή σκλήρυνση με σφυρηλάτηση, υδροθερμική σκλήρυνση, συντήρηση σε θερμοκρασία δωματίου και ωρίμανση εντός του νερού. Σε έρευνα, χρησιμοποιήθηκε πυριατήριο για την ωρίμανση

των γεωπολυμερών που παρασκευάστηκαν εκθέτοντάς τα σε διάφορες θερμοκρασίες συντήρησης από 40°C έως 80°C (Adak και Mandal, 2012). Τα αποτελέσματά έδειξαν ότι η θερμοκρασία ωρίμανσης τις πρώτες μέρες παίζει σημαντικό ρόλο στις αντοχές και μάλιστα τα εκτεθειμένα δείγματα στις υψηλότερες θερμοκρασίες είχαν τις μεγαλύτερες αντοχές. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και άλλη έρευνα, η οποία αναφέρει ότι η θερμοκρασία και η διάρκεια της έκθεσης του γεωπολυμερούς σε αυτή διαδραματίζει μείζονα ρόλο στην ανάπτυξη αντοχής του γεωπολυμερούς (Adam, 2014).

Μια πολύ σημαντική ιδιότητα της πάστας γεωπολυμερούς, για να μπορέσει να συγκριθεί και να αντικαταστήσει το τσιμέντο, είναι ο χρόνος πήξης της. Το αντίστοιχο πρότυπο του κανονισμού ΕΛΟΤ EN 197-1, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, θέτει πολύ σημαντικά όρια. Σε έρευνά με διαφορετικές λιγνιτικές ιπτάμενες τέφρες παρατηρήθηκε ότι οι χρόνοι πήξης της πάστας γεωπολυμερούς επηρεάζονται πολύ από την περιεκτικότητα τους σε οξειδίο του ασβεστίου (CaO). Πιο συγκεκριμένα ο χρόνος πήξης μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε CaO (Wijaya et al., 2017).

Σε άλλη έρευνα, όπου σκοπός ήταν ο έλεγχος του χρόνου πήξης του γεωπολυμερούς, παρασκευάσαν γεωπολυμερή με διάφορους λόγους Νάτριο προς Αργίλιο (Na/Al), Πυρίτιο προς Αργίλιο (Si/Al) και Υγρά προς Στερεά (L/S) και τα δείγματα αφέθηκαν να ωριμάσουν σε διάφορες θερμοκρασίες. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι οι λόγοι Si/Al=2.2, Na/Al=1.4, L/S=0.3 και θερμοκρασία θερμικής ωρίμανσης 40°C δημιούργησαν γεωπολυμερή με μεγάλους χρόνους πήξης. Οι λόγοι Si/Al=1.8, Na/Al=1.0, L/S=0.2 και θερμοκρασία ωρίμανσης 80°C δημιούργησαν γεωπολυμερή με μικρούς χρόνους πήξης. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι ο λόγος L/S επηρέασε περισσότερο τους χρόνους πήξης από το λόγο Na/Al (Siyal et al., 2016). Σε σύμφωνο συμπέρασμα καταλήγει ακόμα μία έρευνα, αφού αναφέρει πως με την αύξηση του λόγου S/L και την αύξηση του Si/Al μειώθηκε ο χρόνος πήξης (Yaseri et al., 2017).

Μία από τις ιδιότητες του νωπού γεωπολυμερούς είναι η εργασιμότητα. Σε έρευνα μελετήθηκαν οι παράμετροι επίδρασης της μελέτης σύνθεσης γεωπολυμερούς στην εργασιμότητα. Ως συμπέρασμα λοιπόν, κατέληξε ότι η εργασιμότητα του γεωπολυμερούς εξαρτάται από τους λόγους Si/Na και L/S (Ghosh και Bhowmick, 2012). Αντίστοιχη έρευνα συμπέρανε ότι με την αύξηση του λόγου S/L μειώνεται η εργασιμότητα, ενώ με την αύξηση του λόγου Si/Al προκαλείται αύξηση της εργασιμότητας (Yaseri et al., 2017).

Η τελική αντοχή σε θλίψη, αλλά και ο ρυθμός ανάπτυξης των αντοχών του γεωπολυμερούς είναι η ιδιότητα που έχει απασχολήσει κατά κόρον τους ερευνητές. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι συνθήκες συντήρησης επηρεάζουν τις τελικές αντοχές, όμως σύμφωνα με σχετική έρευνα, την αντοχή την επηρεάζουν και ο μοριακός λόγος Si/Al και ο λόγος S/L της σύνθεσης του γεωπολυμερούς. Πιο συγκεκριμένα αναφέρει ότι όσο αυξάνονται και οι δύο αυτοί λόγοι, τότε αυξάνεται και τελική αντοχή (Yaseri et al., 2017). Όμως, με το συνδυασμό πολύ υψηλών λόγων S/L και Si/Al, τότε

οι αντοχές πέφτουν αρκετά, ίσως γιατί δεν επαρκούν τα υγρά στοιχεία του μίγματος για να ολοκληρωθεί ο γεωπολυμερισμός, κάτι που προκύπτει και από τα XRD των συνθέσεων που παρουσιάζονται στην αντίστοιχη εργασία.

Στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής παρασκευάστηκαν γεωπολυμερή με διαφορετικούς λόγους αλκάλια προς αργίλιο (R/Al), νάτριο προς νάτριο και κάλιο (Na/(Na+K)) και διαφορετική περιεκτικότητα του διαλύματος ενεργοποίησης σε διαλυτό πυρίτιο (Si/R₂O). Μία από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και αφορά την παρούσα εργασία, είναι η μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητας και του πορώδους των γεωπολυμερών αυτών και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με συμβατικά τσιμεντοκονιάματα. Το συμπέρασμα που εξήγαγε είναι ότι τα γεωπολυμερή παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη υδατοαπορροφητικότητα σε σχέση με τα τσιμεντοκονιάματα. Επίσης, ότι το ανοιχτό πορώδες των γεωπολυμερικών κονιαμάτων είναι ανταγωνιστικό του πορώδους των συμβατικών τσιμεντοκονιαμάτων. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη της ασβεστολιθικής άμμου φαίνεται να βελτιώνει τη συνεκτικότητα των γεωπολυμερών, μειώνοντας το ανοιχτό πορώδες τους (Ασπρογέρακας, 2013).

Σε άλλη έρευνα, παρασκευάστηκαν γεωπολυμερή από ιπτάμενη τέφρα με σκοπό να μετρηθεί η συστολή ξήρανσης (ϵ_{cs}) τους και να συγκριθεί με αντίστοιχα δοκίμια συμβατικού τσιμέντου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για 70 ημέρες και τα δοκίμια συντηρούνταν σε διαφορετικές σχετικές υγρασίες περιβάλλοντος (RH). Οι ενδιαφέρουσες για την παρούσα εργασία μετρήσεις αφορούν την RH=30% και 50%, όπου και στα δύο περιβάλλοντα αυτά τα γεωπολυμερή είχαν κατά πολύ μικρότερη συρρίκνωση από το συμβατικό τσιμέντο. Οι μετρήσεις σε RH=50% έδειξαν να σταθεροποιούνται για όλες τις συνθέσεις γεωπολυμερών από τις 40 μέρες και μετά. Η συρρίκνωση της σύνθεσης ϵ_{cs} κυμαινόταν από $-800 \cdot 10^{-6}$ έως $-1500 \cdot 10^{-6}$. Στα γεωπολυμερή που συντηρήθηκαν σε RH=30% οι δύο συνθέσεις με τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη ϵ_{cs} κυμαινόταν από $-1000 \cdot 10^{-6}$ έως $-2000 \cdot 10^{-6}$, ενώ έδειξαν οι μετρήσεις για όλες τις συνθέσεις να μην έχουν σταθεροποιηθεί πλήρως μέχρι και το τέλος των μετρήσεων των 70 ημερών (Hojati και Rajabirour, 2016).

Τα χημικά πρόσμικτα χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην παραγωγή τσιμεντοειδών, αφού τροποποιούν ή βελτιώνουν τις ιδιότητές τους. Σε έρευνα μελετήθηκε η επίδραση των χημικών προσμίκτων στις ιδιότητες του γεωπολυμερούς από ιπτάμενη τέφρα. Συμπερασματικά, η εργασία αυτή κατέληξε ότι ορισμένα χημικά πρόσμικτα μπορούν άνετα να χρησιμοποιηθούν στο γεωπολυμερές από ιπτάμενη τέφρα για τον έλεγχο του χρόνου πήξης και εν συνεχεία των πρώιμων αντοχών του, χωρίς να δημιουργούν πρόβλημα στις τελικές αντοχές (Rattanasak et al., 2011).

2.2.2. Γεωπολυμερικό Σκυροδέμα

Λίγες, αλλά σημαντικές έρευνες έχουν γίνει για τη μελέτη των ιδιοτήτων του νωπού και του σκληρυμένου γεωπολυμερικού σκυροδέματος, οι οποίες έχουν συγκριθεί με τις αντίστοιχες του συμβατικού σκυροδέματος για να κριθεί εάν είναι κατάλληλο προς χρήση.

Η εργασιμότητα του σκυροδέματος είναι σημαντικό να είναι ελεγχόμενη, διότι υπάρχουν κατασκευές διαφόρων απαιτήσεων. Κάποιες απαιτούν το σκυρόδεμα να είναι πολύ ρευστό και κάποιες άλλες σχεδόν καθόλου, φυσικά πάντα υπάρχουν και οι ενδιάμεσες καταστάσεις. Στη χρήση του συμβατικού σκυροδέματος χρησιμοποιούνται χημικά πρόσμικτα ή πρόσθετα για να ελεγχθεί η εργασιμότητα, με απαραίτητη προϋπόθεση να μην μειωθούν οι τελικές αντοχές του. Κάτι αντίστοιχο θα πρέπει να μπορεί να επιτυγχάνεται και στο γεωπολυμερικό σκυρόδεμα. Κάνοντας πράξη τη σκέψη αυτή, πραγματοποιήθηκε έρευνα όπου μελετήθηκε η επίδραση του νερού μέσω του λόγου L/S στην αντοχή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Η έρευνα έδειξε ότι στους λόγους 0.20 έως 0.30 η αντοχή δεν επηρεάζεται σημαντικά, σε αντίθεση με την εργασιμότητα που έδειξε ανάλογη με την προσθήκη του νερού. Στους μεγαλύτερους από 0.35 λόγους L/S άρχισε να μειώνεται η αντοχή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος (Patankar et al., 2013). Σε άλλη έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν χημικά πρόσμικτα και πυριτική παιπάλη (silica fume) για να μελετηθεί αν μπορεί να ελεγχθεί η εργασιμότητα γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε η έρευνα αυτή, είναι ότι η εργασιμότητα μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας του silica fume, ενώ μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη υπερρρευστοποιητή (Bhavsar et al., 2014).

Το εγκλωβισμένο ποσοστό αέρα εντός του σκυροδέματος δημιουργεί ασυνέχειες με αποτέλεσμα τη μείωση των τελικών του αντοχών. Στα συνήθη συμβατικά σκυροδέματα το ποσοστό αέρα κυμαίνεται από 1.5% έως 2.5%. Τα όρια της αεροπεριεκτικότητας που φαίνεται να κυμαίνεται το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα μετά από έρευνες φαίνεται να είναι από 2% έως 3% (Kong et al., 2010, Anuradha et al., 2012).

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η διαδικασία ωρίμανσης των γεωπολυμερών παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των αντοχών, έτσι λοιπόν ερευνητές μελέτησαν την επίδραση των συνθηκών ωρίμανσης στις αντοχές του γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών της έρευνάς τους έδειξαν ότι ο χρόνος (24-96 h) και η θερμοκρασία έκθεσης (60-90°C) επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή σε θλίψη του γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, όσο περισσότερο χρόνο εκτίθεται το δοκίμιο, τόσο βελτιώνει τη διαδικασία γεωπολυμερισμού με αποτέλεσμα μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη. Επίσης, αύξηση της θλιπτικής αντοχής παρατηρήθηκε και με την αύξηση της θερμοκρασίας ωρίμανσης από 60 σε 70°C (Memon et al., 2011). Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας σκλήρυνσης πέρα από τους 70°C μείωσε τη θλιπτική αντοχή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος, κάτι με το οποίο ήρθε σε συμφωνία και άλλη παρόμοια έρευνα (Naik et al., 2016).

Η τελική αντοχή είναι εν κατακλείδι η ιδιότητα που αφορά τους περισσότερους μελετητές μηχανικούς. Έρευνα μελέτησε πειραματικά τους παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Κατέληξαν στο γενικό συμπέρασμα ότι υπάρχουν διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή του σε θλίψη. Συνεπώς, συνιστάται πρώτα η παραμετρική μελέτη διάφορων παραγόντων που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, πριν διεξαχθούν

περαιτέρω έρευνες σχετικές με τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα του γεωπολυμερικού σκυροδέματος προκειμένου να αποκτηθούν τα επιθυμητά οφέλη (Sharma και Ahmad, 2017).

Πέραν της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, έχει μελετηθεί και η εφελκυστική αντοχή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος με πλήρη και μερική αντικατάσταση του τσιμέντου, με τη δοκιμή της κάμψης δύο σημείων, αλλά και με τη δοκιμή διάρρηξης κυλίνδρου. Ως γενικό συμπέρασμα καταλήγει έρευνα ότι οι τιμές της αντοχής σε θλίψη, της αντοχής σε διάρρηξη και της αντοχής σε κάμψη στις 28 ημέρες είναι οι υψηλότερες όταν η αναλογία αντικατάστασης είναι 50% του τσιμέντου σε σύγκριση με τα μίγματα που παράγονται από 0%, 25%, 75% και 100% αντικατάσταση (Shehab et al., 2016).

Στα πλαίσια μίας μεγάλης έρευνας, που αφορούσε την ανάπτυξη των ιδιοτήτων γεωπολυμερικού σκυροδέματος με χαμηλής περιεκτικότητας ασβεστίου ιπτάμενης τέφρας, μετρήθηκε το Μέτρο Ελαστικότητας (E_{cm}) και υπολογίστηκε ο Λόγος Poisson (ν). Στα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, φαίνεται ότι σε γεωπολυμερικά σκυροδέματα θλιπτικής αντοχής από 44 έως 89 MPa, το E_{cm} κυμαίνεται από 23.0 έως 30.8 GPa αντίστοιχα. Ο Λόγος Poisson υπολογίστηκε από 0.12 έως 0.16 και μάλιστα χωρίς αναλογική αντιστοιχία με τις αντοχές και το E_{cm} (Hardjito και Rangan, 2005). Σε άλλη σχετική έρευνα σε γεωπολυμερικά σκυροδέματα αντοχής από 36.8 έως 45.3 MPa υπολογίστηκε το E_{cm} από 14 έως 24 GPa αντίστοιχα (Uddin et al., 2016).

Πολλές φορές στις υφιστάμενες κατασκευές είναι αδύνατο να μετρηθεί η αντοχή του σκυροδέματος άμεσα, έτσι λοιπόν υπάρχουν και οι έμμεσες μέθοδοι υπολογισμού της αντοχής. Η πιο διαδεδομένη δοκιμή είναι ο προσδιορισμός της ταχύτητας μετάδοσης του ήχου με υπέρηχους (UPV). Σε έρευνα μετρήθηκε το UPV του γεωπολυμερικού σκυροδέματος σε διάφορες συνθέσεις και σε διαφορετικές ηλικίες. Ως γενικό συμπέρασμα καταλήγει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί το UPV για να διερευνηθεί η εξέλιξη της αντοχής στο γεωπολυμερικό σκυροδέμα (Ghosh et al., 2018). Στο ίδιο γενικό συμπέρασμα κατέληξε ακόμα μία αντίστοιχη έρευνα (Kim et al., 2015). Εδώ, όμως, θα πρέπει να αναφερθεί ότι και στις δύο παραπάνω έρευνες δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια από τις εξισώσεις εκτίμησης της θλιπτικής αντοχή μέσω UPV, οι οποίες παρουσιάζονται εκτενώς στο σύγγραμμα των Σπανός et al. (2006), αλλά παρέμειναν μόνο απλά στην καταγραφή του UPV.

Σε έρευνα που μελετήθηκε η υδατοαπορροφητικότητα γεωπολυμερικού σκυροδέματος και τα αποτελέσματα της συγκρίθηκαν με αυτά του συμβατικού σκυροδέματος, κατέληξε στο γενικό συμπέρασμα ότι η καμπύλη υδατοαπορροφητικότητας του γεωπολυμερικού σκυροδέματος έχει μικρότερη κλίση σε σύγκριση με την καμπύλη του συμβατικού. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός απορρόφησης του γεωπολυμερικού σκυροδέματος είναι μικρότερος. Επίσης, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το πορώδες του γεωπολυμερικού σκυροδέματος είναι μικρότερο, καθώς η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε είναι πιο λεπτόκοκκη από το τσιμέντο και οδηγεί σε λιγότερη απορρόφηση νερού από το συμβατικό σκυροδέμα (Luhar et al., 2015).

Ερευνητές μελέτησαν την επίδραση της ψύξης – απόψυξης στις μηχανικές ιδιότητες του γεωπολυμερικού σκυροδέματος και τις σύγκριναν με τις αντίστοιχες του συμβατικού σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής έδειξαν ότι η απώλεια μάζας μετά από 28 κύκλους ψύξης – απόψυξης ήταν μικρότερη από 1% για όλα τα δείγματα (Pilehvar et al., 2019).

Στα πλαίσια μεγάλης έρευνας μελετήθηκε η υδατοαπορροφητικότητα, το πορώδες, η ανθεκτικότητα σε κύκλους ξήρανσης – εμβάπτισης, η ανθεκτικότητα σε χημική προσβολή και η διάχυση χλωριόντων γεωπολυμερικού και συμβατικού σκυροδέματος. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε το γενικό συμπέρασμα ότι μπορούν τα γεωπολυμερικά σκυροδέματα να συγκριθούν επάξια με τα συμβατικά. Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ιδιότητες που σχετίζονται με τη μικροδομή, όπως η απορρόφηση νερού και το πορώδες του γεωπολυμερικού σκυροδέματος, φαίνεται να είναι χαμηλότερες από εκείνες του συμβατικού. Ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων τόσο στα γεωπολυμερικά όσο και στα συμβατικά σκυροδέματα ήταν σχεδόν ίσος. Επίσης, παρατήρησαν ότι τα δείγματα γεωπολυμερικού σκυροδέματος παρουσιάζουν εξαιρετική ανθεκτικότητα σε χημική προσβολή από θειικό οξύ, αφού υπέστησαν απώλεια μάζας μικρότερη από 2% σε διάλυμα 3% θειικού οξέος, ενώ η αντίστοιχη απώλεια βάρους για δείγματα συμβατικού σκυροδέματος κυμαινόταν από 26% έως 27%. Η απώλεια μάζας στην έκθεση σε θειικά άλατα τόσο για τα γεωπολυμερικά όσο και για τα συμβατικά σκυροδέματα ήταν μικρότερη του 1%. (Ganesan et al., 2015).

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι για τα γεωπολυμερικά σκυροδέματα δεν έχει μελετηθεί η ανθεκτικότητα τους σε περιβάλλον θεικών ιόντων και ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε η επίδραση του ασβεστόλιθου στην ανθεκτικότητα δομικών υλικών σε περιβάλλον θεικών ιόντων. Η διατριβή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα δομικά υλικά τα οποία περιέχουν ασβεστόλιθο ως κύριο συστατικό του τσιμέντου ή/και ως αδρανές παρουσιάζουν μειωμένη ανθεκτικότητα σε περιβάλλον θεικών ιόντων σε χαμηλές θερμοκρασίες (5°C). Η προσβολή από θειικά ιόντα είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του συνδετικού υλικού σε ασβεστόλιθο. Το κύριο προϊόν της φθοράς είναι ο ταουμασίτης, ενώ παράλληλα καταναλώνεται ο πορτλαντίτης και σχηματίζονται δευτερογενής γύψος και μπρουσίτης. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι κανένα σημάδι φθοράς δεν εντοπίστηκε τόσο σε κονιάματα όσο και σε σκυροδέματα τα οποία εκτέθηκαν στο διαβρωτικό περιβάλλον 25°C, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συμβατική προσβολή από θειικά ιόντα στους 25°C και ο σχηματισμός ετρινγκίτη είναι πιο αργή διεργασία από την προσβολή στους 5°C και το σχηματισμό ταουμασίτη (Σκαροπούλου, 2009).

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Όλες οι εργαστηριακές δοκιμές της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ και στο Εργαστήριο Ελέγχου και Αντοχής Υλικών του Τμήματος Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών της ΑΣΠΑΙΤΕ. Αρκετές από τις δοκιμές επαναλήφθηκαν στο Εργαστήριο της Εταιρείας ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΚΗ ΑΤΕ, για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

3.1. Πειραματικός Σχεδιασμός

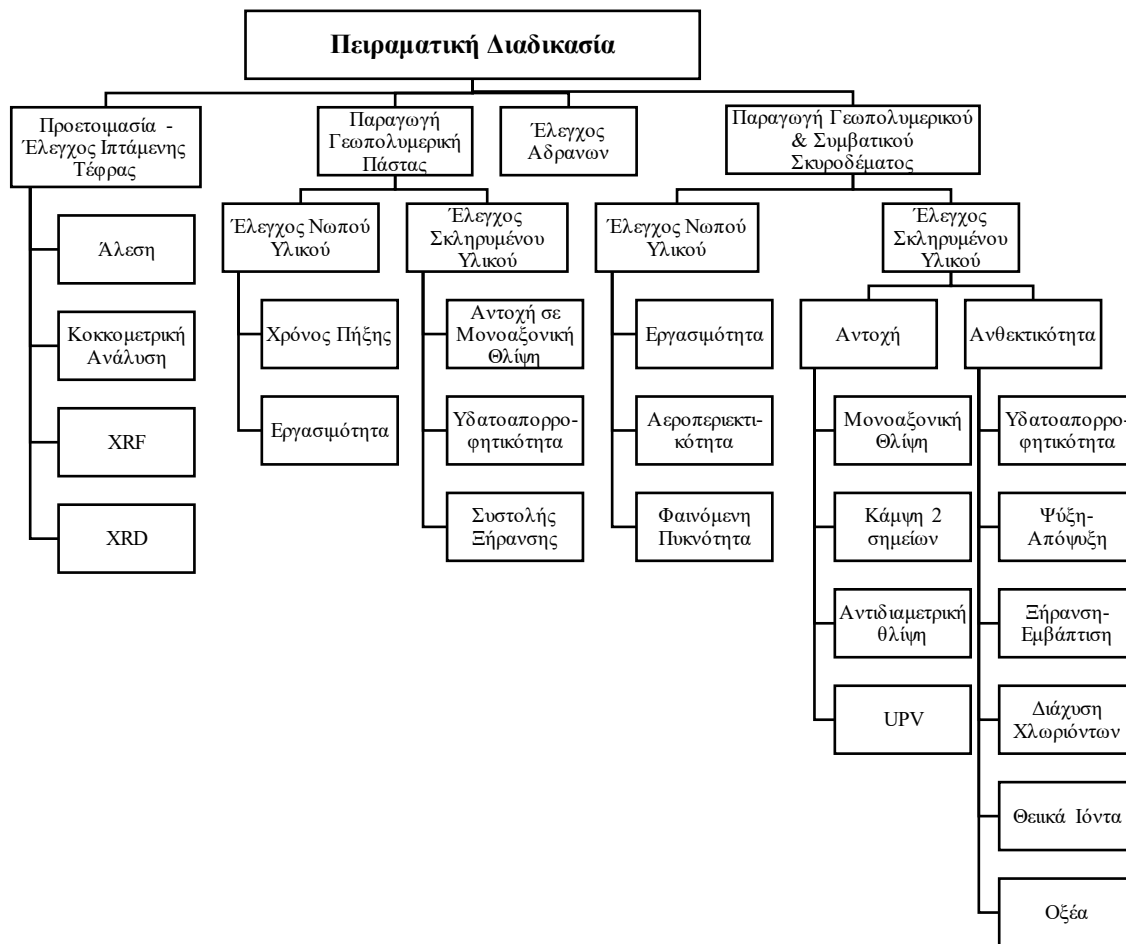
Μελετώντας τη βιβλιογραφία και σχετικές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί αποφασίστηκε αρχικά να γίνει ένας έλεγχος ποιότητας της βασικής πρώτης ύλης, της ιπτάμενης τέφρας (IT). Ο έλεγχος αυτός είχε σκοπό να αποτυπωθεί η ικανότητα της να παράγει μία γεωπολυμερική πάστα (GFA) ικανή να ενταχθεί στην τεχνολογία του σκυροδέματος.

Στη συνέχεια μελετήθηκαν οι ιδιότητες της παραγόμενης γεωπολυμερικής πάστας, τόσο για την σταθερότητα της, όσο και για τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων της ή στην τροποποίηση αυτών με σκοπό την άμεση σύγκριση του αποτελέσματος με τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1, το οποίο προδιαγράφει τα απαιτούμενα κριτήρια για τα τσιμέντα.

Όταν όλα τα παραπάνω κατέληξαν σε κάποιο επαρκές συμπέρασμα, παρασκευάστηκε το γεωπολυμερικό σκυροδέμα (GC), το οποίο ήταν και ο τελικός στόχος της διατριβής αυτής. Στο παραγόμενο GC ελέγχθηκαν οι ιδιότητες και έγιναν εκ νέου διάφορες δοκιμές για τη βελτιστοποίηση, αλλά και τη σταθερότητα αυτού με σκοπό την παραγωγή των τελικών συνθέσεων.

Τέλος, παρασκευάστηκαν οι τελικές συνθέσεις GC, οι οποίες συγκρίθηκαν με αντίστοιχες συνθέσεις συμβατικού σκυροδέματος (CC) καθώς επίσης ελέγχθηκαν όλες οι ιδιότητες σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σε ισχύ Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ-2016) και του σε ισχύ Ελληνικού Κανονισμού Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 (ΕΚΩΣ 2000).

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας (Σχήμα 3.1) παρουσιάζονται περιεκτικά όλες οι προγραμματισμένες εργασίες και έλεγχοι που προαναφέρθηκαν, ανά φάση:



Σχήμα 3.1: Περιεκτικό σκαρίφημα πειραματικής διαδικασίας.

3.2. Πρώτες Ύλες

Για την παρασκευή των απαραίτητων δειγμάτων, σύμφωνα με τον παραπάνω προγραμματισμό, χρησιμοποιήθηκαν ιπτάμενη τέφρα, διάλυμα ενεργοποίησης, τσιμέντο και αδρανή, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στις παρακάτω ενότητες.

3.2.1. Ιπτάμενη Τέφρα

Ως πρώτη και βασική ύλη επιλέχθηκε ελληνική ιπτάμενη τέφρα, η οποία είναι παραπροϊόν από τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε η ιπτάμενη τέφρα που προέρχεται από την καύση λιγνίτη στο εργοστάσιο ΑΗΣ της Μεγαλόπολης.

Η χημική σύσταση της ΙΤ εξαρτάται από την αρχική σύσταση του άνθρακα, ενώ η ορυκτολογική της σύσταση εξαρτάται από το σχεδιασμό της μονάδας παραγωγής ισχύος, καθώς και από τις συνθήκες λειτουργίας της. Έτσι λοιπόν, τα χαρακτηριστικά της ΙΤ δεν μπορούν να θεωρηθούν σταθερά για την κάθε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, αφού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την πηγή του

γαιάνθρακα και από τις συνθήκες καύσης. Γενικά, η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί ένα πολύ ετερογενές υλικό (Ασπρογέρακας, 2013). Λόγω, λοιπόν, του όγκου των πειραμάτων και της εξάρτησης της παραγόμενης ΙΤ από την καύση του λιγνίτη, υπήρξε μικρή διαφοροποίηση στην τέφρα που χρησιμοποιήθηκε στην παραγωγή γεωπολυμερικής πάστας και σε αυτή που χρησιμοποιήθηκε για το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα.

Η πυκνότητα της ΙΤ μετρήθηκε στο εργαστήριο ακολουθώντας το πρότυπο για τσιμέντα ASTM C188 (φιάλη Le Chatelier) και βρέθηκε 2500 kg/m^3 .

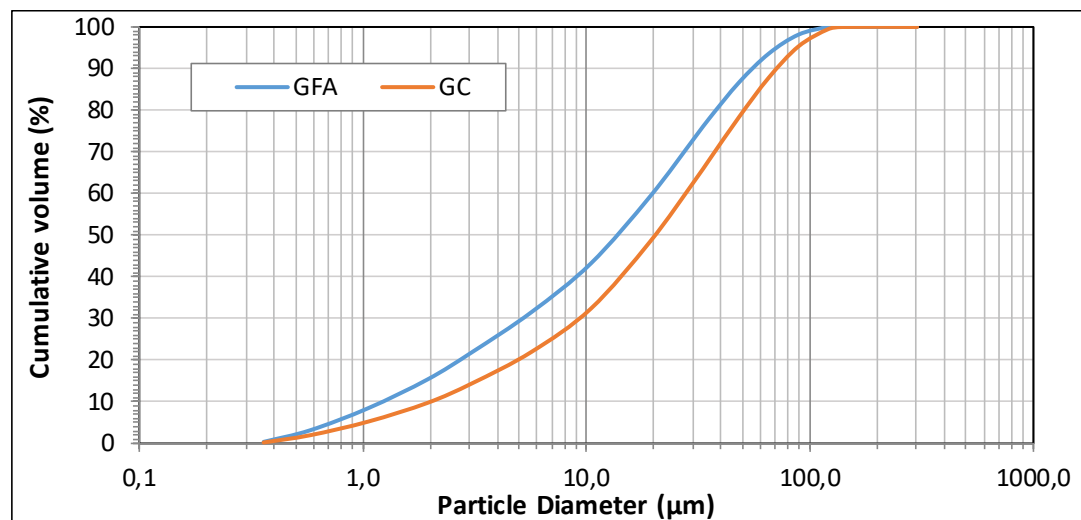
Η χημική σύσταση της ΙΤ που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή της γεωπολυμερικής πάστας (GFA) και του γεωπολυμερικού σκυροδέματος (GC), παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση ιπτάμενης τέφρας (% κ.β.).

Χρήση	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O _{eq}	SO ₃	L.O.I.
GFA	48.28	22.06	6.45	15.12	2.5	0.32	0.68	2.99
GC	46.60	17.30	8.16	11.73	2.66	0.60	2.87	5.10

Για να επιτευχθεί ο γεωπολυμερισμός, πρέπει το υλικό να είναι λεπτόκοκκο, κάτω από το 0.063 mm , για να μπορέσει να διεισδύσει το διάλυμα ενεργοποίησης στον πυρήνα του υλικού και να επιτευχθεί ο γεωπολυμερισμός (Νικολουτσόπουλος, 2017). Έτσι λοιπόν, οι συγκεκριμένες ΙΤ αλέστηκαν σε σφαιρόμυλο pro-pilot plant δυναμικότητας 5 kg .

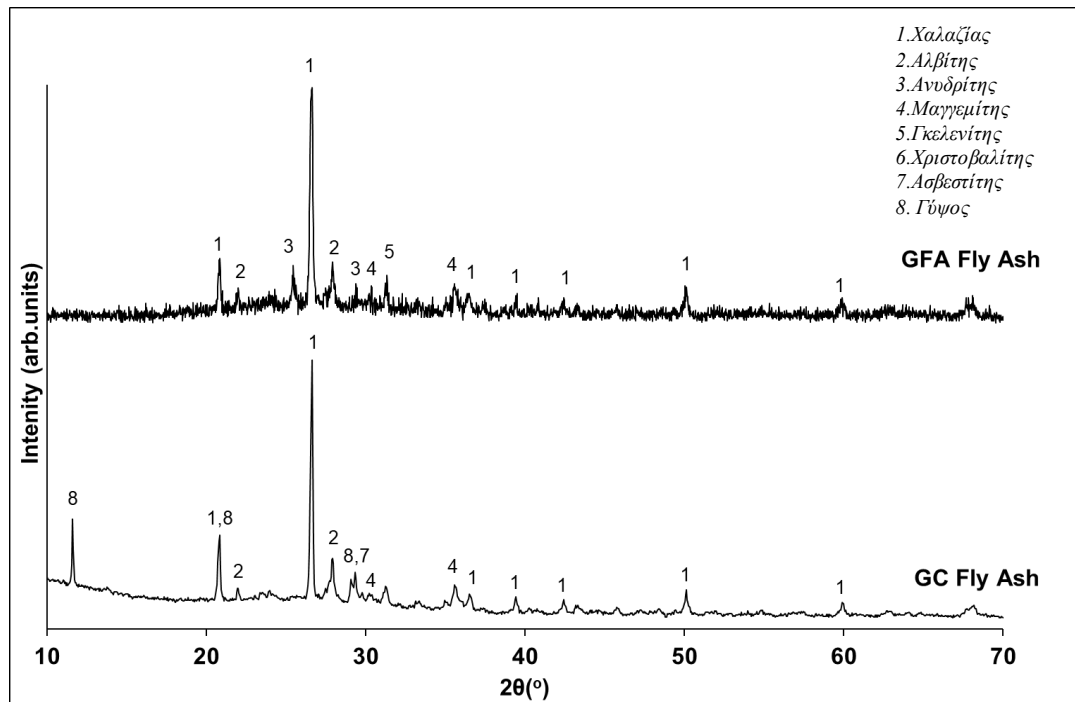
Το Σχήμα 3.2, όπου παρουσιάζεται η κοκκομετρική ανάλυση της ΙΤ που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή του GFA και αυτής που χρησιμοποιήθηκε στο GC, δείχνει ότι το μέσο μέγεθος κόκκων (d_{50}) ήταν περίπου $15 \text{ }\mu\text{m}$ και $20 \text{ }\mu\text{m}$, ενώ το d_{90} ήταν $60 \text{ }\mu\text{m}$ και $70 \text{ }\mu\text{m}$ αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2: Κοκκομετρική ανάλυση ιπτάμενων τεφρών που χρησιμοποιήθηκαν στη γεωπολυμερική πάστα (GFA) και στο γεωπολυμερικό σκυρόδεμα (GC).

Στη συνέχεια και στις δύο ιπτάμενες τέφρες που χρησιμοποιήθηκαν έγινε ταυτοποίηση των ορυκτολογικών τους φάσεων με περίθλαση ακτίνων X (XRD), η

οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3. Παρατηρείται ότι η IT για τα GC έχει περισσότερο ασβέστιο, το οποίο βρίσκεται στη γύψο και στον ασβεστίτη.



Σχήμα 3.3: XRD IT που χρησιμοποιήθηκε στα GFA και GC.

3.2.2. Διάλυμα Ενεργοποίησης

Για να ενεργοποιηθούν οι αργιλοπυριτικές αντιδράσεις και να εκκινήσει ο γεωπολυμερισμός χρησιμοποιείται το διάλυμα ενεργοποίησης, το οποίο στην παρούσα διατριβή για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκε σύμφωνα με τις βέλτιστες τιμές των μοριακών λόγων αλκάλια προς αργίλιο (R/Al) και πυρίτιο προς αργίλιο (Si/Al), αλλά και του λόγου στερεό προς υγρό (S/L). Πιο συγκεκριμένα, παρασκευάστηκε αναδεύοντας τα υλικά προς ομογενοποίηση για 1 h στις 500 rpm και στη συνέχεια αφέθηκε για 15-20 min σε ηρεμία, με σκοπό να πέσει και η θερμοκρασία του σε φυσιολογικά επίπεδα. Τα υλικά αυτά ήταν:

- Κολλοειδές διάλυμα πυριτίας, υδρύαλος νατρίου (1370 kg/m³)
- Καυστικό νάτριο σε μορφή pellet (2103 kg/m³)
- Νερό ΕΥΔΑΠ

3.2.3. Τσιμέντο

Για την παρασκευή των CC χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικής κατηγορίας αντοχής τσιμέντα κατά ΕΛΟΤ EN 197-1, με σκοπό τη διαφορετική αντοχή στο τελικό παραγόμενο σκυρόδεμα και ήταν τα εξής.

- CEM II / B-M (W-L) 32.5 R
Πρόκειται για ένα σύνθετο τσιμέντο Portland υψηλών πρώιμων αντοχών με πυριτική ιπτάμενη τέφρα και ασβεστόλιθο, κατάλληλο για όλες τις οικοδομικές

εφαρμογές, όπως έργα πολιτικού μηχανικού, οικοδομικά έργα, έτοιμο σκυρόδεμα και προϊόντα σκυροδέματος, σοβάτισμα, παραθαλάσσιο σκυρόδεμα και ογκώδεις κατασκευές.

- **CEM II / B-M (P-W-L) 42.5 N**

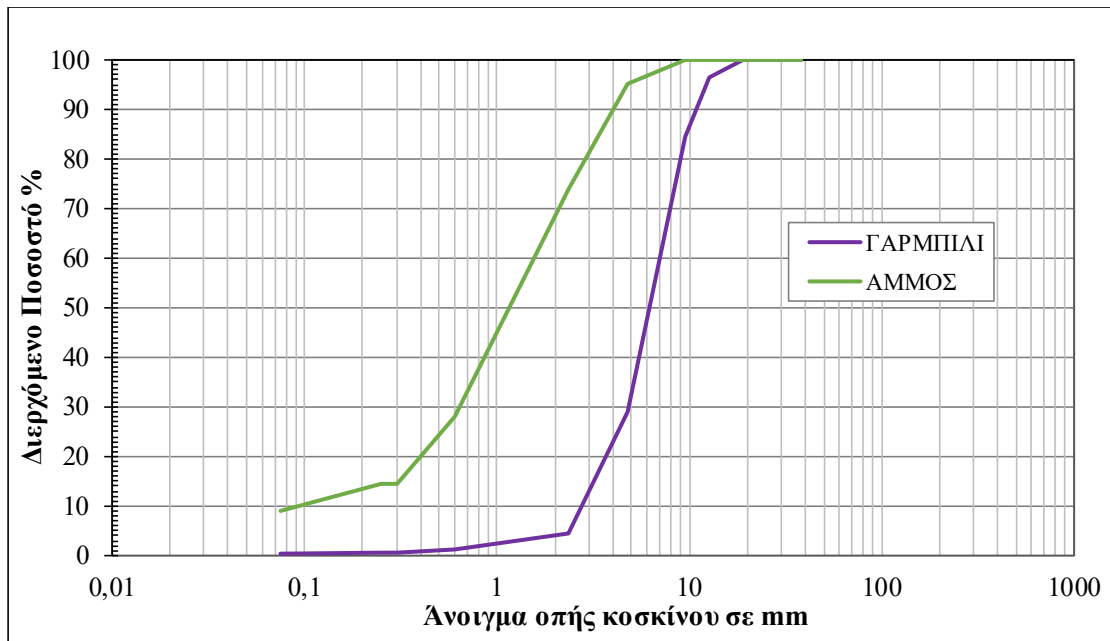
Πρόκειται για ένα σύνθετο τσιμέντο Portland, με φυσική ποζολάνη, πυριτική ιπτάμενη τέφρα και ασβεστόλιθο, ειδικά κατάλληλο για έργα πολιτικού μηχανικού, οικοδομικά έργα, έτοιμο σκυρόδεμα και προϊόντα σκυροδέματος.

3.2.4. Αδρανή Υλικά

Στις συνθέσεις του γεωπολυμερικού και συμβατικού σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν ως αδρανή υλικά μόνο γαρμπίλι και άμμος, τα οποία ήταν θραυστά ασβεστολιθικά λατομείου. Τα αδρανή υλικά ελέγχθηκαν για να διαπιστωθεί αν καλύπτουν τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 12620, στο οποίο κάνει παραπομπή ο ΚΤΣ-2016. Τα αποτελέσματα από τους ελέγχους αυτούς, παρουσιάζονται αναλυτικά μαζί με τα όρια του κανονισμού στον Πίνακα 3.2, καθώς και η κοκκομετρική τους ανάλυση στο Σχήμα 3.4.

Πίνακας 3.2: Απαιτήσεις και αποτελέσματα ελέγχου αδρανών υλικών.

Δοκιμή	Πρότυπο	Υλικό	Όριο Κανονισμού	Αποτέλεσμα
Δείκτης Πλακοειδούς	ΕΛΟΤ EN 933-3	Γαρμπίλι	≤35%	19%
Κοκκομετρική Ανάλυση	ΕΛΟΤ EN 933-1	Άμμος	D≤4 mm και d=0	4 mm και 0 mm
		Γαρμπίλι	D/d>2 και D>11.2 mm	2.8 και 12 mm
Ποσοστό Παιπάλης	ΕΛΟΤ EN 933-1	Άμμος	≤ 16%	9.0%
		Γαρμπίλι	≤ 1.5%	0.4%
Τριβή και κρούση LA	ΕΛΟΤ EN 1097-2	Γαρμπίλι	≤ 40%	26%
Ισοδύναμο Άμμου	ΕΛΟΤ EN 933-8	Γαρμπίλι	≥ 60%	76%
Οργανικές Ουσίες	ΕΛΟΤ EN 12620	Άμμος	≤ 0.5%	0.44%
		Γαρμπίλι	≤ 0.1%	0.09%
Πυκνότητα	ΕΛΟΤ EN 1097-6	Άμμος	≤ 3000 kg/m ³ ≥ 2000 kg/m ³	2626 kg/m ³
		Γαρμπίλι	≤ 3000 kg/m ³ ≥ 2000 kg/m ³	2678 kg/m ³
Υδατοαπορροφητικότητα	ΕΛΟΤ EN 1097-6	Άμμος	-	0.84%
		Γαρμπίλι	-	0.54%



Σχήμα 3.4: Κοκκομετρική ανάλυση άμμου και γαρμπιλιού.

3.2.5. Χημικά Πρόσμικτα και Άλλα Υλικά

Σε επιλεγμένες και μόνο συνθέσεις γεωπολυμερικής πάστας (GFA) χρησιμοποιήθηκαν και χημικά πρόσμικτα, τα οποία καλύπτουν τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN 934-1 και είχαν μεταξύ τους διαφορετικές ιδιότητες. Τα συγκεκριμένα χημικά πρόσμικτα προορίζονται από την εταιρεία παραγωγής τους προς χρήση σε τσιμεντοειδή και όχι σε γεωπολυμερή. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν τα προαναφερθέντα, είναι διότι δεν παράγονται ακόμα χημικά πρόσμικτα για γεωπολυμερή.

Το ποσοστό χρήσης του κάθε χημικού πρόσμικτου επιλέχθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του τεχνικού φυλλαδίου που το συνοδεύει, όπου όμως αντί για κατά βάρος (κ.β.) τσιμέντου έγινε χρήση κ.β. ΙΤ. Τα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα παρακάτω:

- Υπερρευστοποιητής με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM).
Εφαρμόζεται σε σκυροδέματα με μειωμένο λόγο N/T, για αυξημένη ρευστότητα και αυξημένο χρόνο εργασιμότητας, για σκυροδετήσεις σε υψηλές θερμοκρασίες, με μειωμένη υδατοπερατότητα. Βελτιώνει την εργασιμότητα χωρίς να αυξάνει το νερό ανάμιξης. Αυξάνει τις τελικές αντοχές και μειώνει την υδατοπερατότητα, τη συστολή ξήρανσης και τον ερπυσμό. Από τον κατασκευαστή του προτείνεται 0.2–0.8% κ.β. τσιμέντου.
- Επιταχυντής πήξης Sigunit L-22E (SG).
Επιταχύνει την πήξη και προκαλεί ταχεία ανάπτυξη των αντοχών, με σκοπό να βελτιώσει την πρόσφυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και επιτρέπει την αύξηση του ρυθμού εκτόξευσης. Από τον κατασκευαστή προτείνεται η δοσολογία να κυμαίνεται από 2–6% κ.β. τσιμέντου.

- Υπερρρευστοποιητής ViscoFlow-700 (VF).
Χρησιμοποιείται για μεταφορά σκυροδέματος σε ζεστό και κρύο κλίμα. Είναι κατάλληλος για σκυροδέματα με υψηλές απαιτήσεις σε νερό και αντοχές, καθώς αυξάνει τη ρευστότητα του σκυροδέματος και διατηρεί την εργασιμότητα του χωρίς αρνητικές επιδράσεις. Επίσης, βοηθάει στη μείωση της συστολής ξήρανσης και του ερπυσμού. Η προτεινόμενη δοσολογία είναι 0.4–2.5% κ.β. τσιμέντου.
- Σταθεροποιητής ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST).
Χρησιμοποιείται κυρίως σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και σταθεροποιεί τα μίγματα για μεγάλες χρονικές περιόδους, χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του σκυροδέματος. Δεν περιέχει χλωριόντα και κατά συνέπεια δεν επηρεάζει τον οπλισμό. Προτεινόμενη δοσολογία είναι 0.5–2% κ.β. τσιμέντου.

Για τη δοκιμή της διάχυσης χλωριόντων χρησιμοποιήθηκε ως στεγανοποιητικό υλικό το Sikadur-32 EF, το οποίο είναι δύο συστατικών δομητικό συγκολλητικό, με ανοχή στην υγρασία του υποστρώματος, βάσεως συνδυασμού εποξειδικών ρητινών και ειδικών πληρωτικών υλικών.

3.3. Μελέτη Σύνθεσης, Παραγωγή και Συντήρηση

Αρχικά έγιναν οι συνθέσεις γεωπολυμερικής πάστας (GFA), στη συνέχεια οι συνθέσεις γεωπολυμερικού σκυροδέματος (GC) και τέλος οι αντίστοιχες συνθέσεις συμβατικού σκυροδέματος CC.

3.3.1. Γεωπολυμερική Πάστα (GFA)

Για την παρασκευή των GFA χρειάστηκαν: μαγνητικός αναδευτήρας, ζυγαριά ακριβείας, δοχεία ανάμιξης των υγρών, μίξερ κονιάματος 5 L, κυβικές μήτρες ακμής 50 mm, πρισματικές μήτρες διαστάσεων 40x40x160 mm και κάποια μικρά βασικά εργαλεία.

Αρχικά έγιναν διάφορες δοκιμαστικές συνθέσεις παραγωγής γεωπολυμερικής πάστας (GFA) και στη συνέχεια αποφασίστηκαν οι τελικές, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Συνθέσεις πάστας γεωπολυμερών (GFA) με διαφοροποίηση του λόγου S/L.

Λόγος S/L	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
Ιπτάμενη Τέφρα (g)	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Υδρύαλος Νατρίου (g)	252.3	252.3	252.3	252.3	252.3
Καυστικό Νάτριο (g)	45.4	45.4	45.4	45.4	45.4
Νερό (g)	68.0	60.1	52.8	45.9	39.5

Όπως φαίνεται η μοναδική διαφοροποίηση μεταξύ των συνθέσεων αυτών ήταν ο λόγος Στερεό/Υγρό (S/L). Η μάζα των στερεών (S) αποτελείται από τη μάζα της ιπτάμενης τέφρας και τη μάζα των διαλελυμένων στερεών του διαλύματος ενεργοποίησης, ενώ η μάζα των υγρών (L) είναι η μάζα του νερού που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης. Τα γεωπολυμερή για όλους τους λόγους S/L παρασκευάστηκαν με λόγο Si/Al=2.40 και λόγο R/Al=0.85.

Οι λόγοι S/L που επιλέχθηκαν είναι 2.8, 2.9, 3.0, 3.1 και 3.2, αφού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ο συνηθέστερος λόγος που επιλέγεται για το γεωπολυμερισμό της ιπτάμενης τέφρας είναι 3.0 (Ασπρογέρακας, 2013). Η διαφοροποίηση των λόγων αυτών οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην προσθήκη ή αφαίρεση ορισμένης ποσότητας νερού.

Η παραγωγή των γεωπολυμερών έγινε με μηχανική ανάδευση της IT και του διαλύματος ενεργοποίησης και στη συνέχεια χυτεύτηκε το μίγμα στις πρότυπες κυβικές μήτρες. Ορισμένα από τα δοκίμια ωρίμασαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εργαστηρίου μέχρι τη συμπλήρωση 28 ημερών, όπου και καταπονήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη, και ορισμένα σε θερμική ωρίμανση 48 ωρών σε θερμοκρασία 70°C και στη συνέχεια αφήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος μέχρι την ηλικία θραύσης τους.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η κλασική διαδικασία συντήρησης των γεωπολυμερών περιλαμβάνει ένα αρχικό στάδιο θερμικής ωρίμανσης στους 50-90°C για 2-3 ημέρες (Hu και Van Deventer, 2000). Η διαδικασία ωρίμανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος επιλέχθηκε για να είναι τα αποτελέσματα συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα τσιμέντου, αλλά και για να ελεγχθεί και το μέγεθος της επίδρασης της θερμικής ωρίμανσης.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι λόγοι S/L=3.0 και 3.2 για να γίνουν εκ νέου συνθέσεις με τη χρήση πλέον των χημικών προσμίκτων. Ο S/L=3.0 επιλέχθηκε διότι αποτελεί το συνηθέστερο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Παναγιωτοπούλου, 2009). Ο S/L=3.2 επιλέχθηκε διότι ήταν αυτός με τη μικρότερη εργασιμότητα, όπως έδειξαν οι πρώτες δοκιμές που παρουσιάζονται στην Ενότητα 4.1.1.2 της παρούσας διατριβής, με στόχο την εύρεση της επίδρασης των χημικών προσμίκτων στα λιγότερο υδαρή γεωπολυμερή. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθέσεις GFA με τα ποσοστά χρήσης όλων των χημικών προσμίκτων κ.β. IT.

Πίνακας 3.4: Ποσοστό προσθήκης χημικών προσμίκτων στις συνθέσεις γεωπολυμερικής πάστας (GFA).

Χημικό Πρόσμικτο	Λόγος S/L	Χημικό Πρόσμικτο (% κ.β. επί της IT)			
Plastiment-15 (PM)	3.0	0	0.3	0.5	0.8
	3.2	0	0.3	0.5	0.8
Sigunit L-22E (SG)	3.0	0	2.0	4.0	6.0
	3.2	0	2.0	4.0	6.0
ViscoFlow-700 (VF)	3.0	0	0.7	1.5	2.5
	3.2	0	0.7	1.5	2.5
SikaTard-930 (ST)	3.0	0	0.5	1.0	2.0
	3.2	0	0.5	1.0	2.0

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4, για κάθε χημικό πρόσμικτο χρησιμοποιήθηκαν τρία (3) διαφορετικά ποσοστά. Επιλέχθηκε το μέγιστο, το ελάχιστο και ένα ενδιάμεσο ποσοστό από τις προτεινόμενες αναλογίες σύμφωνα με τις οδηγίες του τεχνικού του φυλλαδίου που το συνοδεύει. Σε κάθε σύνθεση χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά και μόνο ένα χημικό πρόσμικτο. Η ωρίμανση των δοκιμών μέχρι τη συμπλήρωση των 28 ημερών έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

3.3.2. Γεωπολυμερικό Σκυρόδεμα (GC)

Η μελέτη σύνθεσης έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες του ACI 211.1. Η παρασκευή των GC έγινε με παρόμοιο τρόπο με τα GFA και πολύ κοντά στις οδηγίες του ΕΛΟΤ EN 12390-2, που περιγράφει την παρασκευή συμβατικού σκυροδέματος και χρειάστηκαν: μηχανικός αναδευτήρας, ζυγαριά ακριβείας, δοχεία ανάμιξης των υγρών, μίξερ κονιάματος 20 L, κυβικές μήτρες ακμής 100 mm, πρισματικές μήτρες διαστάσεων 100x100x500 mm, κυλινδρικές μήτρες διαστάσεων 100x200 mm και κάποια μικρά βασικά εργαλεία. Η παρασκευή των δοκιμών έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12350-1. Η ακριβής σύνθεση των μελετηθέντων γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Σύνθεση γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) σε 1 m³.

	GC.15	GC.22,5	GC.30
Ιπτάμενη Τέφρα (kg)	375	563	750
Περιεκτικότητα ΙΤ (v/v %)	15.0	22.5	30.0
Υδρύαλος Νατρίου (kg)	168	258	336
Καυστικό Νάτριο (kg)	32.1	48.2	64.3
Συνολικό Νερό (kg)	100	90	80
Γαμπίλι (kg)	632	490	349
Άμμος (kg)	930	721	513
L/S γεωπολυμερούς	0.42*	0.35	0.31

*L=100+168×63.35%-632×0.54%-930×0.42%=199 kg, S=375+168×36.65%+32.1=469 kg, L/S=0.42

Οι συνθέσεις δημιουργήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα των GFA που προσδιορίστηκαν με το πολυπαραγοντικό μοντέλο Taguchi με στόχο τις βέλτιστες αντοχές σε μονοαξονική θλίψη.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5, επιλέχθηκαν τρεις συνθέσεις με διαφορετική κατ' όγκο περιεκτικότητα ΙΤ, 15%, 22.5% και 30%. Ο λόγος αυτής της επιλογής έγινε με βάση τη λογική που υπάρχει στο συμβατικό σκυρόδεμα (Neville, 2012), με μέγιστο 20%, σε συνδυασμό με την όσο δυνατό μεγαλύτερη ποσότητα αξιοποίησης ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα. Επίσης, έχει υπολογιστεί όλα τα GC να έχουν ίδιο μέτρο εξάπλωσης, κατηγορία F4 κατά ΚΤΣ-2016. Στον ίδιο πίνακα, επιλέχθηκε να παρουσιαστεί ο λόγος L/S, αντί S/L που παρουσιάστηκε στις πάστες, για να είναι άμεσα συγκρίσιμος με το λόγο w/c των CC. Θα πρέπει όμως να αναφερθεί, για να υπάρχει και

η σχετικότητα με τις πάστες και τα κλασσικά γεωπολυμερή, ότι σε όλες τις συνθέσεις των GC, σε ότι αφορά τη γεωπολυμερική πάστα, επιλέχθηκαν οι λόγοι Si/Al=2.90 και R/Al=1.00.

Η παρασκευή των GC περιελάμβανε μηχανική ανάδευση της ιπτάμενης τέφρας, του διαλύματος ενεργοποίησης και των αδρανών υλικών. Στη συνέχεια το μίγμα χυτεύτηκε στις μήτρες που είχαν επιλεγεί για την κάθε δοκιμή. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των GFA, όλα τα δοκίμια των GC υπέστησαν θερμική ωρίμανση 48 h σε θερμοκρασία 70°C και στη συνέχεια αφέθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος εργαστηρίου μέχρι την εκάστοτε δοκιμή τους.

3.3.3. Συμβατικό Σκυρόδεμα (CC)

Παρασκευάστηκαν τρεις συνθέσεις CC με τσιμέντο Portland, αντίστοιχων αντοχών και ίδιου μέτρου εξάπλωσης με τα GC για να γίνει άμεση σύγκριση των ιδιοτήτων τους. Η παρασκευή των CC πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN 12390-2 και χρειάστηκαν: ζυγαριά ακριβείας, μίξερ σκυροδέματος, κυβικές μήτρες ακμής 100 mm, πρισματικές μήτρες διαστάσεων 100x100x600 mm, κυλινδρικές μήτρες διαστάσεων 100x200 mm και κάποια μικρά βασικά εργαλεία. Η παρασκευή των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12350-1. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται οι συνθέσεις των CC.

Πίνακας 3.6: Σύνθεση συμβατικών σκυροδεμάτων (CC) σε 1 m³.

	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5
Τύπος Τσιμέντου	CEM II / B-M (W-L) 32.5 R	CEM II / B-M (P-W-L) 42.5 N	CEM II / B-M (P-W-L) 42.5 N
Τσιμέντο (kg)	300	300	330
Συνολικό Νερό (kg)	180	174	181
Γαρμπίλι (kg)	757	763	744
Άμμος (kg)	1111	1120	1092
Υπερρευστοποιητής VF (kg)	1.20	1.80	1.65
N/T ενεργός*	0.57**	0.55	0.52

*Ενεργός λόγος σύμφωνα με τον ΚΤΣ-20216.
**Συνολικό νερό 180 kg/m³, νερό απορρόφησης αδρανών: 9 kg/m³, διαθέσιμο νερό: 171 kg/m³, W/C=0.57.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.6, στις μελέτες σύνθεσης, οι οποίες βασίστηκαν στον ΚΤΣ-2016, υπήρχαν αρκετές, αλλά μικρές διαφοροποιήσεις. Η παραγωγή των CC έγινε με μηχανική ανάδευση του τσιμέντου, των αδρανών υλικών, του νερού και του χημικού πρόσμικτου. Στη συνέχεια το μίγμα χυτεύτηκε στις αντίστοιχες μήτρες με τα GC, που είχαν επιλεγεί για την κάθε δοκιμή. Τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν στις 24 h και στη συνέχεια συντηρήθηκαν σε θερμοκρασία 20°C και υγρασία 100% μέχρι την 28^η μέρα, όπως προβλέπεται από τον ΚΤΣ-2016. Όσα δοκίμια δοκιμάστηκαν νωρίτερα, έμειναν στη συντήρηση μέχρι την ημέρα δοκιμής τους.

3.4. Δοκιμές

Τα δοκίμια των παραπάνω συνθέσεων δοκιμάστηκαν στις επιλεγμένες δοκιμές, όπως αναφέρονται παρακάτω.

3.4.1. Δοκιμές Γεωπολυμερικής Πάστας (GFA)

Οι δοκιμές που επιλέχθηκαν να πραγματοποιηθούν για τις πάστες των γεωπολυμερών (GFA) διαχωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, σε νωπό και σκληρυμένο υλικό, οι οποίες βασίστηκαν κυρίως στις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN 197-1. Τα πρότυπα που επιλέχθηκαν για κάθε δοκιμή ήταν σύμφωνα με τις δοκιμές που γίνονται στα τσιμεντοειδή, αφού απώτερος σκοπός της συγκεκριμένης ερευνητικής εργασίας είναι η πλήρης αντικατάσταση του τσιμεντοπολτού στο σκυρόδεμα με το γεωπολυμερές.

3.4.1.1. Νωπό GFA

Όσο το γεωπολυμερές βρισκόταν σε νωπή κατάσταση μετρήθηκε η εργασιμότητα με τη μέθοδο του μέτρου εξάπλωσης και ταυτόχρονα έγινε και ο έλεγχος για τους χρόνους πήξης του με τη συσκευή Vicat.

- Μέτρηση Χρόνου Πήξης

Σε όλα τα μίγματα που παρασκευάστηκαν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή εύρεσης αρχής και τέλους πήξης της γεωπολυμερικής πάστας με τη βοήθεια της συσκευής Vicat, όπως περιγράφεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-3. Η συσκευή με ένα δείγμα GFA κατά τη μέτρηση του χρόνου τέλους πήξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Μέτρηση του χρόνου τέλους πήξης της γεωπολυμερικής πάστας.

- Έλεγχος Εργασιμότητας

Σε όλες τις συνθέσεις GFA πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος εργασιμότητας με τη μέθοδο μέτρησης του μέτρου εξάπλωσης, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1437, το οποίο χρησιμοποιείται για τσιμεντοκονιάματα. Η τελική τιμή προέκυψε από τη μέση τιμή των δύο κάθετων διαμέτρων της εξάπλωσης του υλικού. Στο Σχήμα 3.6. παρουσιάζεται ένα γεωπολυμερές κατά τη δοκιμή εξάπλωσης.



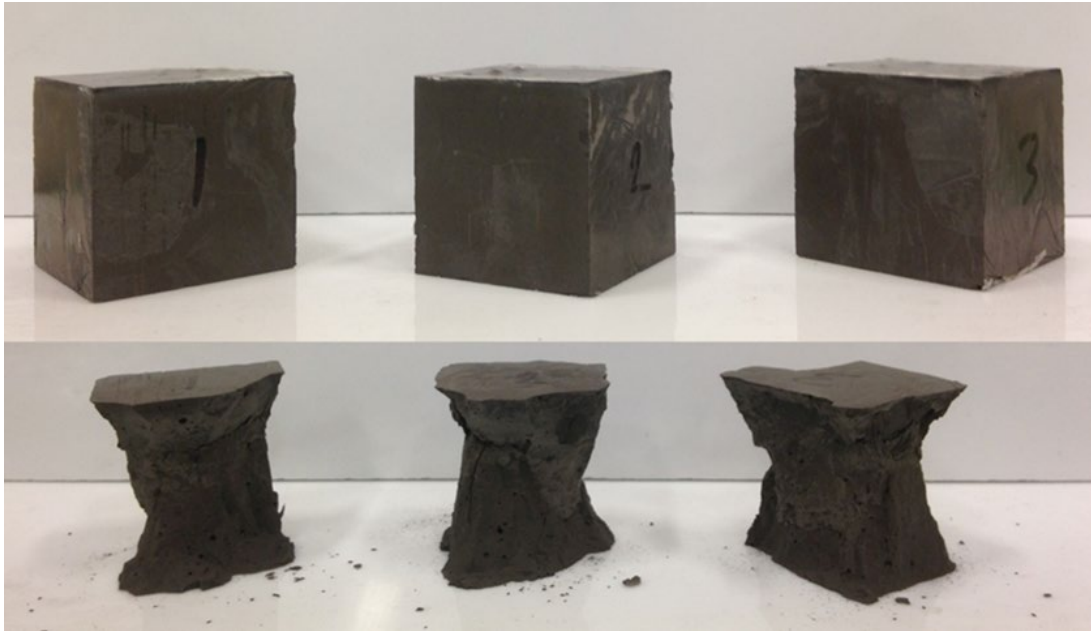
Σχήμα 3.6: Μέτρηση του μέτρου εξάπλωσης της γεωπολυμερικής πάστας.

3.4.1.2. Σκληρομένο GFA

Από τα μίγματα προέκυψαν κυβικά δοκίμια ακμής 50 mm και πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40x40x160 mm. Κάποια από τα κυβικά δοκίμια καταπονήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη και σε κάποια μετρήθηκε η υδατοαπορροφητικότητα, ενώ στα πρισματικά δοκίμια μετρήθηκε η συστολή ξήρανσης.

- Μέτρηση Θλιπτικής Αντοχής

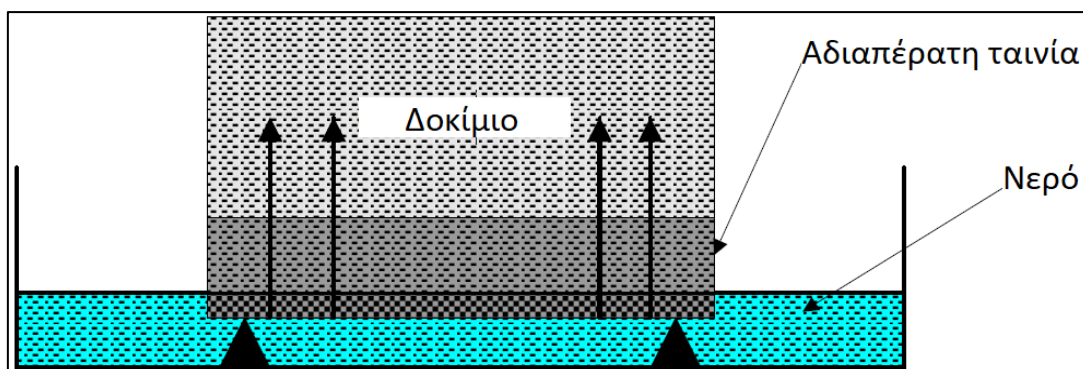
Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκε με ρυθμό φόρτισης 1.5 kN/sec, ακολουθώντας τις οδηγίες του προτύπου ΕΛΟΤ EN 196-1. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα δοκίμια των συνθέσεων της πρώτης φάσης με διαφοροποίηση στο λόγο S/L, μετρήθηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη στην ηλικία των 28 ημερών χωρίς θερμική ωρίμανση και σε ηλικία 7 ημερών με θερμική ωρίμανση, ενώ στις συνθέσεις της δεύτερης φάσης, με τα χημικά πρόσμικτα, μετρήθηκε η αντοχή μόνο σε ηλικία 28 ημερών χωρίς θερμική ωρίμανση. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται τα δοκίμια μίας ενδεικτικής σύνθεσης πριν και μετά από την καταπόνηση σε θλίψη.



Σχήμα 3.7: Κυβικά δοκίμια γεωπολυμερικής πάστας ακμής 50 mm πριν (πάνω) και μετά (κάτω) τη δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

- Μέτρηση Υδατοαπορροφητικότητας

Σε όλες τις συνθέσεις έγινε μέτρηση υδατοαπορροφητικότητας μέσω τριχοειδούς απορρόφησης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ακμής 50 mm, τα οποία βρισκονταν σε ηλικία 28 ημερών και η ωρίμανσή τους είχε γίνει αποκλειστικά και μόνο σε περιβάλλον εργαστηρίου. Το νερό που χρησιμοποιήθηκε ήταν νερό από το δίκτυο της ΕΥΔΑΠ και η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1585. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 3.8: Πειραματική διάταξη μέτρησης τριχοειδούς υδατοαπορροφητικότητας.

Αρχικά έγινε περιμετρική στεγάνωση των τεσσάρων πλευρών όλων των δοκιμίων, έτσι ώστε η πλευρική επιφάνεια να καλυφθεί με μια ταινία αδιαπέραστη σε νερό και να μείνουν ελεύθερες η πάνω και η κάτω επιφάνειά τους. Στη συνέχεια καταγράφηκαν για κάθε δείγμα η μάζα του και γενικά η θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς και η θερμοκρασία του νερού. Στο Σχήμα 3.9 φαίνονται τα

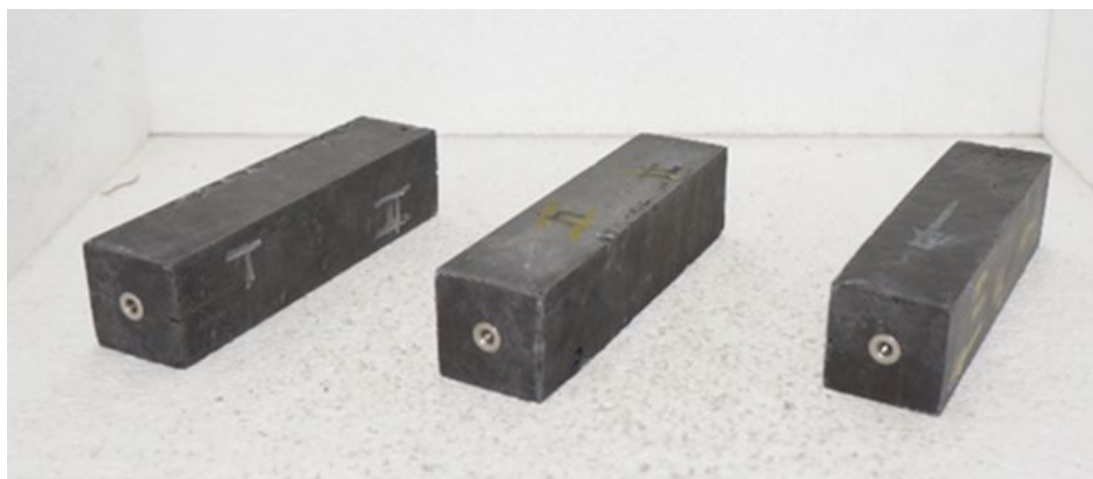
δείγματα κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή, έτσι ώστε να είναι βυθισμένα στο νερό σε βάθος περίπου 5 mm, αλλά ταυτόχρονα να είναι ελεύθερη η βυθισμένη επιφάνεια για την όσο μεγαλύτερη δυνατή απορρόφηση της υγρασίας. Οι μετρήσεις έγιναν σε 10, 20, 30, 45, 60, 90, και 120 min από την έναρξη της δοκιμής, σύμφωνα με το πρότυπο.



Σχήμα 3.9: Δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης (δοκίμια GFA).

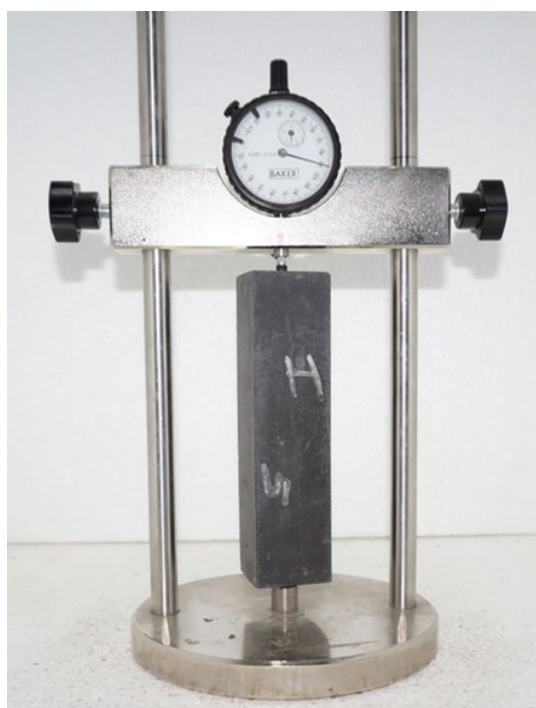
- Μέτρηση Συστολής Ξήρανσης

Οι μετρήσεις της συστολής ξήρανσης και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίστηκαν στο πρότυπο EN 12617-4. Μετά από 24 h από την παρασκευή των δειγμάτων, ξεκαλουπώθηκαν και ξεκίνησαν οι μετρήσεις οι οποίες περιλάμβαναν εκτός από το μήκος του δοκιμίου, τη μάζα του, την υγρασία και τη θερμοκρασία του χώρου του εργαστηρίου που βρίσκονταν αποθηκευμένα τα δοκίμια. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται 3 δοκίμια ίδιας σύνθεσης.



Σχήμα 3.10: Δοκίμια έτοιμα για μέτρηση συστολής ξήρανσης.

Οι μετρήσεις για τις 20 πρώτες μέρες πραγματοποιούνταν κάθε 12 h (Σχήμα 3.11). Πάρθηκε αυτή η απόφαση, αφού θεωρήθηκε σύμφωνα με αντίστοιχη έρευνα (Wallah, 2006) ότι οι πρώτες 10-15 ημέρες είναι κρίσιμες και έπρεπε να καλυφθεί αυτή η χρονική περίοδος επαρκώς. Στη συνέχεια, μετρήσεις πραγματοποιούνταν ανά 24 h μέχρι τη συμπλήρωση της ηλικίας των 2 μηνών. Έπειτα, αφού οι μετρήσεις έδειχναν ελάχιστες διαφορές συνεχίστηκαν οι μετρήσεις ανά 48 h μέχρι τη συμπλήρωση των 3 μηνών. Στη συνέχεια κρίθηκε ότι μπορούσαν να γίνουν μία φορά την εβδομάδα μέχρι τη συμπλήρωση των 4 μηνών. Από εκεί και έπειτα πραγματοποιούνταν μετρήσεις ανά 15 μέρες μέχρι την ηλικία των 6 μηνών, όπου έδειξαν ότι μία φορά το μήνα επαρκούσε. Οι μετρήσεις έγιναν συνολικά για 2 χρόνια.



Σχήμα 3.11: Συσκευή μέτρησης συστολής ξήρανσης, με δοκίμιο.

3.4.2. Δοκιμές Σκυροδέματος (GC και CC)

Οι δοκιμές που επιλέχθηκαν να πραγματοποιηθούν στα γεωπολυμερικά σκυροδέματα (GC), πραγματοποιήθηκαν και στα συμβατικά σκυροδέματα (CC) για να μπορούν να συγκριθούν και μεταξύ τους. Επιλέχθηκε και σε αυτά να γίνει διαχωρισμός σε δύο κατηγορίες, νωπό και σκληρυμένο σκυρόδεμα, των οποίων οι δοκιμές βασίστηκαν κυρίως στις απαιτήσεις του ΚΤΣ-2016 και του ΕΚΩΣ 2000.

3.4.2.1. Νωπό Σκυρόδεμα

Όσο τα GC και CC βρίσκονταν σε νωπή κατάσταση έγινε ο έλεγχος της εργασιμότητάς τους με τη μέθοδο του μέτρου εξάπλωσης και τη μέθοδο της κάθισης, ελέγχθηκε η περιεκτικότητά τους σε αέρα και μετρήθηκε η πυκνότητά τους.

- Έλεγχος Εργασιμότητας

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, σε όλες τις συνθέσεις πραγματοποιήθηκε έλεγχος της εργασιμότητας με τη μέθοδο μέτρησης του μέτρου εξάπλωσης, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12350-5. Η τελική τιμή προέκυψε από τη μέση τιμή των δύο κάθετων διαμέτρων της εξάπλωσης του υλικού. Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται ένα μίγμα CC και ένα GC κατά τη δοκιμή εξάπλωσης.



Σχήμα 3.12: Σκυρόδεμα CC (αριστερά) και GC (δεξιά) κατά τη δοκιμή μέτρησης του μέτρου εξάπλωσης.

Ο έλεγχος της εργασιμότητας με τη δοκιμή της κάθισης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12350-2. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται ένα CC και ένα GC κατά τη δοκιμή κάθισης.



Σχήμα 3.13: Σκυρόδεμα CC (αριστερά) και GC (δεξιά) κατά τη δοκιμή της κάθισης.

- Μέτρηση Αεροπεριεκτικότητας

Η δοκιμή της μέτρησης του αέρα στο νωπό σκυρόδεμα πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12350-7. Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η συσκευή με την οποία πραγματοποιήθηκε η δοκιμή στο εργαστήριο.



Σχήμα 3.14: Συσκευή μέτρησης αεροπεριεκτικότητας και πυκνότητας.

- Μέτρηση Πυκνότητας

Η πυκνότητα μετριέται με τη βοήθεια του κυλινδρικού δοχείου της συσκευής μέτρησης της αεροπεριεκτικότητας και με βάση τις οδηγίες του πρότυπου ΕΛΟΤ EN 12350-6.

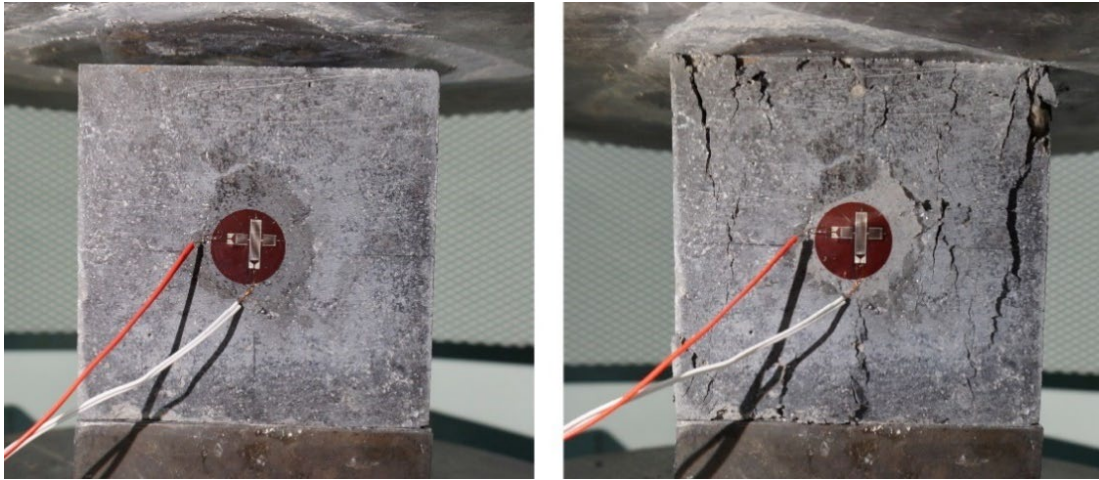
3.4.2.2. Σκληρωμένο Σκυρόδεμα

Τα δοκίμια όλων των μιγμάτων χωρίστηκαν ανά ομάδες και ελέγχθηκαν σε διάφορες δοκιμές, σε κάποια μετρήθηκε η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων και η αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη σε διάφορες ηλικίες, σε κάποια μετρήθηκε το ανοικτό πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα τους, σε κάποια μετρήθηκε η ανθεκτικότητά τους σε τέσσερα διαφορετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα, σε άλλα μετρήθηκε η διάχυση χλωριόντων, σε κάποια η ανθεκτικότητα σε ψύξη – απόψυξη και σε άλλα η ανθεκτικότητα σε ξήρανση – εμβάπτιση.

Στα κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 100x200 mm πραγματοποιήθηκε αντιδιαμετρική θλίψη (διάρρηξη), ενώ στα πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x500 mm πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάμψης δύο σημείων.

- Δοκιμή Θλιπτικής Αντοχής

Η καταπόνηση σε μονοαξονική θλίψη πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τις οδηγίες του προτύπου ΕΛΟΤ EN 12390-3 στα κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm. Ο έλεγχος της αντοχής, για όλες τις συνθέσεις, πραγματοποιήθηκε στις ηλικίες 3, 7, 28, 90, 180, 360 και 720 ημερών (2 έτη). Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται ένα δοκίμιο GC πριν και μετά από τη δοκιμή, ηλικίας 28 ημερών.

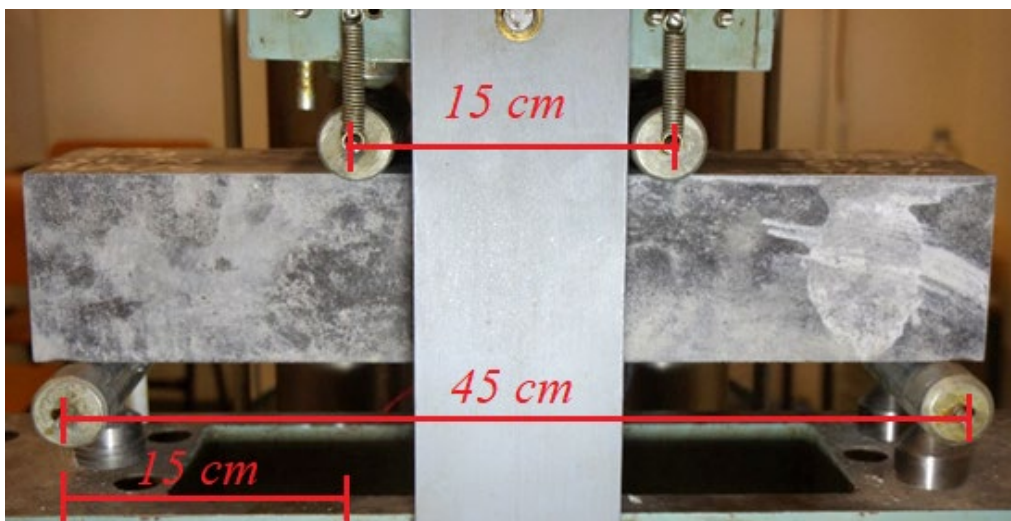


Σχήμα 3.15: Δοκίμιο GC με ηλεκτρομηκνυσιόμετρο πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Σε όλα τα δοκίμια που καταπονήθηκαν στη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης στην ηλικία των 28 ημερών τοποθετήθηκε ηλεκτρομηκνυσιόμετρο δύο διευθύνσεων, παράλληλα και κάθετα ως προς το φορτίο, έτσι ώστε να μετρηθεί η διαμήκης και η εγκάρσια παραμόρφωση, με τη βοήθεια των οποίων υπολογίστηκε το Μέτρο Ελαστικότητας (E_{cm}) και ο Λόγος Poisson (ν), σύμφωνα με το EN 12390-13.

- Μέτρηση Καμπτικής Αντοχής

Η καμπτική αντοχή μετρήθηκε με τη δοκιμή των δύο σημείων (Σχήμα 3.16) σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 12390-5 στα πρισματικά δοκίμια όλων των συνθέσεων στην ηλικία των 28 ημερών. Η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων ήταν 45.0 cm και μεταξύ των φορτίσεων 15.0 cm.



Σχήμα 3.16: Δοκίμιο GC σε διάταξη κάμψης δύο σημείων.

Με τη δοκιμή αυτή, υπολογίστηκε η εφελκυστική αντοχή και μετρήθηκε και το μέγιστο βέλος κάμψης. Σε όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκε ηλεκτρομηκνυσιόμετρο

μίας διεύθυνσης (strain gage), παράλληλα με την εφελκόμενη ίνα του δοκιμίου, στο κέντρο της κάτω πλευράς της δοκού, έτσι ώστε να μετρηθεί η εφελκυστική παραμόρφωσή τους (Σωτηροπούλου και Πασσά, 2010).

- Δοκιμή Διάρρηξης (Αντιδιαμετρική Θλίψη)

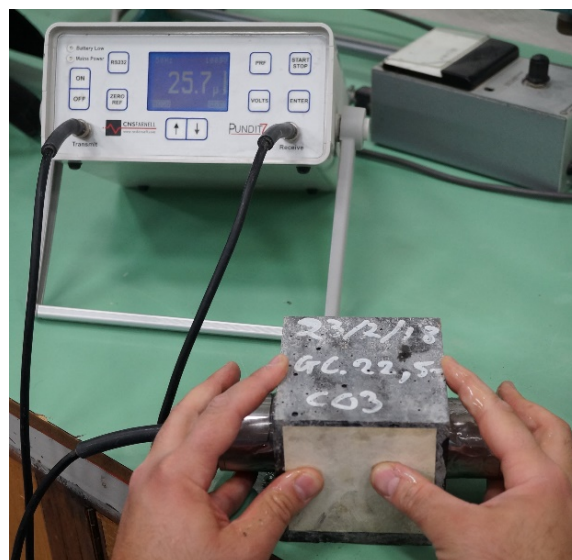
Η δοκιμή διάρρηξης κυλίνδρου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12390-6 στα κυλινδρικά δοκίμια στην ηλικία των 28 ημερών, για όλες τις συνθέσεις (Σχήμα 3.17). Με τη βοήθεια της δοκιμής αυτής υπολογίστηκε η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.



Σχήμα 3.17: Δοκίμιο CC (αριστερά) και GC (δεξιά) μετά τη δοκιμή διάρρηξης.

- Μέτρηση Ταχύτητας Μετάδοσης Υπερήχων (UPV)

Με τη βοήθεια της συσκευής Pundit-7 (Σχήμα 3.18) μετρήθηκε η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων (UPV) στα κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm, πριν από τη δοκιμή τους σε μονοαξονική θλίψη, για να υπάρχει και άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12504-4. Μέσω της δοκιμής αυτής εκτιμήθηκε η θλιπτική αντοχή (Σπανός et al., 2006).



Σχήμα 3.18: Δοκίμιο GC κατά τη μέτρηση UPV με τη συσκευή Pundit-7.

- Μέτρηση Υδατοαπορροφητικότητας
Όπως και στα GFA, έτσι και στα σκυροδέματα GC και CC όλων των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε μέτρηση υδατοαπορροφητικότητας με τον τρόπο που περιγράφεται στην Ενότητα 3.4.1.2 της παρούσας. Οι μετρήσεις και εδώ έγιναν 10, 20, 30, 45, 60, 90 και 120 min από την έναρξη της δοκιμής, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1585. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυβικά ακμής 100 mm και ήταν σε ηλικία 28 ημερών. Το νερό που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές ήταν νερό από το δίκτυο ΕΥΔΑΠ.
- Υπολογισμός Ανοιχτού Πορώδους και Μέτρηση pH
Κυβικά δοκίμια όλων των CC και GC βυθίστηκαν σε νερό με σκοπό τον έμμεσο υπολογισμό του ανοιχτού πορώδους της κάθε σύνθεσης, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C642. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη δοκιμή ήταν διαστάσεων 100x100x50 mm, τα οποία προήλθαν από αδιατάρακτη κοπή πρισματικών δοκιμίων 100x100x500 mm. Τοποθετήθηκαν σε διαφορετικό δοχείο ανά σύνθεση, με αναλογία όγκου δοκιμίων προς όγκο νερού 1:3 και το νερό που χρησιμοποιήθηκε είχε ουδέτερο pH. Εκτός από τον υπολογισμό του ανοιχτού πορώδους, στόχος ήταν να μετρηθεί και η επίδραση της κάθε σύνθεσης στο pH του νερού. Από τη στιγμή της βύθισης, γινόταν καθημερινή μέτρηση του pH για τις 4 πρώτες μέρες και μία τελευταία στις 7 ημέρες.
- Ανθεκτικότητα σε Κύκλους Ψύξης – Απόψυξης
Η δοκιμή ψύξης – απόψυξης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου ASTM C666/C666M, με κάποιες τροποποιήσεις σύμφωνα με το διαθέσιμο εξοπλισμό του εργαστηρίου. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαστάσεων 100x100x50 mm, τα οποία προήλθαν από αδιατάρακτη κοπή πρισματικών δοκιμίων 100x100x500 mm. Αυτό έγινε με σκοπό την εξοικονόμηση χώρου στους θαλάμους της συσκευής ψύξης – απόψυξης που χρησιμοποιήθηκε. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε συνολικά 10 επαναλαμβανόμενους κύκλους των 8 h, δηλαδή η παραμονή των δειγμάτων σε κάθε κατάσταση ήταν 4 h. Στα δοκίμια ανά 10 πλήρεις κύκλους μετριόταν η μάζα τους, έτσι ώστε να υπολογιστεί η ανθεκτικότητά τους σε κύκλους ψύξης – απόψυξης με βάση την απώλεια μάζας. Η ψύξη των δοκιμίων γινόταν ξηρό περιβάλλον θερμοκρασίας -20°C και η απόψυξή τους γινόταν σε υγρό περιβάλλον θερμοκρασίας 5°C .
- Ανθεκτικότητα σε Κύκλους Ξήρανσης – Εμβάπτισης
Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτή τη δοκιμή ήταν διαστάσεων 100x100x50 mm, όπου και αυτά προήλθαν από αδιατάρακτη κοπή πρισματικών δοκιμίων. Υποβλήθηκαν σε συνολικά 10 επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης – εμβάπτισης των 8 h, δηλαδή η παραμονή των δειγμάτων σε κάθε κατάσταση ήταν 4 h. Η κατάσταση ξήρανσης γινόταν στο πυριατήριο σε θερμοκρασία 80°C , ενώ η εμβάπτιση σε δοχείο με νερό από το δίκτυο ΕΥΔΑΠ σε θερμοκρασία 20°C .

- Μέτρηση Διάχυσης Χλωριόντων

Η δοκιμή της διάχυσης χλωριόντων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου NT BUILD 443 σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm. Όπως αναφέρει το πρότυπο, τα δοκίμια μονώθηκαν στις πέντε τους πλευρές, με σκοπό η διάχυση των χλωριόντων να γίνεται από την ελεύθερη επιφάνεια του κάθε δοκιμίου, δεδομένου εμβαδού. Για τη μόνωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ως στεγανοποιητικό υλικό το Sikadur-32EF, το οποίο είναι δύο συστατικών δομητικό εποξειδικό. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν για 3 μήνες σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου (16.5% w/w) με σχέση όγκου δειγμάτων προς όγκο διαλύματος 1:4, το οποίο ανανεώθηκε περίπου στον 1.5 μήνα διατηρώντας την ίδια περιεκτικότητα σε NaCl. Μετά το πέρας του διαστήματος αυτού, τα δοκίμια αφέθηκαν να στεγνώσουν στο περιβάλλον προκειμένου να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των συνολικών χλωριόντων που περιέχονταν σε αυτά. Κατόπιν, με προσαρμογή των προφίλ των χλωριόντων στο 2^ο νόμο του Fick, υπολογίστηκαν οι συντελεστές διάχυσης όλων των συνθέσεων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ειδική διάταξη με τριβείο, έτσι ώστε να παρθεί δείγμα από τα δοκίμια σε 10 διαφορετικά βάθη: 0-3 mm, 3-6 mm, 6-9 mm, 9-12 mm, 12-15 mm, 15-18 mm, 18-21 mm, 21-24 mm, 24-27 mm, 27-30 mm. Πριν τη λήψη των δειγμάτων οι επιφάνειες των δοκιμίων τρίφτηκαν με γυαλόχαρτο για την απομάκρυνση εναπομένουσας ποσότητας αλατιού. Για τη μέτρηση των συνολικών χλωριόντων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του προτύπου ΕΛΟΤ EN 196-2. Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζονται διάφορες φάσεις της διαδικασίας.



Σχήμα 3.19: Διάφορες φάσεις δοκιμής διάχυσης χλωριόντων: μόνωση δοκιμίου (αριστερά), λήψη υλικού σε διάφορα βάθη (κέντρο) και τιτλοδότηση - χρωματισμός διαλύματος (δεξιά).

- Ανθεκτικότητα σε Διαβρωτικό Περιβάλλον

Δοκίμια όλων των συνθέσεων GC και CC εκτέθηκαν σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ειδικότερα, εκτέθηκαν σε διαλύματα θεικών ιόντων, σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες, και σε οξέα, θεικό και οξικό. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το νερό που παρασκευάστηκαν τα διαλύματα όλων των δοκιμών ήταν από το δίκτυο ΕΥΔΑΠ.

1. Ανθεκτικότητα σε Περιβάλλον Θεικών Ιόντων

Το διαβρωτικό περιβάλλον θεικών ιόντων που επιλέχθηκε να εκτεθούν τα δοκίμια σκυροδέματος ήταν διάλυμα θεικού μαγνησίου, όπου ανά ομάδες εκτέθηκαν σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες, 5°C και 20°C. Η συγκέντρωση του διαλύματος σε θεικά ιόντα ήταν 52.1 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Epson salt) και στις δύο θερμοκρασίες και η αναλογία όγκου δοκιμίων προς όγκο διαλύματος ήταν 1:4. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη δοκιμή ήταν διαστάσεων 100x100x50 mm, τα οποία προήλθαν από αδιατάρακτη κοπή πρισματικών δοκιμίων 100x100x500 mm. Για να εκτιμηθεί η ανθεκτικότητα των δοκιμίων μετριόταν η μάζα τους κάθε 7 ημέρες. Η έκθεση των δοκιμίων στο διαβρωτικό διάλυμα των 20°C διήρκησε λίγο περισσότερο από 6 μήνες (200 ημέρες). Για τα δοκίμια στους 5°C οι μετρήσεις γίνονταν για 6 μήνες ανά 7 ημέρες και επειδή εκεί άρχισε να παρουσιάζεται μία μικρή απώλεια μάζας, συνεχίστηκαν οι μετρήσεις μέχρι τους 18 μήνες (540 ημέρες) ανά 30 ημέρες.

2. Ανθεκτικότητα σε Θεικό Οξύ

Πριν την έναρξη της δοκιμής, όλα τα δοκίμια (κυβικά ακμής 100 mm) που επρόκειτο να τοποθετηθούν στο διάλυμα του θεικού οξέος τοποθετήθηκαν σε νερό μέχρι κορεσμού τους και ακολούθως ζυγίστηκαν. Η συγκέντρωση του διαλύματος σε θεικό οξύ ήταν 5% w/w και η αναλογία όγκου δοκιμίων προς όγκο διαλύματος ήταν 1:4, το οποίο ανανεωνόταν περίπου κάθε δύο μήνες. Όπως στα θεικά ιόντα, έτσι και εδώ μετριόταν η μάζα των δοκιμίων σε συχνότητα 7 ημερών για διάρκεια 200 ημερών.

3. Ανθεκτικότητα σε Οξικό Οξύ

Για τη δοκιμή ανθεκτικότητας σε διάλυμα οξικού οξέος ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και χρόνος μέτρησης με το θεικό οξύ. Αυτό σημαίνει ότι και αυτά τα δοκίμια (κυβικά ακμής 100 mm) κορέστηκαν σε νερό και ακολούθως ζυγίστηκαν. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο διάλυμα οξικού οξέος για 200 ημέρες, όπου η μέτρηση της μάζας γινόταν κάθε 7 ημέρες. Το διάλυμα του οξικού οξέος ήταν και αυτό 5% w/w και η αναλογία όγκου δοκιμίων προς όγκο διαλύματος ήταν και εδώ 1:4, το οποίο διάλυμα ανανεωνόταν κάθε περίπου κάθε 2 μήνες.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών σε διαγράμματα και σε πίνακες, κατά περίπτωση. Στη συνέχεια θα σχολιαστούν και θα συγκριθούν με αντίστοιχες έρευνες και με τις απαιτήσεις των αντίστοιχων κανονισμών.

4.1. Δοκιμές Γεωπολυμερικής Πάστας (GFA)

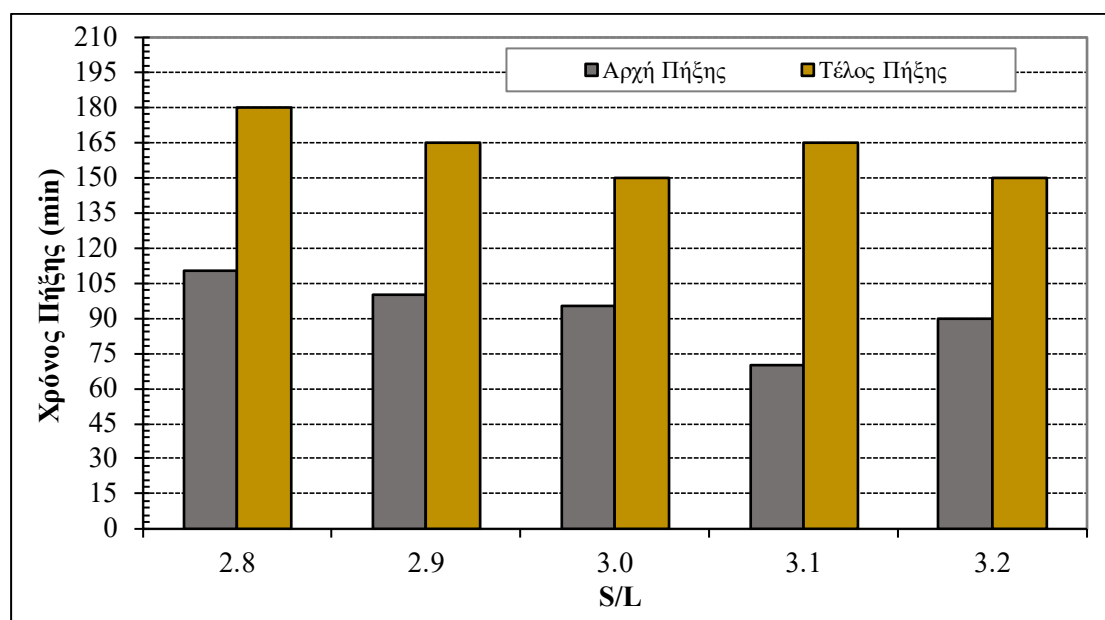
Τα αποτελέσματα της γεωπολυμερικής πάστας (GFA) θα συγκριθούν με τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1, το οποίο αναφέρει τα κριτήρια για τα τσιμέντα, και με κάποιες ενδεικτικές σχετικές έρευνες για τη νωπή και σκληρυμένη κατάστασή του.

4.1.1. Νωπό GFA

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.4.1.1 της παρούσας διατριβής, οι ιδιότητες που ελέγχθηκαν σε νωπό GFA ήταν η εργασιμότητα και οι χρόνοι πήξης.

4.1.1.1. Χρόνος Πήξης

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι χρόνοι αρχής και τέλους πήξης κάθε σύνθεσης GFA, χωρίς την προσθήκη κάποιου χημικού πρόσμικτου, αλλά με τη μόνη διαφοροποίηση στο λόγο S/L.

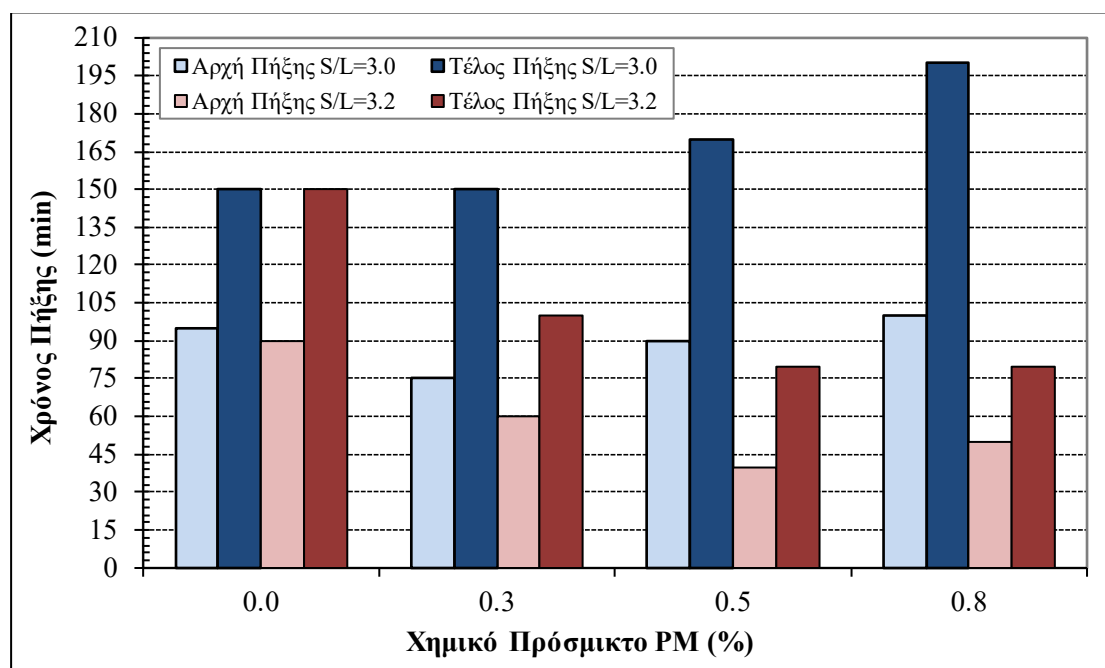


Σχήμα 4.1: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση με το λόγο S/L.

Παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η μάζα των υγρών και αυξάνεται ο λόγος S/L μέχρι το 3.1, έχουμε μικρή μείωση του χρόνου αρχής πήξης και αντίστοιχη μεταβολή του τέλους της πήξης, κάτι το οποίο επιβεβαιώνει και τις σχετικές έρευνες (Siyal et al.,

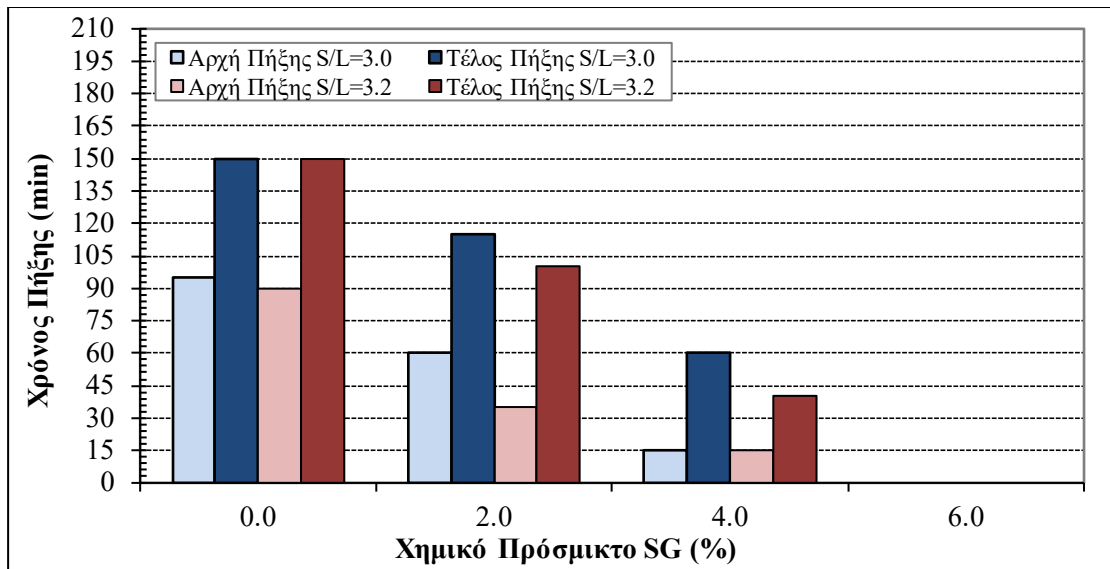
2016). Αξίζει να αναφερθεί ότι στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 στις ιδιότητες των τσιμεντών δίνεται ιδιαίτερη σημασία μόνο στο χρόνο αρχής της πήξης. Σύμφωνα λοιπόν με αυτό, για όλα τα τσιμεντά κατηγορίας αντοχής 32.5 ο χρόνος αρχής πήξης πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 75 min, για την κατηγορία 42.5 μεγαλύτερος από 60 min και για την κατηγορία 52.5 μεγαλύτερος από 45 min. Σε όλες τις συνθέσεις των γεωπολυμερών παρατηρείται ότι καλύπτεται η απαίτηση του ελάχιστου χρόνου αρχής πήξης.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι χρόνοι αρχής και τέλους πήξης με προσθήκη υπερρυστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) σε όλα τα ποσοστά. Παρατηρείται στο $S/L=3.0$ ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό από 0.3% και πάνω αυξάνεται και ο χρόνος πήξης, τόσο της αρχής όσο και του τέλους. Αυτό είναι φυσιολογικό, αφού το συγκεκριμένο πρόσμικτο είναι υπερρυστοποιητής με επιβράδυνση. Στο λόγο $S/L=3.2$ συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή όσο αυξάνεται το ποσοστό μέχρι το 0.5%, μειώνεται ο χρόνος πήξης. Στο μέγιστο ποσοστό αρχίζουν να αυξάνονται οι χρόνοι πήξης. Αυτό μπορεί να συμβαίνει διότι το συγκεκριμένο χημικό πρόσμικτο είναι πιθανόν να μη λειτουργεί σωστά στα λιγότερη υδαρή μίγματα.



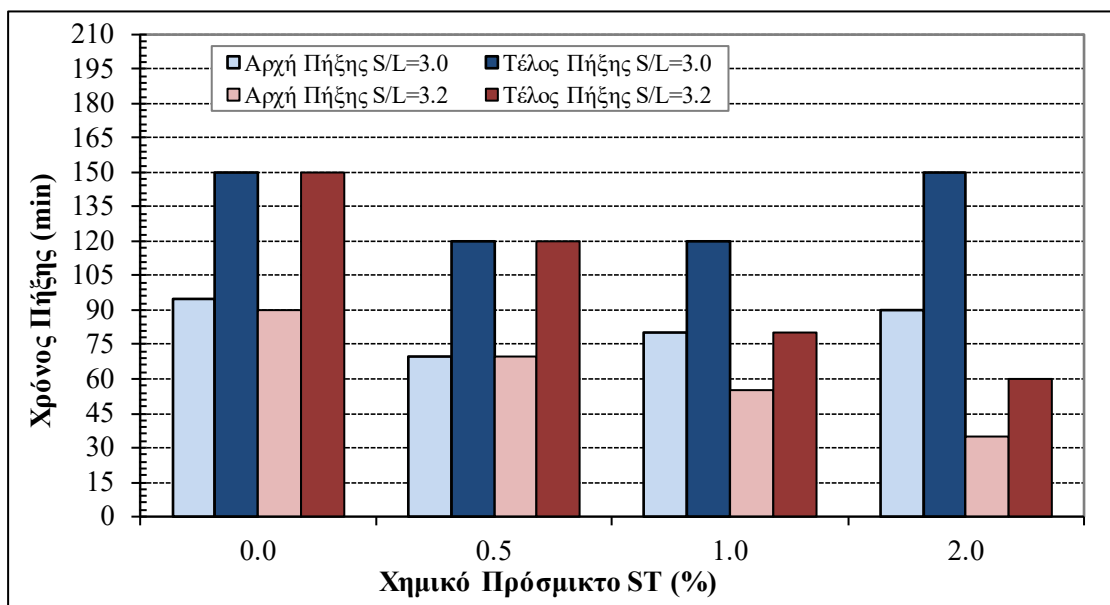
Σχήμα 4.2: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη υπερρυστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, που παρουσιάζονται οι χρόνοι πήξης συνθέσεων με προσθήκη του επιταχυντή ταχείας πήξης Sigunit L-22E (SG), το πρόσμικτο δείχνει να λειτουργεί σωστά και στους δύο λόγους S/L . Όσο δηλαδή αυξάνεται το ποσοστό προσθήκης, τόσο μειώνεται ο χρόνος αρχής και τέλους πήξης. Εδώ, θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο μέγιστο προτεινόμενο από το τεχνικό φυλλάδιο ποσοστό (6.0%) το μίγμα έπηξε στο μίξερ κατά την ανάδευση, με αποτέλεσμα να μη υπάρχει δείγμα προς μέτρηση στο ποσοστό αυτό.



Σχήμα 4.3: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG).

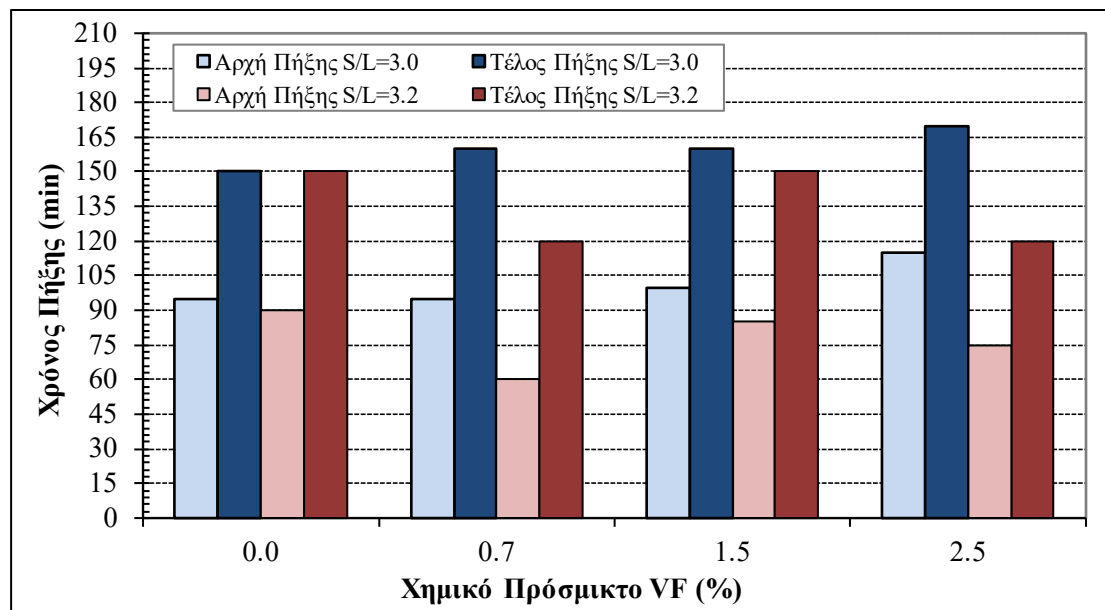
Στο Σχήμα 4.4, παρουσιάζονται οι χρόνοι αρχής και τέλους πήξης με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST). Η χρήση του πρόσμικτου ST δείχνει μία ακανόνιστη συμπεριφορά στο λόγο $S/L=3.0$ και μία διαφορετική από την αναμενόμενη συμπεριφορά στο 3.2 , αφού είναι σταθεροποιητής ενυδάτωσης με επιβράδυνση.



Σχήμα 4.4: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST).

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.5, ο υπερρευστοποιητής ViscoFlow-700 (VF), δείχνει στην περίπτωση του λόγου $S/L=3.0$ να υπάρχει μια μικρή αυξητική τάση στους χρόνους, κάτι το οποίο είναι λογικό. Στο λόγο $S/L=3.2$ δείχνει μια ακανόνιστη συμπεριφορά, κάτι το οποίο ίσως σημαίνει, όσο αφορά την επίδρασή του VF στους

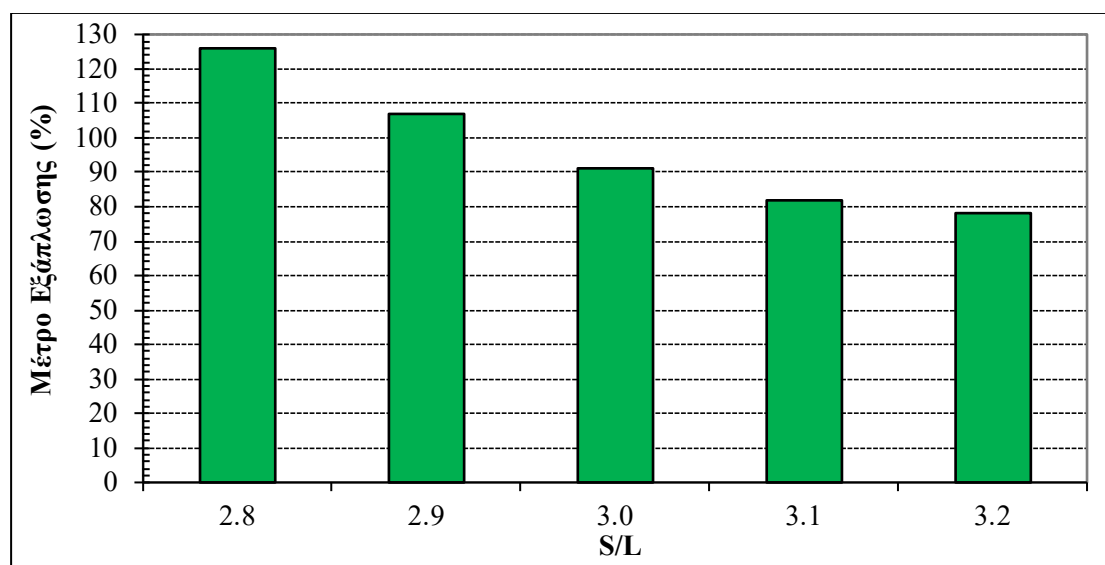
χρόνους πήξης, ότι και το συγκεκριμένο χημικό πρόσμικτο δεν λειτουργεί σωστά στα πολύ λιγότερο υδαρή γεωπολυμερή.



Σχήμα 4.5: Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή *ViscoFlow-700* (VF).

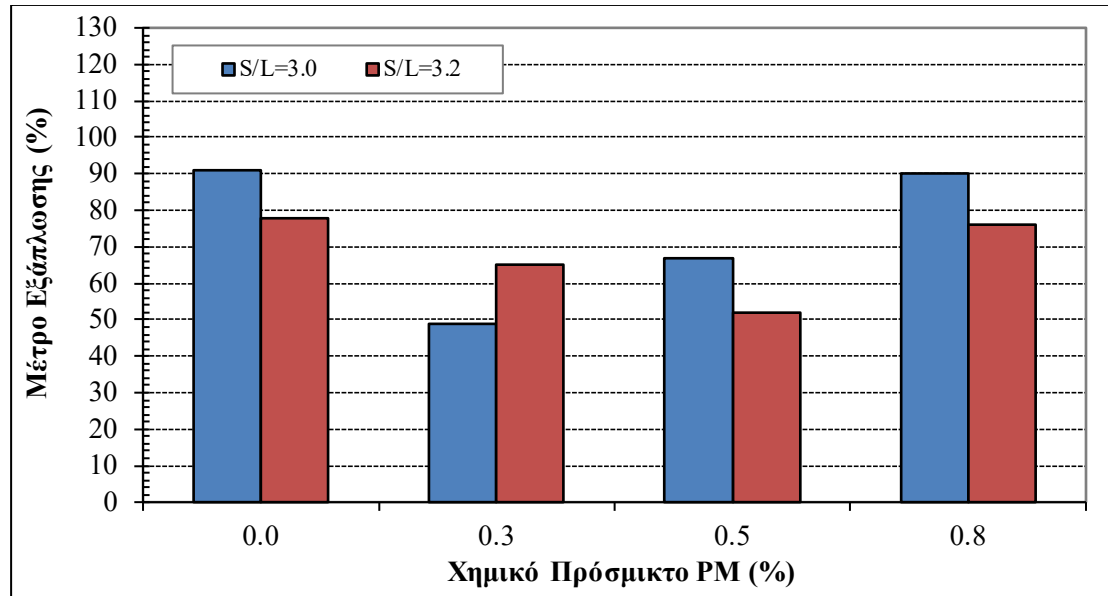
4.1.1.2. Εργασιμότητα

Οι μετρήσεις του μέτρου εξάπλωσης για τον έλεγχο της εργασιμότητας GFA χωρίς την προσθήκη χημικού πρόσμικτου για όλους τους λόγους S/L παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6. Παρατηρείται ότι η μείωση του λόγου S/L οδηγεί σε σημαντική αύξηση της εργασιμότητας. Η συμπεριφορά αυτή των γεωπολυμερών χαρακτηρίζεται πολύ θετική, αφού διευκολύνει την εφαρμογή τους στα δομικά έργα και ειδικά σε αυτά με υψηλές απαιτήσεις σε εργασιμότητα.



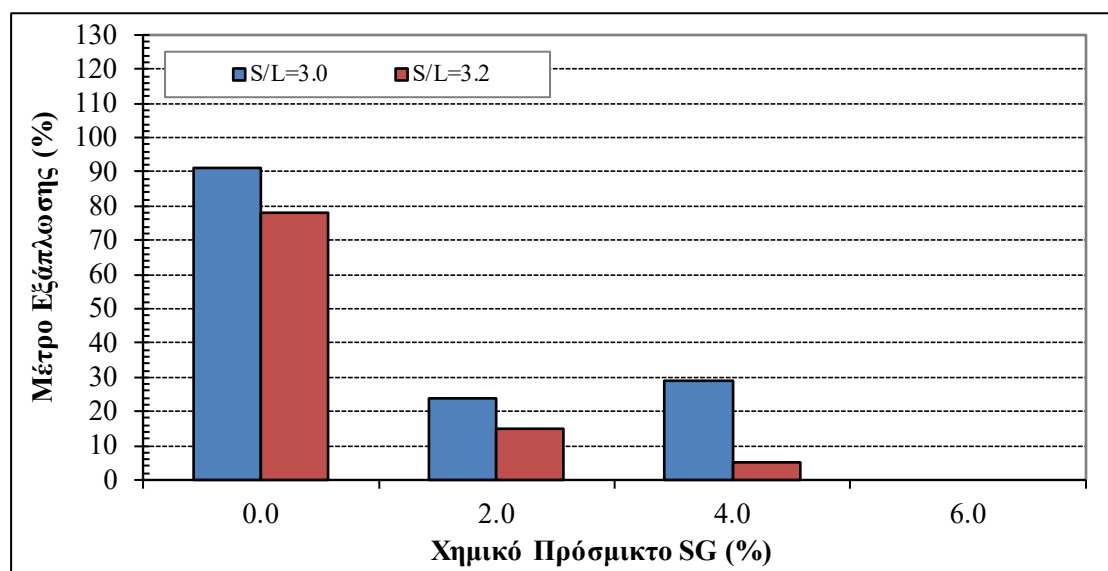
Σχήμα 4.6: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση με το λόγο S/L .

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η επίδραση του υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) στην εργασιμότητα της γεωπολυμερικής πάστας. Παρατηρείται να έχει ακανόνιστη συμπεριφορά συνολικά και στους δύο λόγους και σε όλες τις περιπτώσεις η εξάπλωση να είναι μικρότερη από το γεωπολυμερές χωρίς καθόλου χημικό πρόσμικτο.



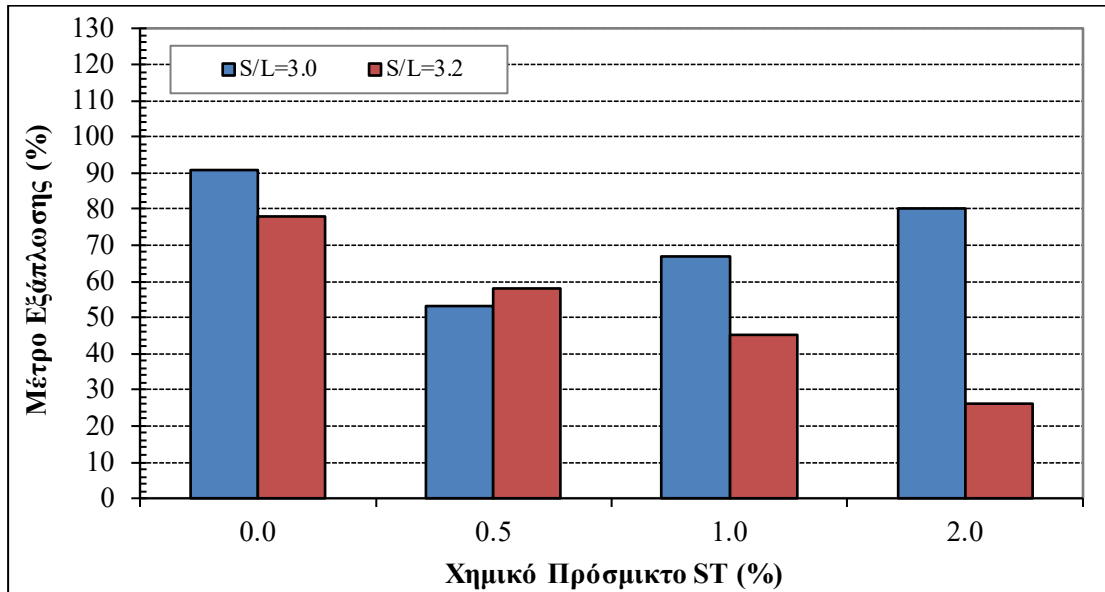
Σχήμα 4.7: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) σε διάφορα ποσοστά.

Η επίδραση του επιταχυντή ταχείας πήξης Sigunit L-22E (SG), που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8, δείχνει να έχει την αναμενόμενη συμπεριφορά και στους δύο λόγους ως επιταχυντής ταχείας πήξης, αφού όσο αυξάνεται το ποσοστό σε γενικές γραμμές μειώνεται η εργασιμότητα.



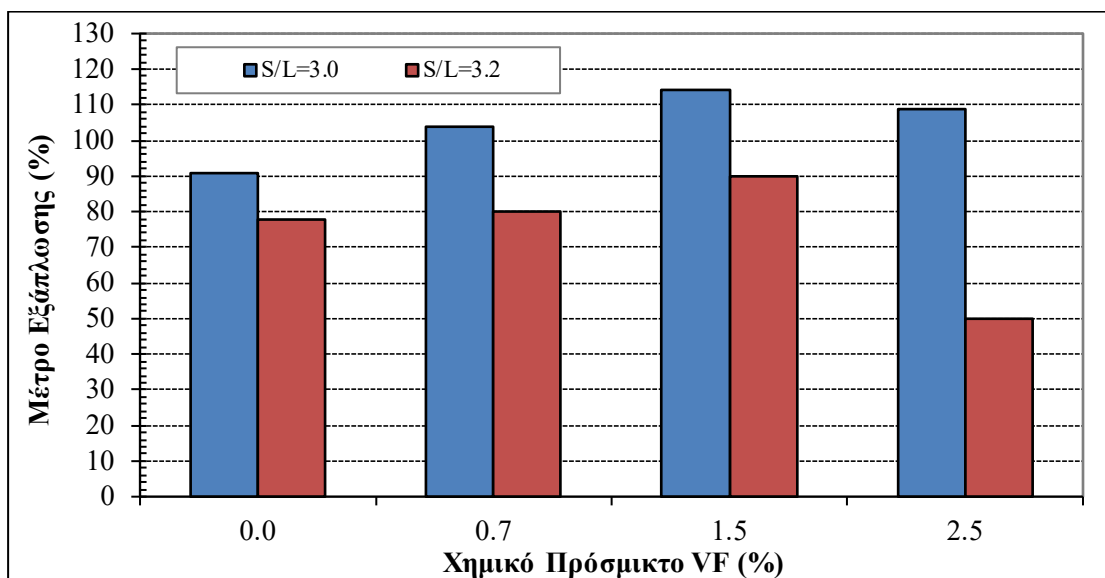
Σχήμα 4.8: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) σε διάφορα ποσοστά.

Αντίθετα, η χρήση του SikaTard-930 (ST), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9, δείχνει να επιδρά στην εργασιμότητα σε όλους τους λόγους διαφορετικά από το αναμενόμενο, αφού είναι σταθεροποιητής ενυδάτωσης με επιβράδυνση και σε κάθε περίπτωση το μέτρο εξάπλωσης είναι μικρότερο από το γεωπολυμερές χωρίς χημικό.



Σχήμα 4.9: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST) σε διάφορα ποσοστά.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10, που παρουσιάζεται η επίδραση του υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) στην εργασιμότητα, δείχνει να επηρεάζει το αναμενόμενο όσο αυξάνεται το ποσοστό χρήσης και στους δύο λόγους. Στο μέγιστο προτεινόμενο ποσοστό φαίνεται μία ασυνέχεια, αλλά αυτό ίσως οφείλεται στο μέγιστο αποδεκτό όριο χρήσης για τα γεωπολυμερή.



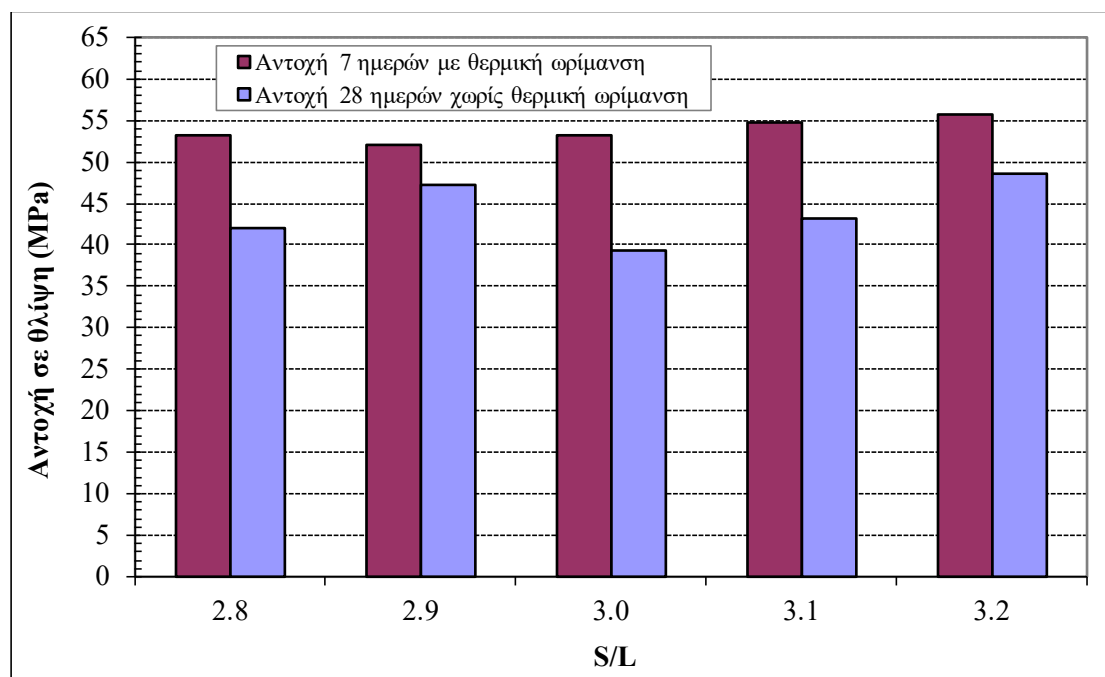
Σχήμα 4.10: Εργασιμότητα γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) σε διάφορα ποσοστά.

4.1.2. Σκληρωμένο GFA

Σε όλες τις συνθέσεις GFA στη σκληρωμένη τους κατάσταση μετρήθηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, η υδατοαπορροφητικότητα και η συστολή ξήρανσής τους.

4.1.2.1. Θλιπτική Αντοχή

Στο Σχήμα 4.11, που αφορά όλες τις συνθέσεις GFA χωρίς προσθήκη κάποιου χημικού πρόσμικτου, παρουσιάζονται οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη σε δοκίμια ηλικίας 7 ημερών με θερμική ωρίμανση και δοκίμια ηλικίας 28 ημερών χωρίς θερμική ωρίμανση, διαδικασία η οποία αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής. Όπως παρατηρείται ο λόγος S/L δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις αντοχές, αφού η διακύμανση μεταξύ των αντοχών όλων των συνθέσεων είναι μικρή. Η αντοχή σε θλίψη των δειγμάτων με θερμική ωρίμανση παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερη της αντοχής χωρίς θερμική ωρίμανση κατά 25% (μέσος όρος όλων των συνθέσεων). Αυτό σημαίνει ότι το γεωπολυμερές χωρίς θερμική ωρίμανση καθυστερεί περισσότερο από 28 ημέρες για να φτάσει την αντοχή των 7 ημερών με θερμική ωρίμανση, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τις σχετικές έρευνες (Adak και Mandal, 2012).



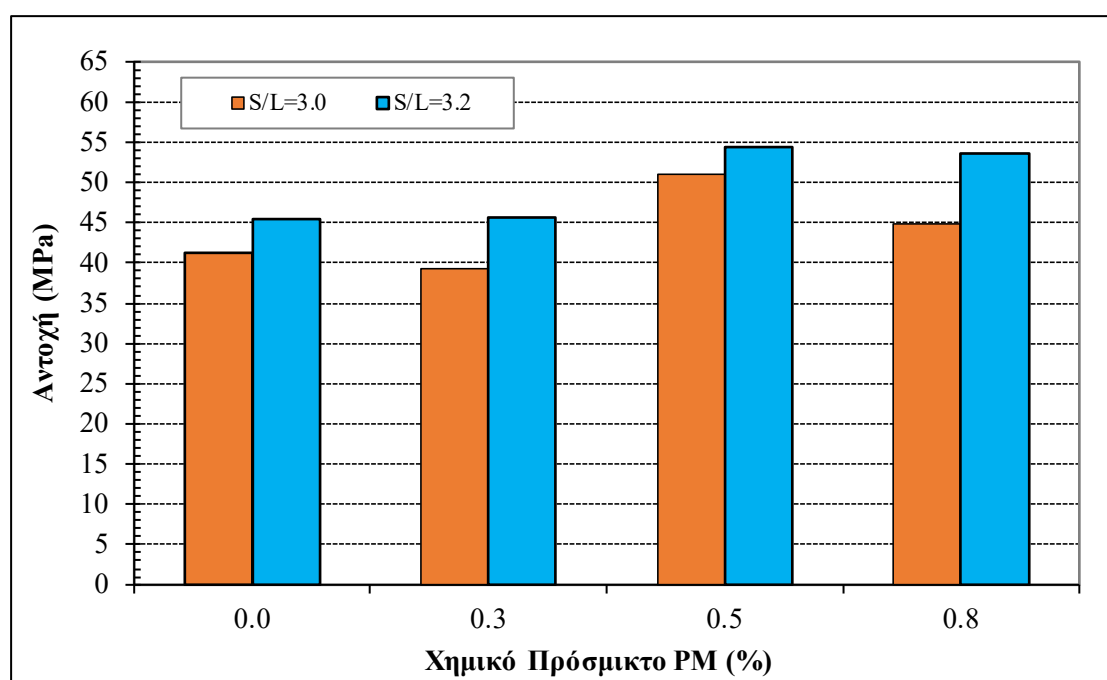
Σχήμα 4.11: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη γεωπολυμερικής πάστας 7 ημερών με θερμική ωρίμανση και 28 ημερών χωρίς θερμική ωρίμανση σε συνάρτηση με το λόγο S/L.

Σε κάθε περίπτωση όμως οι αντοχές είναι ικανοποιητικές, αφού και τα δείγματα χωρίς θερμική ωρίμανση ξεπερνούν τις απαιτήσεις αντοχών των τσιμεντών της κατηγορίας 32.5, όπου πρέπει η αντοχή 28 ημερών να είναι μεγαλύτερη των 32.5 MPa. Επίσης, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι τα ίδια δείγματα, οριακά (με εξαίρεση το δείγμα με S/L=3.0), καλύπτουν τις απαιτήσεις της κατηγορίας αντοχών 42.5 (αντοχή 28 ημερών μεγαλύτερη των 42.5 MPa). Τέλος, παρατηρείται ότι όλες οι συνθέσεις με

θερμική ωρίμανση καλύπτουν τις απαιτήσεις ακόμα και της κατηγορίας αντοχών 52.5 (αντοχή 28 ημερών μεγαλύτερη των 52.5 MPa). Σχετικά με την ανάπτυξη των αντοχών θλίψης, το πλεονέκτημα των γεωπολυμερών είναι ότι τα όρια των αντοχών τα ξεπερνούν σε διάστημα 7 ημερών και όχι 28 ημερών που αναφέρει το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 για τις αντοχές των τσιμέντων.

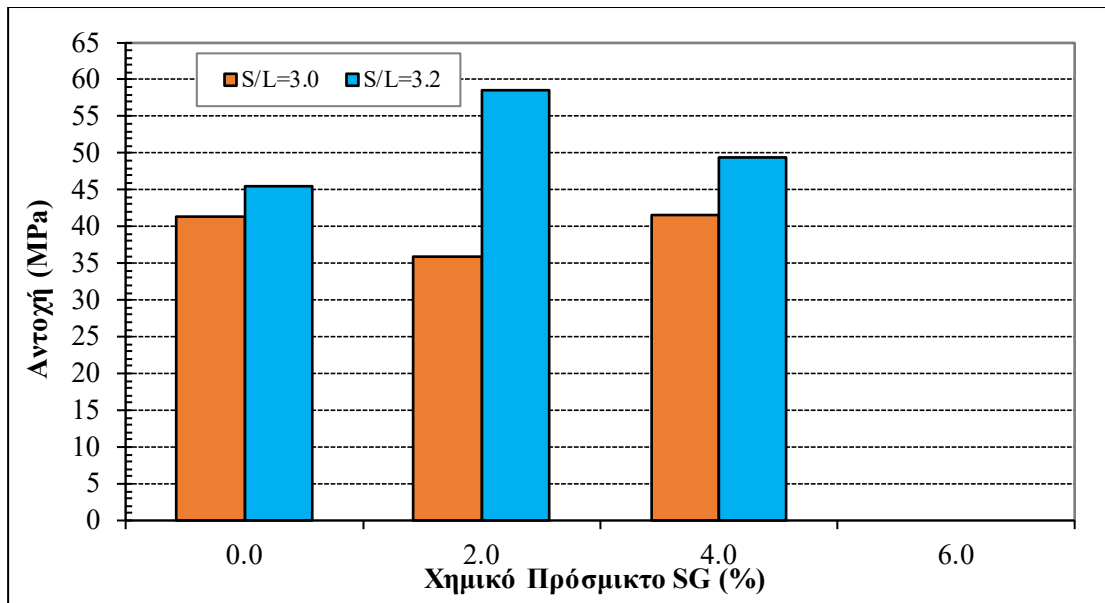
Όσο αφορά τα αποτελέσματα που ακολουθούν και περιλαμβάνουν όλες τις συνθέσεις GFA με τη χρήση χημικού πρόσμικτου σε διάφορα ποσοστά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι αντοχές είναι αποκλειστικά και μόνο σε ηλικία 28 ημερών και χωρίς κάποια θερμική επεξεργασία κατά την ωρίμανση. Επί της ουσίας, αφέθηκαν να ωριμάσουν σε συνθήκες περιβάλλοντος εργαστηρίου από την παρασκευή τους μέχρι και την ημέρα θραύσης τους.

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η επίδραση του υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) στις αντοχές σε μονοαξονική θλίψη, όπου φαίνεται μία σημαντική αύξηση όσο αυξάνεται το ποσοστό χρήσης, κάτι το οποίο παρατηρείται και στους δύο λόγους S/L που χρησιμοποιήθηκαν.



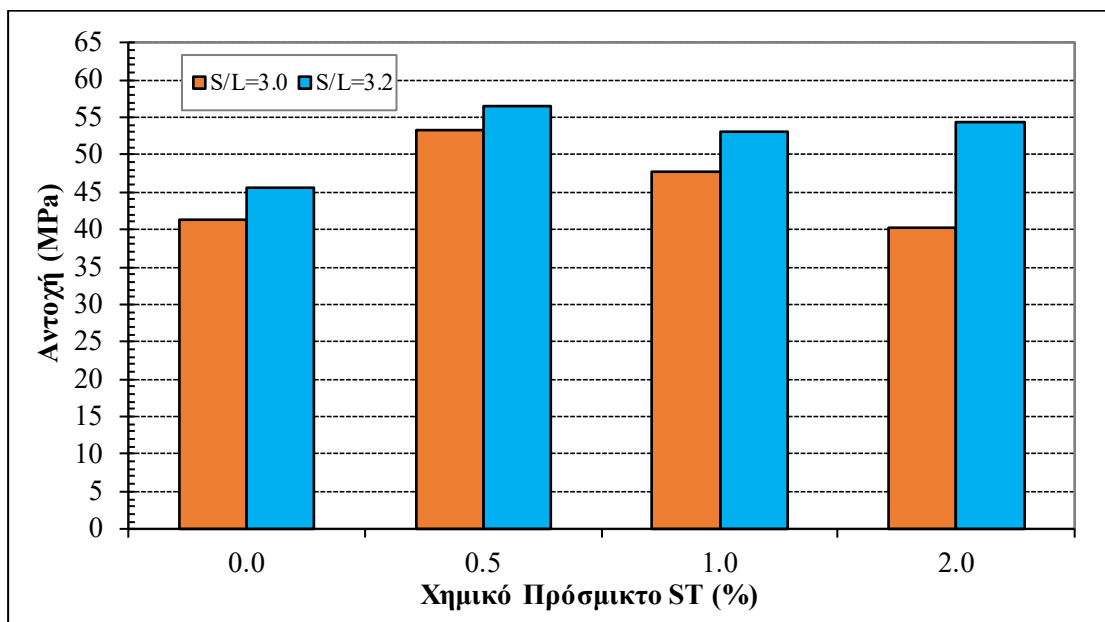
Σχήμα 4.12: Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) σε διάφορα ποσοστά.

Στο Σχήμα 4.13, όπου παρουσιάζεται η επίδραση του επιταχυντή ταχείας πήξης Sigit L-22E (SG) στις αντοχές σε μονοαξονική θλίψη, φαίνεται ότι το πρόσμικτο αυτό επιδρά θετικά στην αντοχή σε θλίψη μόνο για την περίπτωση του υψηλού λόγου S/L=3.2. Στο ποσοστό προσθήκης 6%, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν υπάρχουν μετρήσεις, αφού το μίγμα έπηξε στο μίξερ κατά τη διάρκεια της ανάδευσης.



Σχήμα 4.13: Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) σε διάφορα ποσοστά.

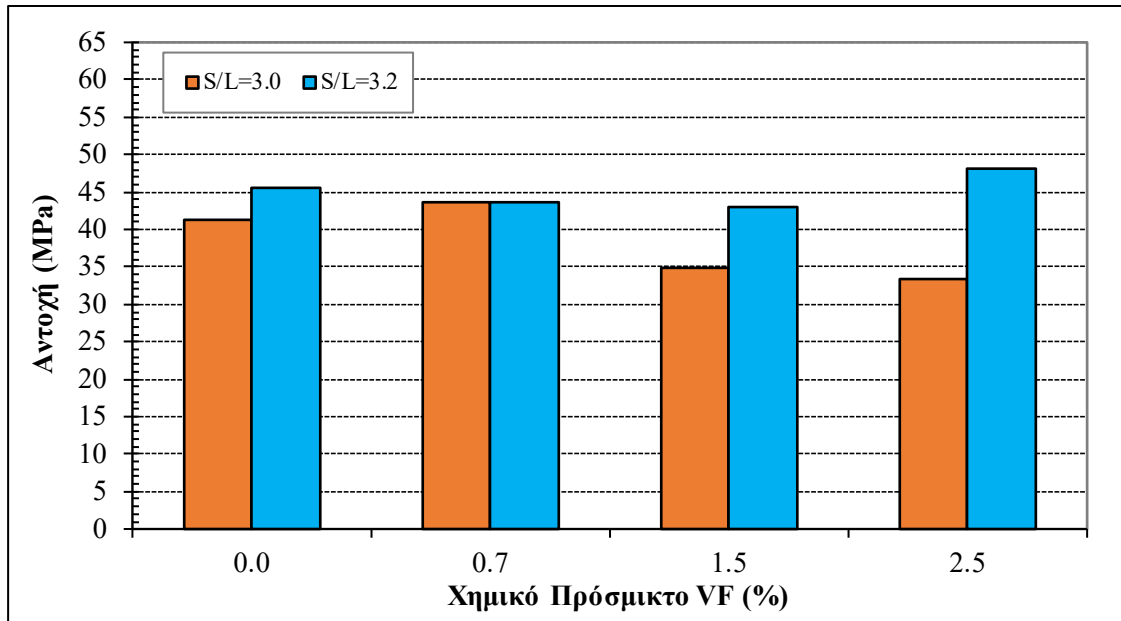
Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η επίδραση στη μονοαξονική θλίψη της γεωπολυμερικής πάστας με χρήση σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι έχει θετική επίδραση στις αντοχές, ιδιαίτερα για το ποσοστό προσθήκης 0.5%.



Σχήμα 4.14: Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST) σε διάφορα ποσοστά.

Η χρήση του υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF), που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15, δείχνει ότι τόσο για $S/L=3.0$ όσο και για $S/L=3.2$ το συγκεκριμένο

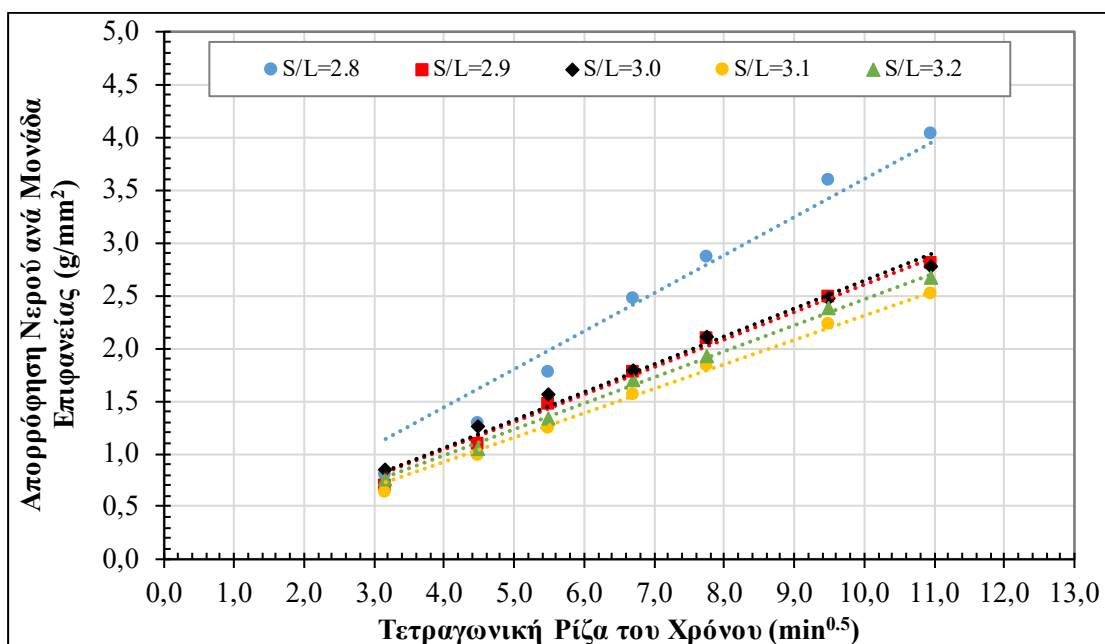
πρόσμικτο μειώνει τις αντοχές. Εξαιρέση αποτελεί το ποσοστό προσθήκης 0.7% στο $S/L=3.0$ και το 2.5% στο $S/L=3.2$, όπου δείχνει η αντοχή να μην επηρεάζεται.



Σχήμα 4.15: Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερικής πάστας σε λόγους $S/L=3.0$ και 3.2 με προσθήκη υπερρυστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) σε διάφορα ποσοστά.

4.1.2.2. Υδατοαπορροφητικότητα

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η συσχέτιση απορρόφησης νερού ανά μονάδα επιφάνειας και του χρόνου απορρόφησης αυτού στα δοκίμια των διαφορετικών λόγων S/L .



Σχήμα 4.16: Απορρόφηση νερού ανά μονάδα επιφάνειας γεωπολυμερικής πάστας ως προς την τετραγωνική ρίζα του χρόνου για διάφορους λόγους S/L .

Η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας βασίζεται στη μέτρηση του ρυθμού απορρόφησης νερού, που αποδίδεται στους τριχοειδείς πόρους σε ένα δοκίμιο. Οι τιμές του Σχήματος 4.16 προέκυψαν από τη Σχέση 4.1:

$$i = S \cdot t^{0.5} \quad (4.1)$$

όπου: i = η συνολική αύξηση μάζας ανά μονάδα επιφανείας προσρόφησης (g/mm^2)
 t = ο χρόνος (min)
 S = η υδατοαπορροφητικότητα ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$).

Η παραπάνω σχέση δείχνει, ότι η υδατοαπορροφητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας απορρόφησης είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου απορρόφησης. Επομένως, η υδατοαπορροφητικότητα προσδιορίζεται από την κλίση της συνάρτησης $i = f(t^{0.5})$ με τη χρήση ανάλυσης παλινδρόμησης (Ασπρογέρακας, 2013).

Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η διαφοροποίηση στην υδατοαπορροφητικότητα για όλες τις παραπάνω συνθέσεις GFA με το διαφορετικό λόγο S/L. Τόσο από το διάγραμμα όσο και από τον πίνακα είναι εμφανές ότι με εξαίρεση τη σύνθεση με λόγο S/L=2.8 δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφοροποίηση στην υδατοαπορροφητικότητα. Γενικά, φαίνεται ότι ο λόγος S/L δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την υδατοαπορροφητικότητα, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και της αντίστοιχες σχετικές έρευνες (Ασπρογέρακας, 2013).

Πίνακας 4.1: Υδατοαπορροφητικότητα γεωπολυμερικής πάστας διαφορετικού λόγου S/L.

S/L	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
Υδατοαπορροφητικότητα ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$)	0.354	0.257	0.255	0.226	0.241

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, στους επιλεγμένους λόγους S/L=3.0 και 3.2 δοκιμάστηκαν και τέσσερα χημικά πρόσμικτα σε τρία διαφορετικά ποσοστά προσθήκης, στις οποίες μετρήθηκε και η υδατοαπορροφητικότητα.

Τα αποτελέσματα των συνθέσεων με την προσθήκη υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Συμπερασματικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η χρήση του PM μειώνει την υδατοαπορροφητικότητα, αλλά όχι αναλογικά ως προς το ποσοστό χρήσης. Στο λόγο S/L=3.2 είναι αρκετά μεγαλύτερη η μείωση αυτή από ότι στο λόγο S/L=3.0.

Πίνακας 4.2: Υδατοαπορροφητικότητα ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) γεωπολυμερικής πάστας με λόγο S/L 3.0 και 3.2, με προσθήκη υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) σε διάφορα ποσοστά.

Προσθήκη PM (%)	0.0	0.3	0.5	0.8
S/L=3.0	0.255	0.207	0.236	0.211
S/L=3.2	0.241	0.170	0.157	0.168

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με την προσθήκη του επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG). Στο ποσοστό προσθήκης 2.0% και στους δύο λόγους S/L, φαίνεται η γεωπολυμερική πάστα να έχει τη μικρότερη υδατοαπορροφητικότητα. Στο ποσοστό προσθήκης 6.0%, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το μίγμα έπηξε μέσα στο μίξερ κατά την ανάδευση. Ως συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί ότι η χρήση του SG μείωσε την υδατοαπορροφητικότητα.

Πίνακας 4.3: Υδατοαπορροφητικότητα ($mm/min^{0.5}$) γεωπολυμερικής πάστας με λόγο S/L 3.0 και 3.2, με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) σε διάφορα ποσοστά.

Προσθήκη SG (%)	0.0	2.0	4.0	6.0
S/L=3.0	0.255	0.195	0.242	-
S/L=3.2	0.241	0.210	0.221	-

Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα υδατοαπορροφητικότητας με τη χρήση του σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST). Εδώ, φαίνεται ότι το ST δεν επηρέασε σχεδόν καθόλου την υδατοαπορροφητικότητα σε κανένα ποσοστό προσθήκης και στους δύο λόγους S/L.

Πίνακας 4.4: Υδατοαπορροφητικότητα ($mm/min^{0.5}$) γεωπολυμερικής πάστας με λόγο S/L 3.0 και 3.2, με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST) σε διάφορα ποσοστά.

Προσθήκη ST (%)	0.0	0.5	1.0	2.0
S/L=3.0	0.255	0.260	0.243	0.263
S/L=3.2	0.241	0.246	0.223	0.224

Η επίδραση προσθήκης του υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.5. Φαίνεται ότι η προσθήκη VF μειώνει την υδατοαπορροφητικότητα και στους δύο λόγους S/L, αλλά όχι αναλογικά ως προς το ποσοστό χρήσης.

Πίνακας 4.5: Υδατοαπορροφητικότητα ($mm/min^{0.5}$) γεωπολυμερικής πάστας με λόγο S/L 3.0 και 3.2, με προσθήκη υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) σε διάφορα ποσοστά.

Προσθήκη VF (%)	0.0	0.7	1.5	2.5
S/L=3.0	0.255	0.209	0.243	0.210
S/L=3.2	0.241	0.196	0.187	0.221

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, ως τελικό συμπέρασμα προκύπτει ότι η χρήση χημικού πρόσμικτου στη γεωπολυμερική πάστα μειώνει την υδατοαπορροφητικότητα, ανεξάρτητα του ποσοστού χρήσης και του λόγου S/L. Αυτό σημαίνει ότι ίσως δε

χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν οι μέγιστες προτεινόμενες ποσότητες προσθήκης στα συγκεκριμένα χημικά πρόσμικτα.

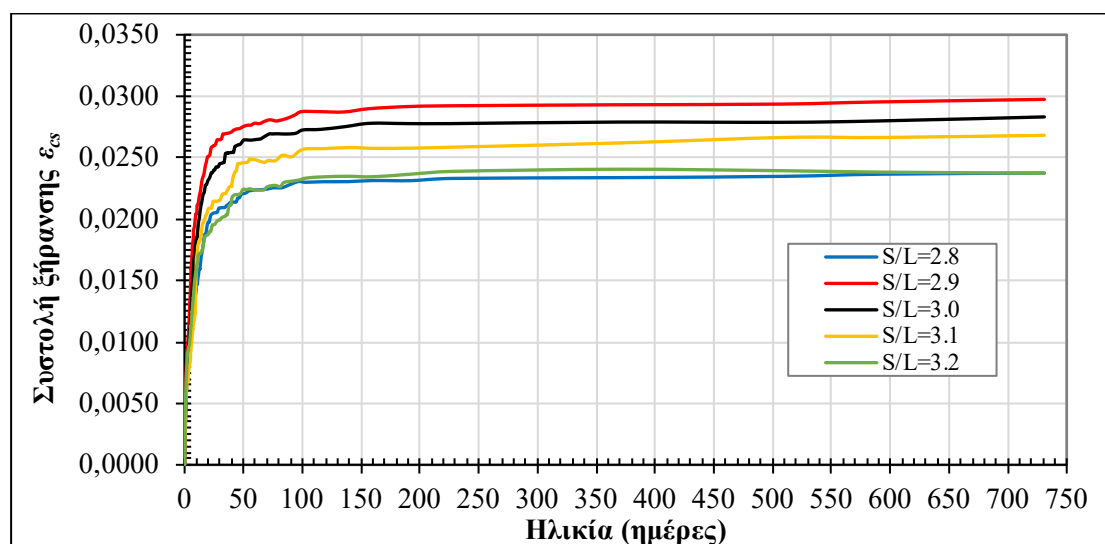
4.1.2.3. Συστολής Ξήρανσης

Σε όλες τις συνθέσεις GFA με ή χωρίς τη χρήση χημικού πρόσμικτου μετρήθηκε και η συστολή ξήρανσης (ε_{cs}) τους έως την ηλικία των 2 ετών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα, προέκυψαν με τη χρήση της Σχέσης 4.2.

$$\varepsilon_{cs} = \frac{L_0 - L_i}{L_0} \quad (4.2)$$

όπου: L_0 = η αρχική μέτρηση μήκους του δοκιμίου (μm)
 L_i = η κάθε μέτρηση μήκους του δοκιμίου (μm).

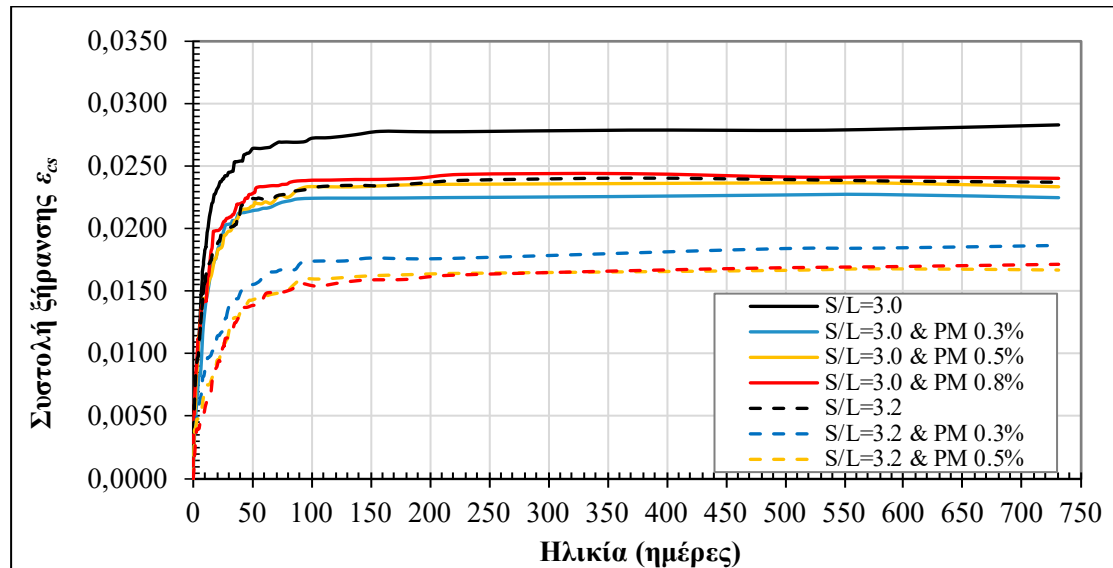
Η συστολή ξήρανσης (ε_{cs}) των συνθέσεων GFA με διαφορετικό λόγο S/L, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.17. Παρατηρείται ότι η ε_{cs} σε όλες τις συνθέσεις κυμαίνεται από περίπου 0.022 έως 0.029, κάτι το οποίο είναι λίγο παραπάνω από τις μετρήσεις σχετικής έρευνας, στην οποία όμως οι μετρήσεις έγιναν έως τις 70 μέρες και έδειξαν ότι δεν είχαν σταθεροποιηθεί (Hojati και Rajabirour, 2016). Επίσης, παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται τα υγρά στοιχεία (L) και μικραίνει ο λόγος S/L, τόσο αυξάνεται και η ε_{cs} . Εξαιρέση αποτελεί η σύνθεση με λόγο S/L=2.8, της οποίας η ε_{cs} κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με την S/L=3.0. Άρα μπορεί να εξαχθεί το γενικό συμπέρασμα ότι ο λόγος S/L επιδρά στη συστολή ξήρανσης των GFA και ειδικότερα, όσο μειώνεται ο λόγος S/L τόσο αυξάνεται η ε_{cs} των GFA.



Σχήμα 4.17: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L και της ηλικίας συντήρησης.

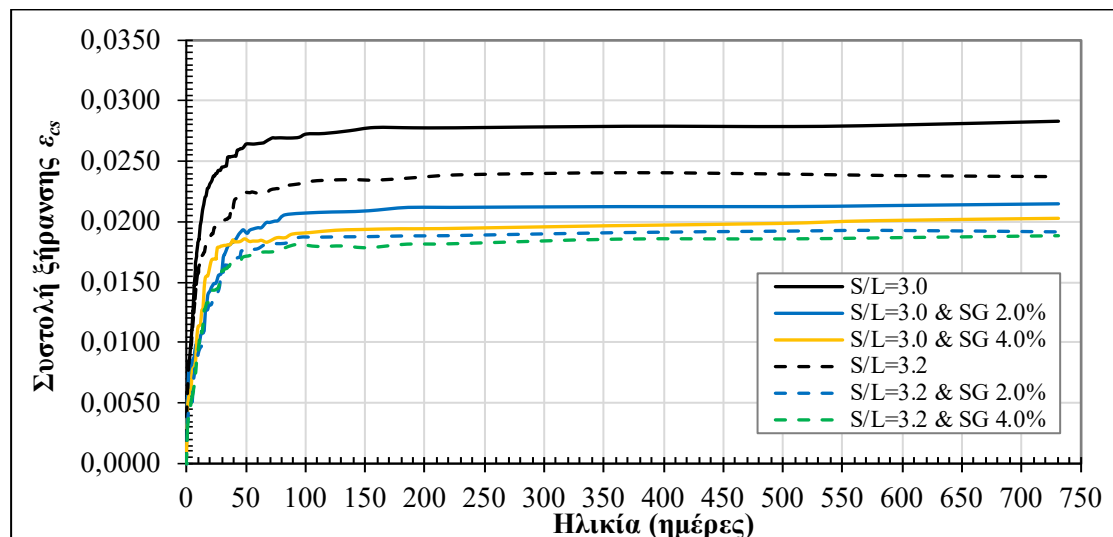
Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζονται οι μετρήσεις συστολής ξήρανσης (ε_{cs}) των συνθέσεων με προσθήκη του υπερρυστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM). Παρατηρείται ότι η προσθήκη του PM μειώνει τη συστολή ξήρανσης σε μεγάλο βαθμό και στους δύο επιλεγμένους λόγους S/L που χρησιμοποιήθηκε. Η ε_{cs} δείχνει να

σταθεροποιείται σε όλα τα ποσοστά προσθήκης στο $S/L=3.0$ στην ηλικία περίπου των 200 ημερών. Στις συνθέσεις με $S/L=3.2$ φαίνεται να υφίσταται συνεχόμενη, όμως μικρή, συρρίκνωση έως και τα 2 έτη. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η χρήση του PM βελτιώνει τη συστολή ξήρανσης των GFA σε όλα τα ποσοστά χρήσης του και για τους δύο μελετηθέντες λόγους S/L 3.0 και 3.2.



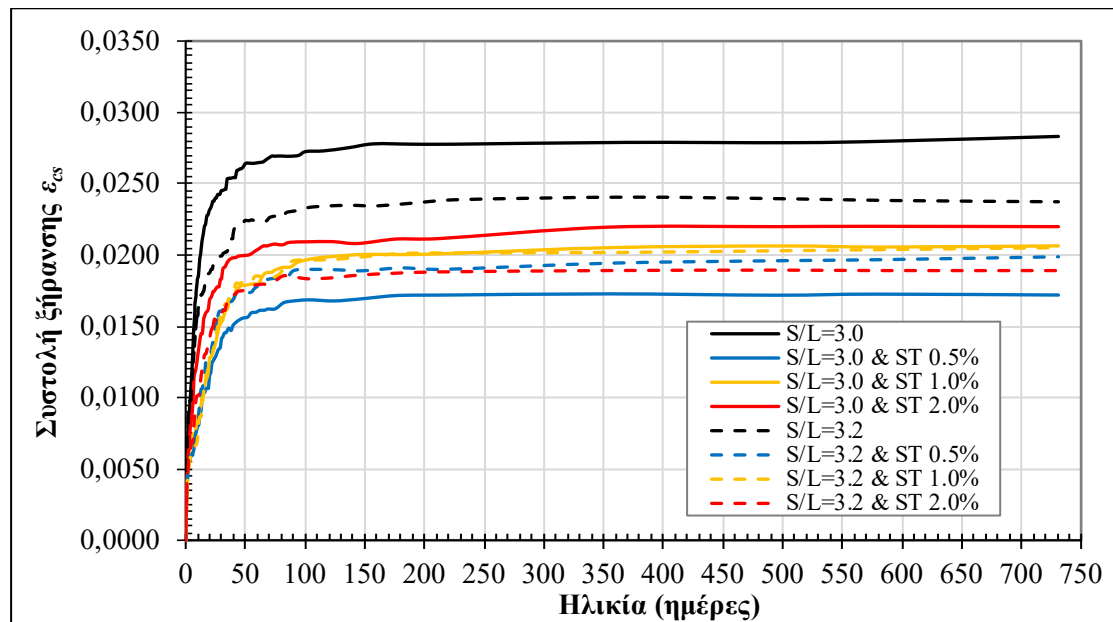
Σχήμα 4.18: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L , του ποσοστού προσθήκης υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) και της ηλικίας συντήρησης.

Η επίδραση προσθήκης του επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) στη ϵ_{cs} δίνεται στο Σχήμα 4.19. Όπως παρατηρείται και στους δύο λόγους S/L η μείωση της ϵ_{cs} σε όλα τα ποσοστά προσθήκης SG είναι σημαντική. Επίσης, η ϵ_{cs} σε όλες τις συνθέσεις δείχνει να σταθεροποιείται στην ηλικία των 200 ημερών. Πάλι, στις συνθέσεις με το μέγιστο ποσοστό προσθήκης (6%) δεν έχουμε αποτελέσματα, αφού όπως προαναφέρθηκε, έπηξε το μίγμα κατά την ανάδευση στο μίξερ.



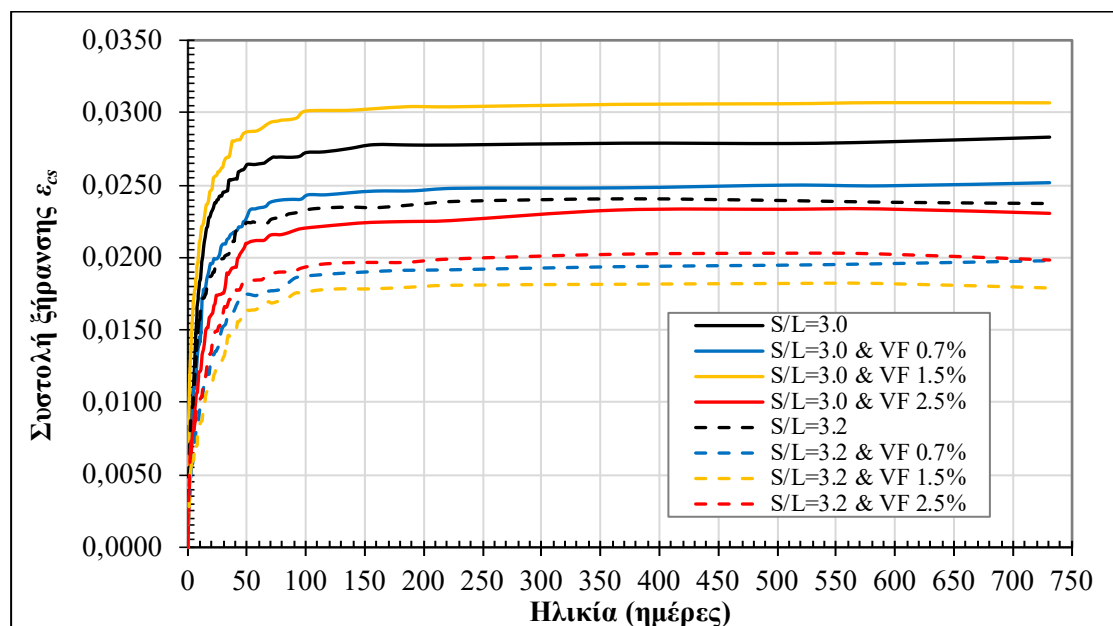
Σχήμα 4.19: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L , του ποσοστού προσθήκης επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG) και της ηλικίας συντήρησης.

Στο Σχήμα 4.20 δίνεται η ϵ_{cs} στις συνθέσεις GFA με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST). Παρατηρείται και στη χρήση του ST μεγάλη μείωση της ϵ_{cs} σε όλα τα ποσοστά χρήσης και στους δύο λόγους S/L.



Σχήμα 4.20: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L, του ποσοστού προσθήκης σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση SikaTard-930 (ST) και της ηλικίας συντήρησης.

Η ϵ_{cs} στις συνθέσεις GFA με προσθήκη υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21. Με εξαίρεση το λόγο S/L=3.0 με προσθήκη VF 1.5%, παρατηρείται ότι η χρήση του VF συμβάλει στη μείωση της ϵ_{cs} .



Σχήμα 4.21: Συστολή ξήρανσης γεωπολυμερικής πάστας σε συνάρτηση του S/L, του ποσοστού προσθήκης υπερρευστοποιητή ViscoFlow-700 (VF) και της ηλικίας συντήρησης.

Ως τελικό συμπέρασμα από όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι τα χημικά πρόσμικτα που δοκιμάστηκαν μειώνουν τη συστολή ξήρανσης των GFA και για τους δύο μελετηθέντες λόγους S/L 3.0 και 3.2..

4.2. Δοκιμές Σκυροδέματος (GC – CC)

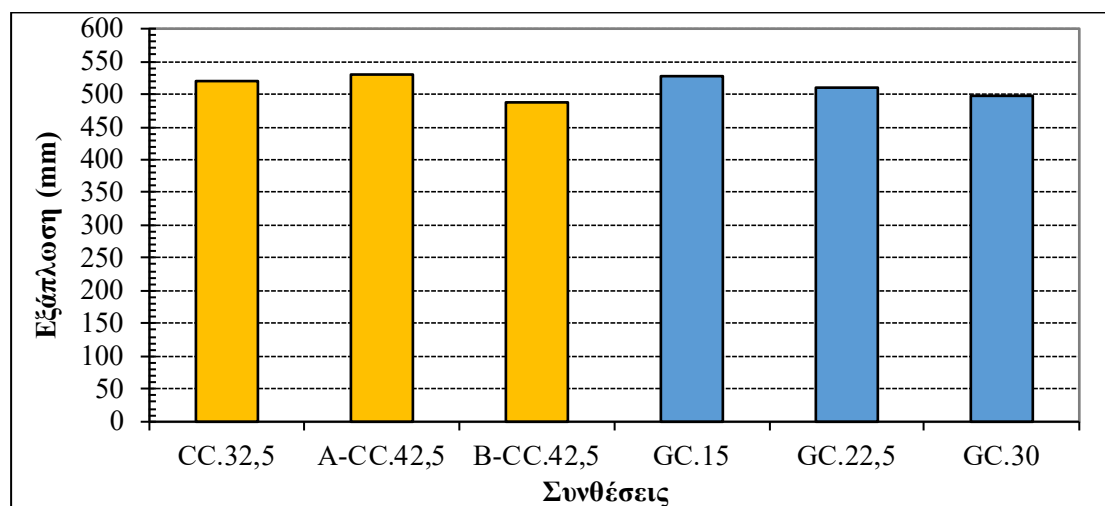
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών στα σκυροδέματα όλων των συνθέσεων γεωπολυμερικών (GC) και συμβατικών (CC), στη νωπή και σκληρυμένη κατάστασή τους, τα οποία συγκρίνονται με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-2016 και του ΕΚΩΣ 2000, καθώς και με κάποιες ενδεικτικές σχετικές έρευνες.

4.2.1. Νωπό Σκυρόδεμα (GC – CC)

Σε όλες τις συνθέσεις όλων των κατηγοριών σκυροδεμάτων όσο βρίσκονταν στη νωπή τους κατάσταση ελέγχθηκε η εργασιμότητά τους με τη μέθοδο μέτρησης του μέτρου εξάπλωσης και με τη δοκιμή της κάθισης. Επίσης, μετρήθηκε η αεροπεριεκτικότητά τους και η πυκνότητά τους.

4.2.1.1. Εργασιμότητα

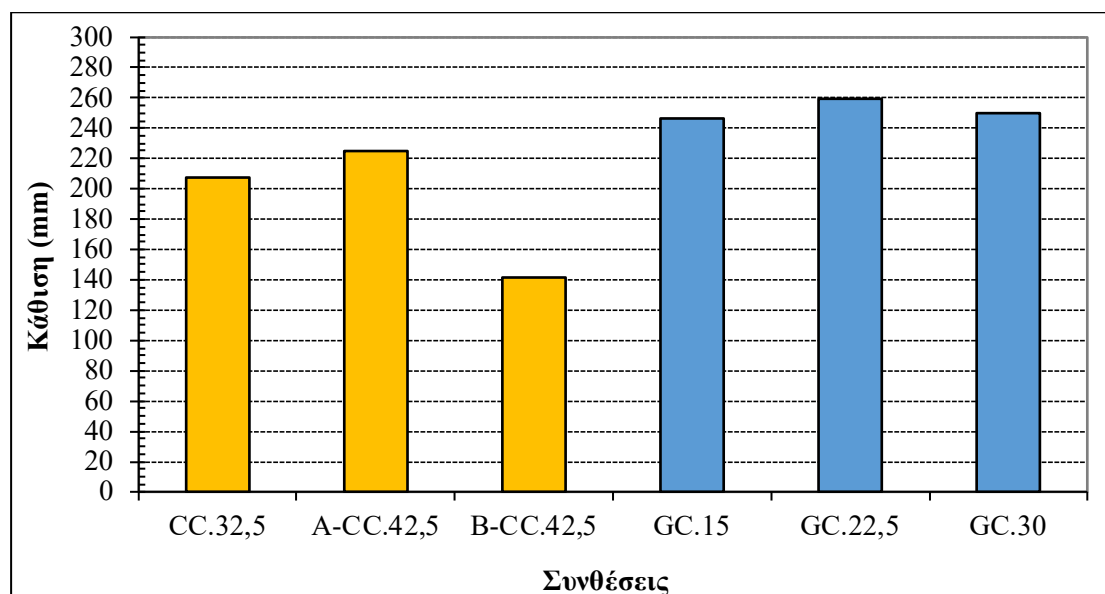
Στον αρχικό σχεδιασμό των συνθέσεων είχε προβλεφθεί όλα τα παραγόμενα σκυροδέματα των GC και των CC, εκτός από τις κοινές κατηγορίες αντοχής, να έχουν ίδιο μέτρο εξάπλωσης, κατηγορία F4 κατά ΚΤΣ-2016. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.22, φαίνεται ότι επιτεύχθηκε αυτός ο στόχος, αφού τα όρια της κατηγορίας είναι μεταξύ 490 και 550 mm.



Σχήμα 4.22: Μέτρο εξάπλωσης των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή της κάθισης. Όπως φαίνεται, ενώ στη δοκιμή της εξάπλωσης όλες οι συνθέσεις ανήκαν στην ίδια κατηγορία (F4), στις κατηγορίες κάθισης διαφοροποιούνται. Κατά τον ΚΤΣ-2016, η σύνθεση B-CC.42,5 ανήκει στην κατηγορία S3 (πλαστικό), η

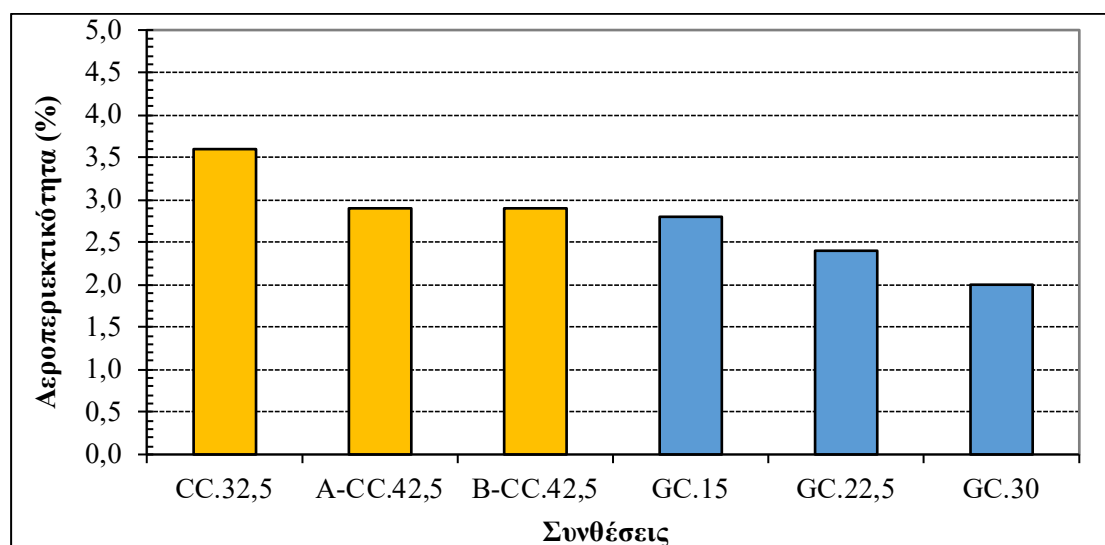
σύνθεση CC.32,5 στην S4 (ημίρρευστο) και όλες οι υπόλοιπες στην S5 (ρευστό). Αυτό δείχνει ότι η κατηγοριοποίηση και για τις δύο δοκιμές στις συνθέσεις GC συμβαδίζει, σε αντίθεση με τις συνθέσεις CC, κάτι το οποίο συμβαίνει συχνά στα CC.



Σχήμα 4.23: Εργασιμότητα με τη μέθοδο του κώνου κάθισης των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.

4.2.1.2. Αεροπεριεκτικότητα

Στο νωπό σκυρόδεμα όλων των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε μέτρηση του περιεχόμενου ποσοστού αέρα, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.24.



Σχήμα 4.24: Περιεχόμενο ποσοστό αέρα των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.

Η περιεκτικότητα αέρα στα CC κινήθηκε στα αναμενόμενα πλαίσια αν αναλογιστούμε ότι προστέθηκε και χημικό πρόσμικτο κατά την παρασκευή τους. Η

αεροπεριεκτικότητα στα GC κινήθηκε σε χαμηλότερα ποσοστά από τα CC, όμως εντός των γενικών ορίων των σκυροδεμάτων. Επίσης, στα GC παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της ΙΤ, τόσο μειώνεται η περιεκτικότητα σε αέρα.

Εκτός από την αεροπεριεκτικότητα, με τη βοήθεια της συσκευής της δοκιμής και τη Σχέση 4.3 (ΕΛΟΤ EN 12350-6) υπολογίστηκε η πειραματική πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος των CC και GC.

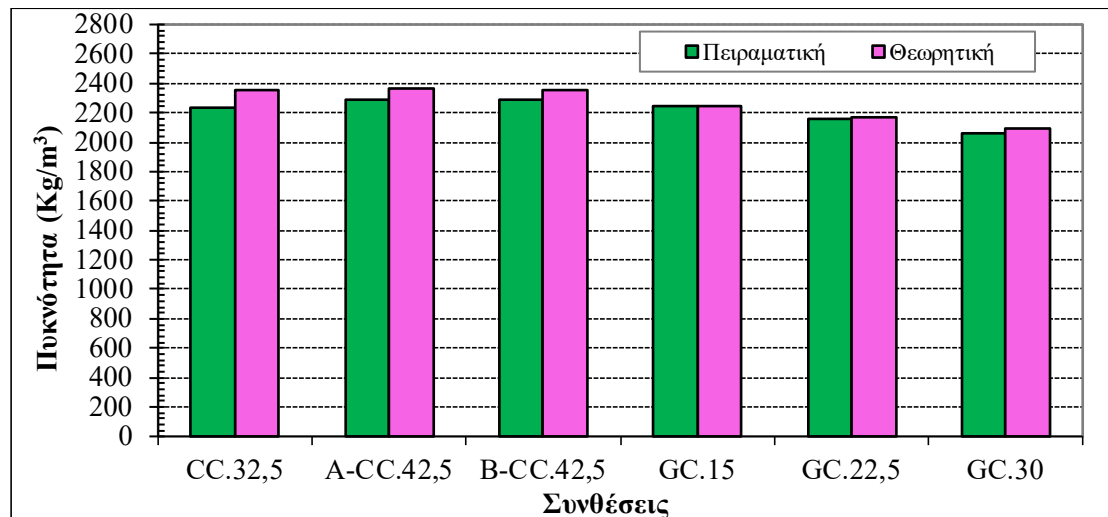
$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.3)$$

όπου: m_1 = η μάζα του άδειου δοχείου της συσκευής (kg)

m_2 = η μάζα του δοχείου της συσκευής και του νωπού σκυροδέματος (kg)

V = ο όγκος του δοχείου της συσκευής (m^3).

Στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζεται η πειραματική και η θεωρητική πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος. Η θεωρητική πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος υπολογίστηκε από το άθροισμα των μαζών των υλικών της εκάστοτε μελέτης σύνθεσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε όλες τις συνθέσεις η πειραματική με τη θεωρητική τιμή ήταν πολύ κοντά, όμως με μεγαλύτερη ακρίβεια στα GC. Επίσης, παρατηρείται στα GC ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ΙΤ, τόσο μειώνεται και η πυκνότητα, κάτι το αναμενόμενο.



Σχήμα 4.25: Πειραματική και θεωρητική Πυκνότητα νωπού σκυροδέματος των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) συνθέσεων.

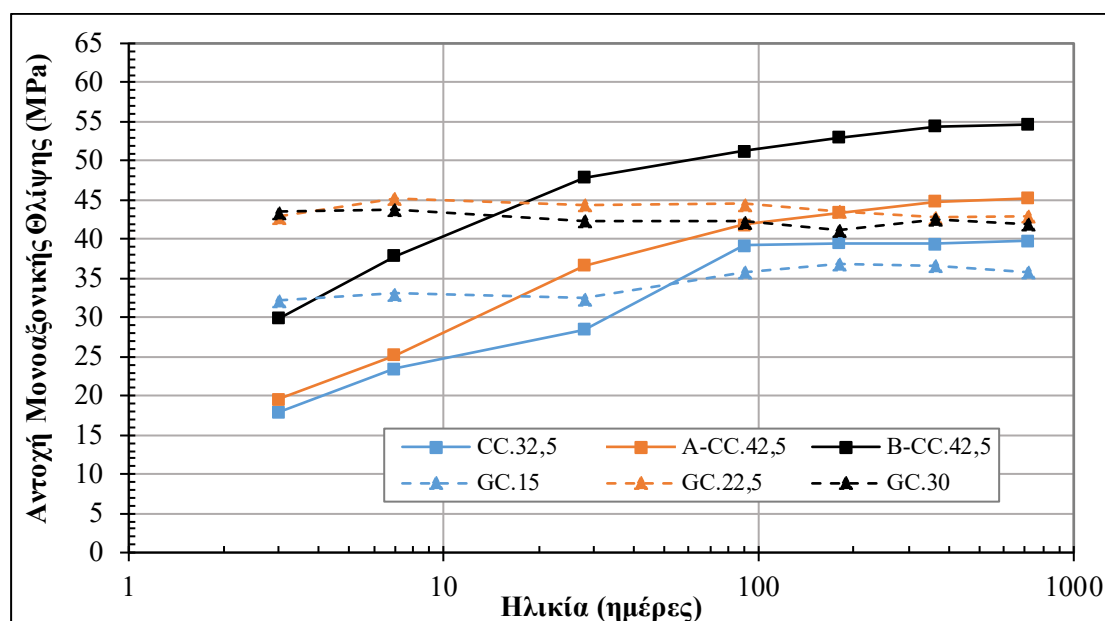
4.2.2. Σκληρυμένο Σκυρόδεμα (GC και CC)

Στη σκληρυμένη τους κατάσταση τα σκυροδέματα GC και CC, όσο αφορά την αντοχή τους, ελέγχθηκαν στη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης, της κάμψης δύο σημείων, της διάρρηξης κυλίνδρου και μετρήθηκε η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων. Επίσης, υπολογίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, το βέλος κάμψης και η εφελκυστική τους παραμόρφωση. Όσο αφορά την ανθεκτικότητά τους μετρήθηκαν η υδατοαπορροφητικότητα, το ανοικτό πορώδες, η απώλεια μάζας σε κύκλους ψύξης – απόψυξης, η απώλεια μάζας σε κύκλους ξήρανσης – εμβάπτισης, η

διάχυση χλωριόντων και τέλος η απώλεια μάζας τους σε διαβρωτικό περιβάλλον θεικών αλάτων και οξέων.

4.2.2.1. Θλιπτική Αντοχή

Στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μονοαξονικής θλίψης όλων των συνθέσεων GC και CC, όπου φαίνεται η εξέλιξη της αντοχής τους μέχρι τα 2 έτη. Όπως ήταν αναμενόμενο και συμφωνεί με τη βιβλιογραφία (Neville, 2012), σε όλες τις συνθέσεις των CC παρατηρείται μία αυξανόμενη αντοχή, έντονη μέχρι τις 28 μέρες και πιο ήπια στη συνέχεια, η οποία δείχνει να σταθεροποιείται από τις 180 ημέρες και μετά. Όλες οι συνθέσεις των GC, όπως γίνεται αντιληπτό από το ίδιο σχήμα, αποκτούν τη μέγιστή τους αντοχή από την ηλικία των 3 ημερών και τη διατηρούν μέχρι την ηλικία των 2 ετών με μία μικρή μέση τυπική απόκλιση της τάξης των ± 1.3 MPa και ένα μέσο συντελεστή μεταβλητότητας 3.4%.



Σχήμα 4.26: Ανάπτυξη αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων έως τα 2 έτη.

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί και πάλι ότι τα δοκίμια GC ακολούθησαν την κλασική διαδικασία συντήρησης των γεωπολυμερών, δηλαδή είχαν ένα αρχικό στάδιο θερμικής ωρίμανσης στους 70°C για 2 ημέρες και στη συνέχεια αφήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου μέχρι την ηλικία δοκιμής τους. Τα CC συντηρήθηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-2016.

Η συμβατική κατηγορία αντοχής του σκυροδέματος, σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016, προκύπτει από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στην ηλικία των 28 ημερών. Στον Πίνακα 4.6 γίνεται μία προσπάθεια κατηγοριοποίησης των CC και των GC σύμφωνα με την αντοχή τους στις 28 και 7 ημέρες αντίστοιχα. Στα GC επιλέχθηκε η ηλικία των 7 ημερών για το χαρακτηρισμό της συμβατικής αντοχής τους, αφού στη σχετική βιβλιογραφία τότε θεωρείται ότι αποκτούν την τελική τους αντοχή.

Πίνακας 4.6: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σκυροδεμάτων σε ηλικία 28 ημερών για τα συμβατικά (CC) και 7 ημερών για τα γεωπολυμερικά (GC) και κατηγοριοποίηση κατά ΚΤΣ-2016.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
f_{ck} Κύβου (MPa)	28.5	36.6	47.9	33.1	45.3	43.8
Κατηγορία κατά ΚΤΣ-2016	C20/25	C25/30	C35/45	C25/30	C35/45	C30/37

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζεται το επιβατικό μέτρο ελαστικότητας (E_{cm}) των CC και GC όλων των συνθέσεων. Το E_{cm} είναι η κλίση της ευθείας του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στο 40% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (ΕΚΩΣ, 2000). Στον ίδιο πίνακα δίνεται και ο λόγος Poisson (ν) για τις ίδιες συνθέσεις, όπως αυτός προέκυψε από τη Σχέση 4.4.

$$\nu = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

όπου: ε_q = η εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωση
 ε = η διαμήκης ανηγμένη παραμόρφωση.

Πίνακας 4.7: Πειραματικό Μέτρο Ελαστικότητας (E_{cm}) και Λόγος Poisson (ν) των συμβατικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
Πειραματικό E_{cm} (GPa)	29.6	30.2	38.2	14.3	16.1	17.5
Πειραματικός Λόγος Poisson - ν	0.20	0.16	0.18	0.25	0.30	0.27
Κατηγορίας E_{cm} (GPa)	29.0	30.5	33.5	30.5	33.5	32.0

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 4.7, το πειραματικό E_{cm} των CC είναι αντίστοιχο με την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Το πειραματικό E_{cm} όλων των συνθέσεων GC φαίνεται να είναι ακριβώς το μισό από το αντίστοιχο των κατηγοριών που κατατάχθηκαν με βάση τη συμβατική τους αντοχή (Πίνακας 4.6). Αυτό ίσως είναι ένα χαρακτηριστικό το οποίο θα περιορίσει τις χρήσεις των GC στην κατασκευή. Ο λόγος Poisson (ν) των CC είναι εντός των ορίων του ΕΚΩΣ 2000 (0.0 – 0.20 GPa), ενώ των GC φαίνεται ότι είναι λίγο μεγαλύτερος από το όριο αυτό. Αυτό δείχνει ότι η εγκάρσια και η διαμήκης παραμόρφωση των GC έχουν διαφορετική αναλογία από αυτή των CC.

4.2.2.2. Εφελκυστική Αντοχή

Σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ 2000, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (f_{ct}) μπορεί να εκτιμηθεί βάση της χαρακτηριστικής αντοχής του (f_{ck}). Όπως αναφέρεται στον ίδιο κανονισμό, η θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου (f_{cy1}) μπορεί να προκύψει από την αντοχή του κυβικού με τη βοήθεια της Σχέσης 4.5.

$$f_{ck,cyl} = 0.80 \cdot f_{ck,cube} \quad (4.5)$$

όπου: $f_{ck,cube}$ = η θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος (MPa).

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζεται η εκτιμώμενη εφελκυστική αντοχή (f_{ctm}) όλων των συνθέσεων CC και GC, όπως προκύπτει από τη Σχέση 4.6, η οποία δίνεται στον ΕΚΩΣ 2000.

$$f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck,cyl}^{2/3} \quad (4.6)$$

όπου: $f_{ck,cyl}$ = η θλιπτική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος (MPa).

Πίνακας 4.8: Εκτιμώμενη εφελκυστική αντοχή συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος υπολογισμένη σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ 2000 από τη θλιπτική αντοχή κύβου.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
$f_{ck,cube}$ Κύβου (MPa)	28.5	36.6	47.9	33.1	45.3	43.8
Σχέση 4.5 (MPa)	22.8	29.3	38.3	26.5	36.2	34.6
Σχέση 4.6 (MPa)	2.4	2.9	3.4	2.7	3.3	3.2
f_{ctm} κατηγορίας κατά ΕΚΩΣ 2000 (MPa)	2.2	2.6	3.2	2.6	3.2	2.9

- **Δοκιμή κάμψης**

Κατά τη δοκιμή της κάμψης δύο σημείων, εκτός από το φορτίο, καταγραφόταν και το βέλος κάμψης στο μέσο της δοκού. Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζεται το μέγιστο βέλος κάμψης της δοκού όλων των συνθέσεων στο αντίστοιχο μέγιστο φορτίο θραύσης. Παρατηρείται ότι τα CC παρουσίασαν βέλος κάμψης αντίστοιχο με σχετικής έρευνας (Σουλιώτη και Ματίκας, 2008) και μικρότερο από τα GC. Αυτό δείχνει ότι τα GC έχουν μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης από τα CC, κάτι που επιβεβαιώνεται και παραπάνω από τον υπολογισμό του πειραματικού μέτρου ελαστικότητας (E_{cm}).

Πίνακας 4.9: Μέγιστο βέλος κάμψης στο αντίστοιχο μέγιστο φορτίο κατά τη δοκιμή της κάμψης δύο σημείων σε πρισματικά δοκίμια συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
Μέγιστο φορτίο κάμψης (kN)	341.7	373.0	414.4	249.1	259.4	238.7
Μέγιστο βέλος κάμψης (μm)	22.4	15.0	15.0	26.2	19.9	20.0

Στις δοκούς όλων των συνθέσεων, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4.2.2 της παρούσας διατριβής, κατά τη δοκιμή της κάμψης, τοποθετήθηκε ηλεκτρομηκυνσιόμετρο (strain gage) στην εφελκυστική κάτω ίνα της δοκού, έτσι ώστε να μετρηθεί η μέγιστη παραμόρφωσή της. Έτσι λοιπόν, στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζεται η παραμόρφωση αυτή και η αντίστοιχη πειραματική εφελκυστική

αντοχή κάμψης ($f_{ct,fl}$), η οποία προκύπτει με τη βοήθεια της Σχέσης 4.7 (Σωτηροπούλου και Πασσά, 2010).

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (4.7)$$

όπου: F = το μέγιστο φορτίο κάμψης (N)
 L = η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων της δοκού (mm)
 b = το πλάτος της δοκού (mm)
 h = το ύψος της δοκού (mm).

Πίνακας 4.10: Μέγιστη αντοχή σε κάμψη και εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση της κάτω ίνας των πρισματικών δειγμάτων συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
$f_{ct,fl}$ Εφελκυστική αντοχή κάμψης (MPa)	8.0	9.0	9.7	6.2	5.8	5.4
Ανηγμένη παραμόρφωση ε κάτω ίνας δοκού (μm)	190.3	180.7	183.5	276.6	298.0	327.9

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.10 φαίνεται ότι η εφελκυστική αντοχή των CC ίδιας κατηγορίας με τα GC είναι μεγαλύτερη. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι τα GC έχουν μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης σε σχέση με τα CC. Τέλος, παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η εφελκυστική αντοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραμόρφωση, κάτι που ισχύει και για τα CC και για τα GC.

- Δοκιμή Διάρρηξης

Στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζεται η πειραματική εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου ($f_{ct,sp}$) ή αλλιώς αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη που προκύπτει από τη Σχέση 4.8 που ακολουθεί (Μπαδογιάννης et al., 2019).

$$f_{ct,sp} = 2 \cdot \frac{F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (4.8)$$

όπου: F = το μέγιστο φορτίο διάρρηξης (N)
 π = η μαθηματική σταθερά
 d = η διάμετρος του κυλίνδρου (mm)
 L = το μήκος του κυλίνδρου (mm).

Πίνακας 4.11: Μέγιστη εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου ($f_{ct,sp}$) συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
$f_{ct,sp}$ Εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου (MPa)	2.1	3.2	4.1	2.6	2.2	2.5

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο ΕΚΩΣ 2000 στο Κεφ. 2.4, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (f_{ct}) μπορεί να εκτιμηθεί από την αντοχή εφελκυσμού

κάμψης ($f_{ct,fl}$) ή από την εφελκυστική αντοχή διάρρηξης ($f_{ct,sp}$) από τις Σχέσεις 4.9 και 4.10 αντίστοιχα.

$$f_{ct} = 0.50 \cdot f_{ct,fl} \quad (4.9)$$

όπου: $f_{ct,fl}$ = η πειραματική εφελκυστική αντοχή κάμψης δοκού (MPa).

$$f_{ct} = 0.90 \cdot f_{ct,sp} \quad (4.10)$$

όπου: $f_{ct,sp}$ = η πειραματική εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου (MPa).

Στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζεται η εφελκυστική αντοχή f_{ct} όλων των συνθέσεων CC και GC που προέκυψε από τις παραπάνω σχέσεις, καθώς και τα όρια της όπως αυτά παρουσιάζονται στον ΕΚΩΣ 2000.

Πίνακας 4.12: Πειραματική εφελκυστική αντοχή συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος και όρια αντίστοιχης κατηγορίας κατά ΕΚΩΣ 2000.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
Σχέση 4.9 (MPa)	4.0	4.5	4.9	3.1	2.9	2.7
Σχέση 4.10 (MPa)	1.9	2.9	3.7	2.4	2.0	2.3
Σχέση 4.6 (MPa)	2.4	2.9	3.4	2.7	3.3	3.2
Όρια κατηγορίας ΕΚΩΣ 2000 (MPa)	1.5 - 2.9	1.8 - 3.3	2.2 - 4.2	1.8 - 3.3	2.2 - 4.2	2.0 - 3.8

Αρχικά, παρατηρείται ότι, για όλες τις συνθέσεις GC και CC, τα αποτελέσματα της εφελκυστικής αντοχής από τη δοκιμή διάρρηξης διαφοροποιούνται από τα αντίστοιχα της δοκιμής της κάμψης. Επίσης, φαίνεται ότι η f_{ct} από τη διάρρηξη τόσο για τα CC όσο και για τα GC είναι εντός των ορίων του ΕΚΩΣ, ενώ η f_{ct} από την κάμψη είναι εντός των ορίων μόνο για τα GC, αφού για τα CC είναι πάνω από τα όρια. Τέλος, συμπεραίνεται ότι τα όρια που θέτει ο ΕΚΩΣ με βάση την κατηγοριοποίηση από τη δοκιμή της θλίψης για τα CC μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τα GC.

Τέλος, παρατηρώντας συνδυαστικά τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.8 και 4.12, φαίνεται ότι η εξίσωση εκτίμησης της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (Σχέση 4.6) μέσω της θλιπτικής αντοχής λειτουργεί τόσο στα CC όσο και στα GC.

4.2.2.3. Ταχύτητα Μετάδοσης Υπερήχων (UPV)

Η μέθοδος των υπερήχων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ομοιομορφίας ενός στοιχείου, τον εντοπισμό ανωμαλιών (ύπαρξη ρωγμών, κοιλιοτήτων, πάχος στρώματος που έχει υποστεί φθορά), ενώ ύστερα από κατάλληλη βαθμονόμηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος (Σπανός et al., 2006). Από τους τρεις τρόπους εκτέλεσης της δοκιμής για την εκτίμηση της αντοχής, η πιο αποτελεσματική μέθοδος μέτρησης είναι εκείνη

κατά την οποία ο πομπός και ο δέκτης της συσκευής μπαίνουν αντικριστά. Από τη μέθοδο αυτή προκύπτει η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων (UPV) σε km/s με τη βοήθεια της Σχέσης 4.11.

$$UPV = \frac{L}{t} \quad (4.11)$$

όπου: L = η απόσταση αντιδιαμετρικής μέτρησης (mm)

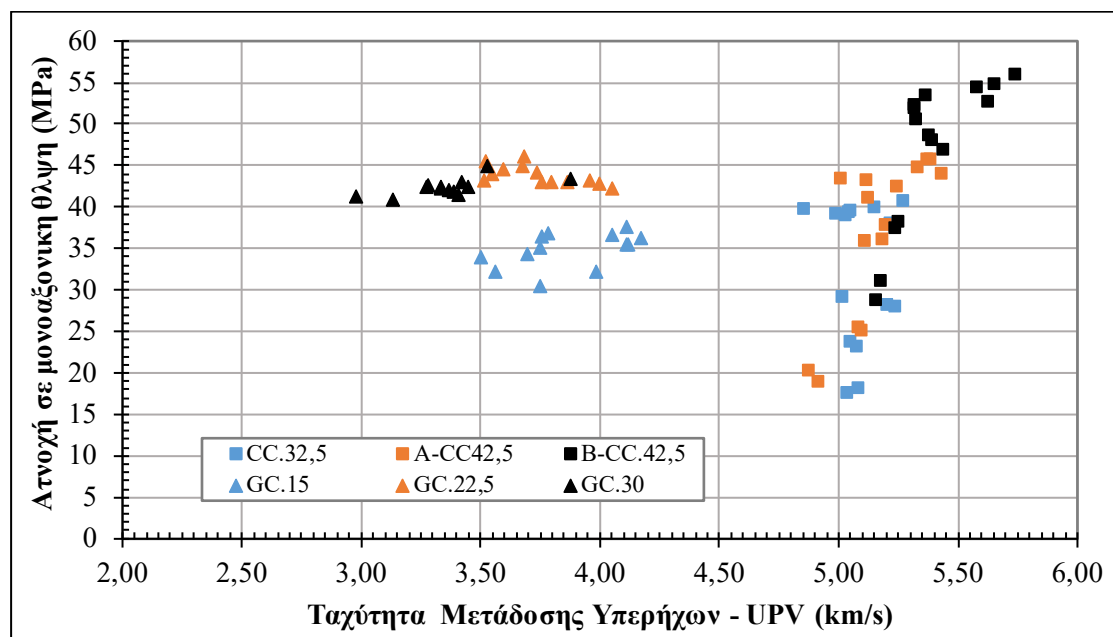
t = ο χρόνος μετάδοσης υπερήχων στην απόσταση L (μs).

Η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρει ότι τα σκυροδέματα κατατάσσονται ποιοτικά αναλόγως την UPV, όπως αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.13 (Farhan et al., 2019).

Πίνακας 4.13: Ποιοτική κατάταξη σκυροδεμάτων με βάση την ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων (UPV) (Farhan et al., 2019).

Κατηγορία Ποιότητας	Απόμειξη - Ρωγμές	Κακή	Μέτρια	Καλή	Εξαιρετική
Όρια (km/s)	< 2.00	2.00 – 2.50	2.50 – 3.50	3.50 – 4.00	> 4.00

Στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η συσχέτιση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και της ταχύτητας μετάδοσης υπερήχων (UPV) των CC και των GC για όλες τις ηλικίες. Αυτό που εύκολα γίνεται αντιληπτό είναι ότι δημιουργείται μια ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων των GC και μια των CC σε διαφορετικές περιοχές. Επίσης, σύμφωνα με τον πίνακα ποιοτικής κατάταξη σκυροδεμάτων (Πίνακα 4.13) και το Σχήμα 4.27, η ποιότητα των CC κατατάσσεται ως εξαιρετική, ενώ των GC από μέτρια έως καλή. Έτσι, συμπεραίνεται ότι θα πρέπει να φτιαχτεί ένας ξεχωριστός πίνακας ποιοτικής κατάταξης για τα GC, αφού όπως φάνηκε από την αντοχή τους στη μονοαξονική θλίψη θα έπρεπε να κατατάσσονται ως εξαιρετικά.



Σχήμα 4.27: Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και ταχύτητας μετάδοσης υπερήχων (UPV) συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.

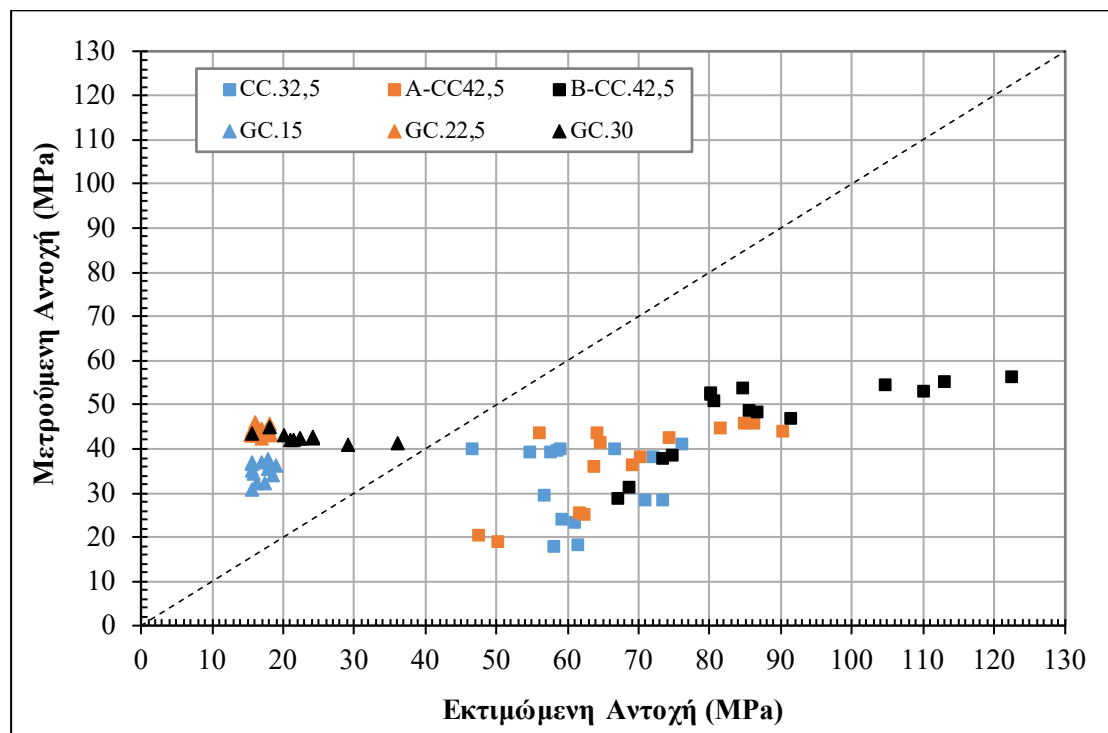
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, από την UPV μπορεί να υπολογιστεί και η εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εξισώσεις που βοηθούν στην εκτίμηση της αντοχής, με επικρατέστερη την εξίσωση που παρουσιάζεται στη Σχέση 4.12 (Τρέζος et al., 1993).

$$f'_c = 29 \cdot UPV^2 - 221.7 \cdot UPV + 439.2 \quad (4.12)$$

όπου: UPV = η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων (km/s).

Στο Σχήμα 4.28 παρουσιάζεται η σχέση μετρούμενης πειραματικής θλιπτικής αντοχής και εκτιμώμενης θλιπτικής αντοχής μέσω της UPV όλων των συνθέσεων CC και GC για όλες τις ηλικίες. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των GC είναι ομαδοποιημένα σε μία περιοχή διαφορετική από τα CC . Τα αποτελέσματα των GC βρίσκονται πάνω από την ευθεία αντιστοιχίας τιμών πειραματικής και εκτιμώμενης αντοχής, όπου αυτό σημαίνει ότι η εξίσωση υποεκτιμάει τις πραγματικές αντοχές. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα των CC βρίσκονται κάτω από την καμπύλη αντιστοιχίας, όπου αυτό σημαίνει ότι υπερεκτιμάει τις πραγματικές αντοχές.

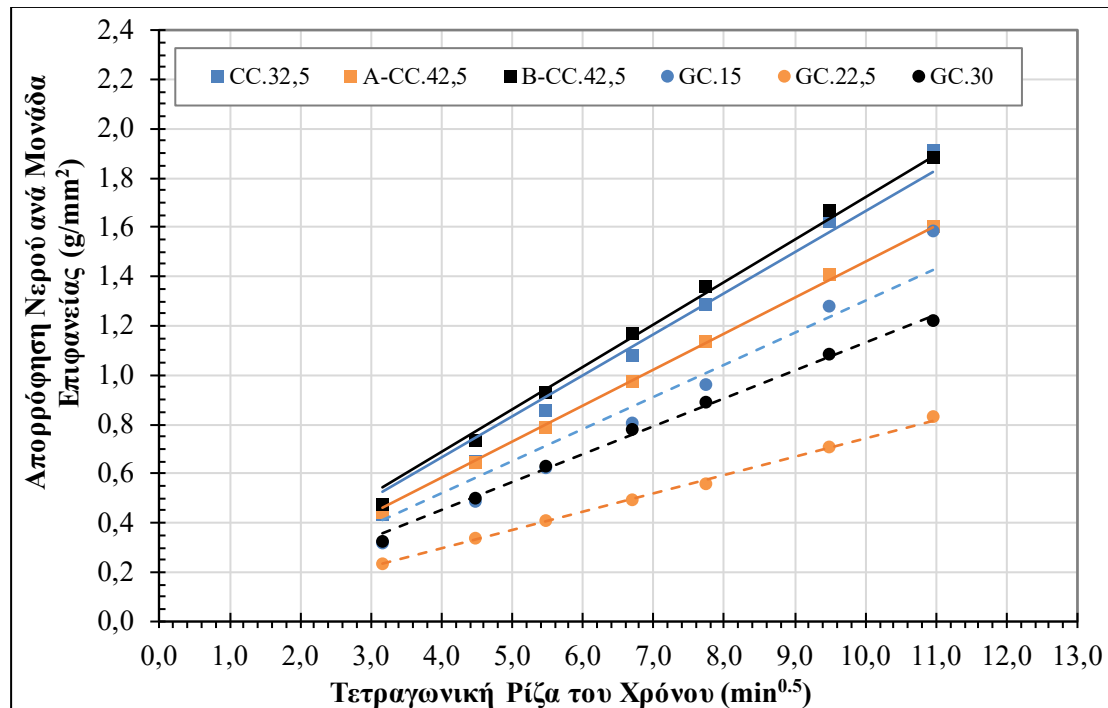
Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ηλικία και η υγρασία των δοκιμών σκυροδέματος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην UPV , με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να επηρεάζονται και πολλές φορές ο υπολογισμός της εκτιμώμενης f'_c να χρειάζεται συντελεστές διόρθωσης, οι οποίοι εδώ δεν έχουν χρησιμοποιηθεί (Σπανός et al., 2006).



Σχήμα 4.28: Σχέση μετρούμενης θλιπτικής αντοχής και εκτιμώμενης μέσω UPV συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.

4.2.2.4. Υδατοαπορροφητικότητα

Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζεται η συσχέτιση απορρόφησης νερού ανά μονάδα επιφάνειας και του χρόνου απορρόφησης αυτού στα δοκίμια των CC και GC, όπως προέκυψαν από τη Σχέση 4.1 που δίνεται στην Ενότητα 4.1.2.2 της παρούσας διατριβής.



Σχήμα 4.29: Απορρόφηση νερού ανά μονάδα επιφάνειας συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων ως προς την τετραγωνική ρίζα του χρόνου.

Από τα παραπάνω προκύπτει ο Πίνακας 4.14, στον οποίο παρουσιάζεται για κάθε σύνθεση η κλίση της συνάρτησης $i = f(t^{0.5})$ με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης. Αυτό που παρατηρείται αρχικά είναι ότι η υδατοαπορροφητικότητα των CC βρίσκεται κοντά στις μετρήσεις που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Neville, 2012). Επίσης, τα αποτελέσματα των GC σε συνδυασμό με αυτά των GFA, δείχνουν να επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα σχετικής διδακτορικής διατριβής, όπου χαρακτηριστικά αναφέρει ότι η προσθήκη των αδρανών φαίνεται να μειώνει τη διαπερατότητα των γεωπολυμερών (Ασπρογέρακας, 2013). Τέλος, παρατηρείται ότι η υδατοαπορροφητικότητα των GC είναι μικρότερη από των CC, άρα συμπεραίνεται ότι τα GC έχουν καλύτερη συμπεριφορά ως προς τη δοκιμή αυτή.

Πίνακας 4.14: Υδατοαπορροφητικότητα συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
Υδατοαπορροφητικότητα (mm/min ^{0.5})	0.169	0.145	0.170	0.139	0.076	0.111

4.2.2.5. Ανοιχτό Πορώδες

Στον Πίνακα 4.15 παρουσιάζεται το ανοιχτό πορώδες (Ab) κάθε σύνθεσης CC και GC, το οποίο υπολογίστηκε έμμεσα με τη βοήθεια της Σχέσης 4.13 (ASTM C642).

$$Ab = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 100\% \quad (4.13)$$

όπου: m_1 = η ξηρή μάζα του δείγματος (kg)
 m_2 = κορεσμένη μάζα του δείγματος (kg)
 V = ο όγκος του δείγματος (m^3).

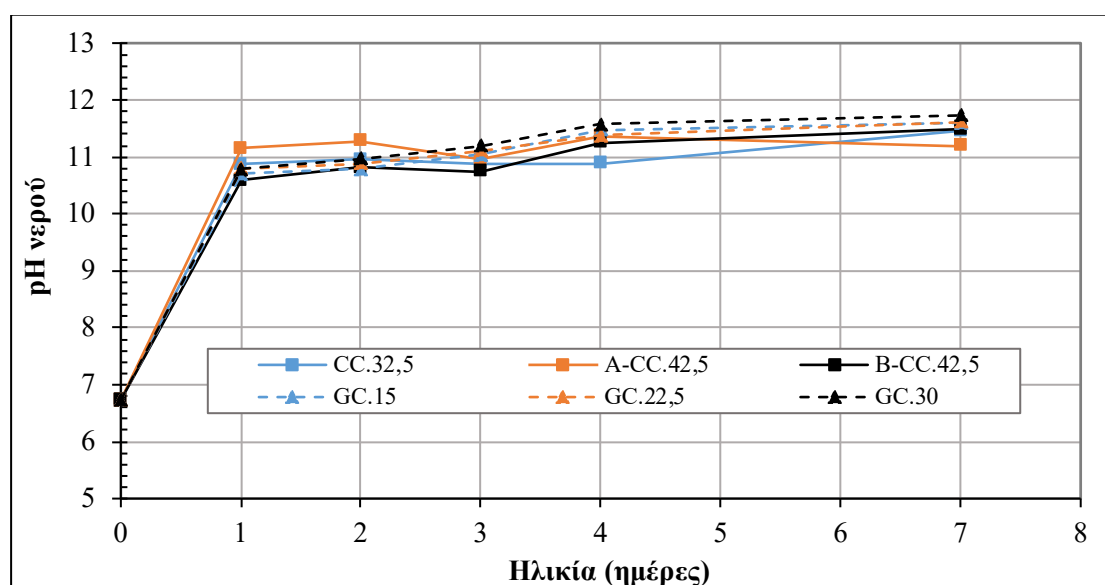
Πίνακας 4.15: Ανοιχτό πορώδες συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
Ανοιχτό Πορώδες (%)	15.0	14.8	13.6	19.5	22.8	25.9

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.15 εύκολα διακρίνεται ότι το ανοιχτό πορώδες των GC είναι μεγαλύτερο από αυτό των CC. Επίσης, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα IT στα GC, τόσο αυξάνεται και το ανοιχτό πορώδες.

- Μέτρηση pH

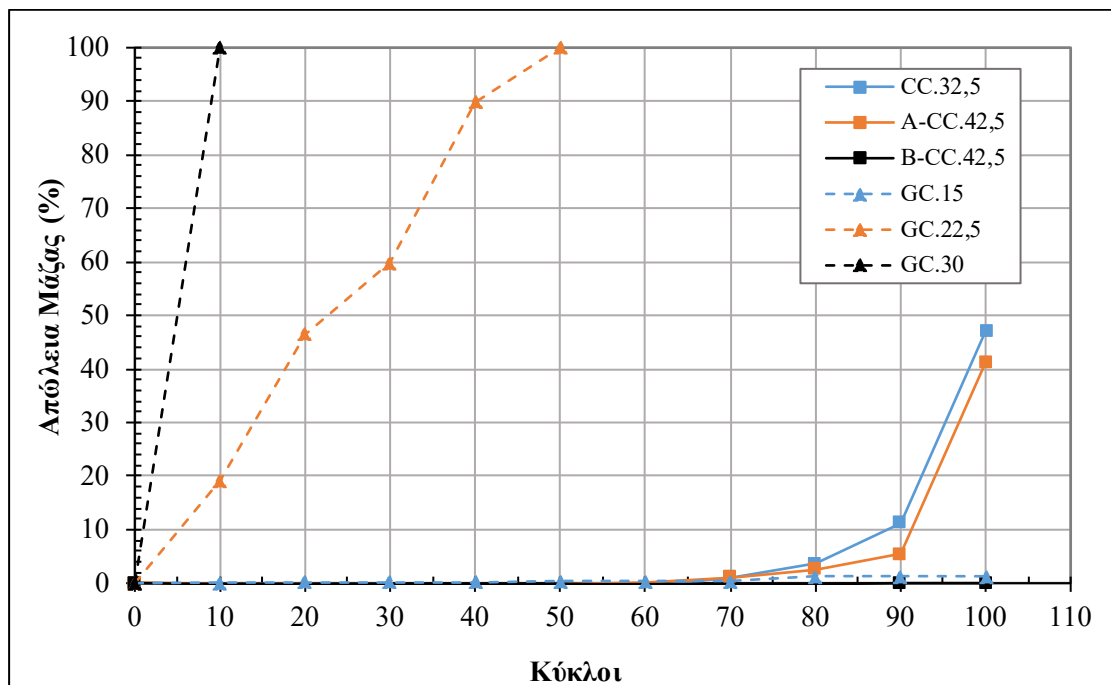
Στο Σχήμα 4.30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του pH του νερού που ήταν βυθισμένα τα δοκίμια. Υπενθυμίζεται ότι το νερό αρχικά είχε ουδέτερο pH και η κάθε σύνθεση ήταν σε ξεχωριστό δοχείο. Παρατηρείται ότι όλες οι συνθέσεις των CC και των GC έφτασαν το pH λίγο πάνω από τις 11 μονάδες στον ίδιο ακριβώς χρόνο, όπου και παρέμεινε σε όλες αμετάβλητο. Το σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα αυτά είναι ότι στο GC θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και οπλισμός, αφού το αλκαλικό περιβάλλον που θα εγκιβωτιστεί ο χάλυβας δε θα το διαβρώνει.



Σχήμα 4.30: Μέτρηση pH στο νερό κορεσμού του συμβατικού (CC) και του γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.

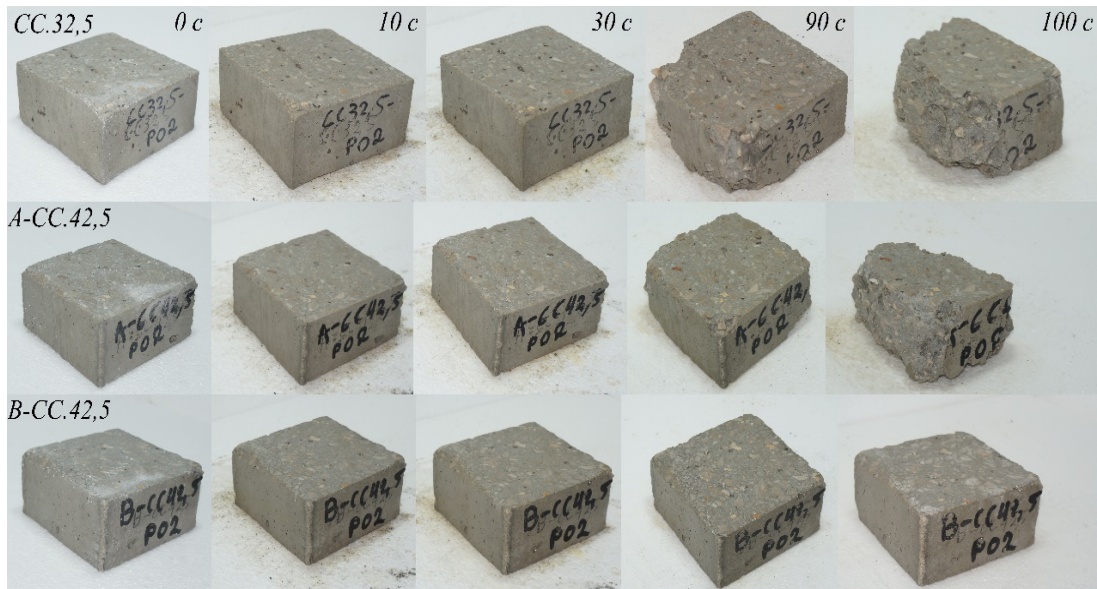
4.2.2.6. Ανθεκτικότητα σε Κύκλους Ψύξης – Απόψυξης

Στο Σχήμα 4.31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής ανθεκτικότητας σε κύκλους ψύξης – απόψυξης και εμφανίζουν την επί τοις εκατό απώλεια της μάζας των δειγμάτων όλων των συνθέσεων. Το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα GC.30, με την περισσότερη περιεκτικότητα σε ΙΤ, στους 10 μόλις κύκλους υπέστη ολική καταστροφή. Η σύνθεση GC.22,5, η αμέσως επόμενη σε περιεκτικότητα ΙΤ, καταστράφηκε πλήρως στους 50 κύκλους. Το GC.15 ολοκλήρωσε τη δοκιμή χωρίς απώλεια μάζας. Από την άλλη πλευρά, τα CC είχαν καλύτερη συμπεριφορά, με τη σύνθεση B-CC.42,5 να μην έχει απώλεια μάζας με το πέρας της δοκιμής. Οι συνθέσεις CC.32,5 και A-CC.42,5 στους 80 κύκλους εμφάνισαν την πρώτη απώλεια μάζας και στους 100 κύκλους, που ολοκληρώθηκε η δοκιμή, είχαν απώλεια μάζας 47% και 41%, αντίστοιχα. Τα CC είχαν την αναμενόμενη συμπεριφορά, αφού το B-CC.42,5 με ενεργό λόγο $N/T=0.52$ και τιμέντο 330 kg/m^3 , σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016, είναι ιδανικό προς χρήση σε συνθήκες ψύξης – απόψυξης, καλύπτοντας τις απαιτήσεις και των τεσσάρων κατηγοριών XF. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω είναι ότι μπορεί να υπάρξει GC ανθεκτικό σε συνθήκες ψύξης – απόψυξης και ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ΙΤ τόσο μειώνεται η ανθεκτικότητά του.

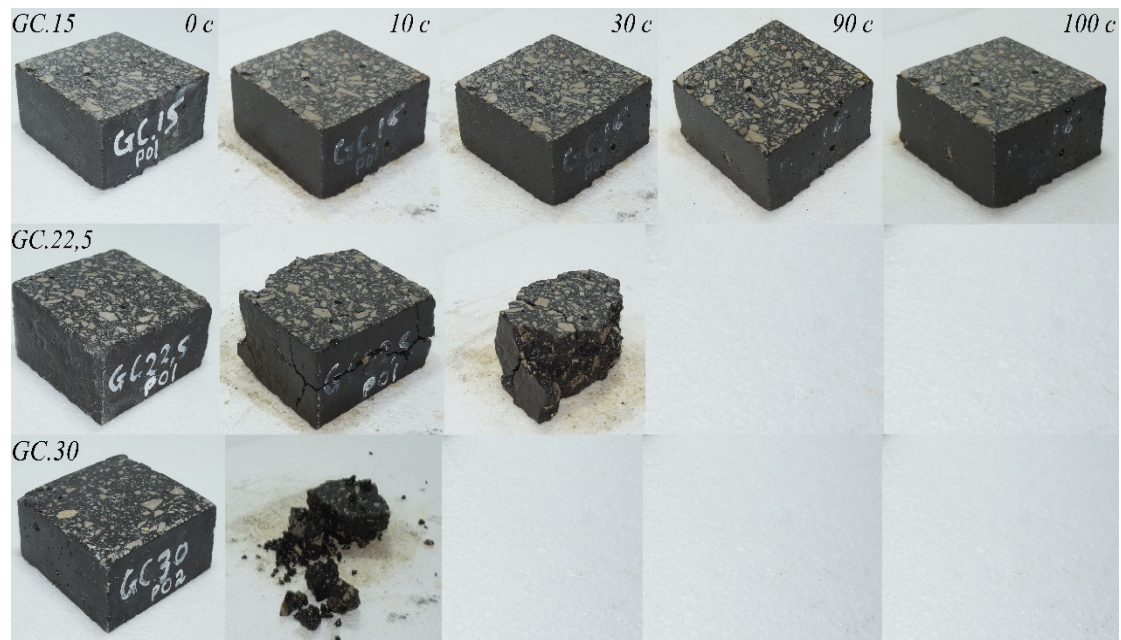


Σχήμα 4.31: Απώλειας μάζας σε κύκλους ψύξης – απόψυξης των συνθέσεων συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.

Στα Σχήματα 4.32 και 4.33 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά δοκίμια όλων των συνθέσεων CC και GC, αντίστοιχα, σε διάφορες κρίσιμες φάσεις κατά την εξέλιξη της δοκιμής ανθεκτικότητας σε κύκλους ψύξης – απόψυξης. Έτσι λοιπόν, φαίνεται και μακροσκοπικά η απώλεια μάζας που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.31, αφού διακρίνονται, όπου υπήρχαν, οι φθορές και η πλήρης καταστροφή των δοκιμίων των αντίστοιχων συνθέσεων.



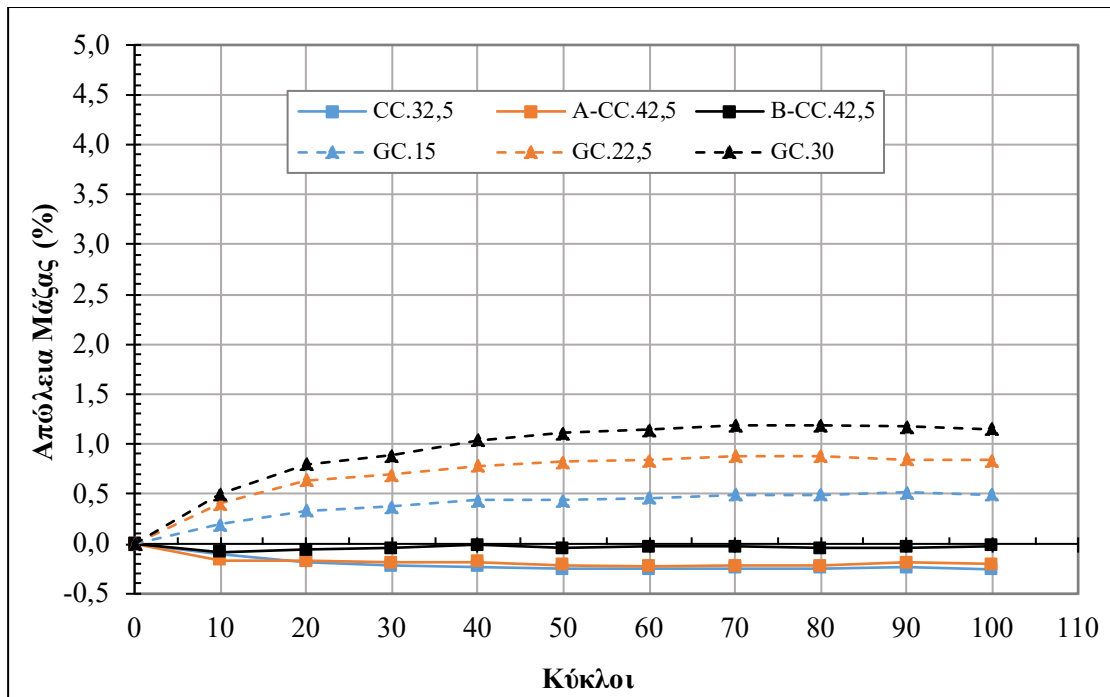
Σχήμα 4.32: Δοκίμια συμβατικών σκυροδεμάτων (CC) κατά τη δοκιμή ανθεκτικότητας σε ψύξη – απόψυξη σε διάφορες φάσεις, μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής στους 100 κύκλους (c).



Σχήμα 4.33: Δοκίμια γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) κατά τη δοκιμή ανθεκτικότητας σε ψύξη – απόψυξη σε διάφορες φάσεις, μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής στους 100 κύκλους (c).

4.2.2.7. Ανθεκτικότητα σε Κύκλους Ξήρανσης – Εμβάπτισης

Τα αποτελέσματα της δοκιμής ανθεκτικότητας σε κύκλους ξήρανσης – εμβάπτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.34. Όπως φαίνεται, οι συνθέσεις των GC είχαν μία αμελητέα απώλεια μάζας από 0.5% έως 1.2% (GC.30), ενώ τα CC φαίνεται να είχαν μια μικρή αύξηση μάζας (0.2%).



Σχήμα 4.34: Απώλεια μάζας σε κύκλους ξήρανσης – εμφύσησης των συνθέσεων συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος.

4.2.2.8. Μέτρηση Διάχυσης Χλωριόντων

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην Ενότητα 3.4.2.2 της παρούσας διατριβής, ο προσδιορισμός των συνολικών χλωριόντων στα διάφορα βάθη (0-3 mm, 3-6 mm, 6-9 mm, 9-12 mm, 12-15 mm, 15-18 mm, 18-21 mm, 21-24 mm, 24-27 mm, 27-30 mm) των GC και CC μετά από την παραμονή τους για τρεις μήνες στο διάλυμα NaCl, πραγματοποιήθηκε με βάση το ΕΛΟΤ EN 196-2 και με τη βοήθεια της Σχέσης 4.14 (Ασπρογέρακας, 2013).

$$\%Cl^- = \Delta V \cdot 0.01 \cdot \left(\frac{MB_{Cl}}{m_i} \right) \quad (4.14)$$

όπου: ΔV = η διαφορά όγκου διαλυμάτων Νιτρικού Αργύρου και Θειοκυανιούχου Αμμώνιου (mL)

$MB_{Cl} = 35.5$ (g)

m_i = η μάζα της σκόνης δείγματος από το κάθε βάθος (g).

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του 2^{ου} νόμου του Fick, ο οποίος διέπει το φαινόμενο της μεταφοράς μάζας λόγω διάχυσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων στα δοκίμια σκυροδέματος όλων των συνθέσεων CC και GC.

Για συνθήκες μη μόνιμης κατάστασης και μονοαξονικής ροής κατά την κατεύθυνση x, ο 2^{ος} νόμος του Fick παρουσιάζεται στη Σχέση 4.15.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (4.15)$$

όπου: C = η περιεκτικότητα σε Cl^- σε βάθος x μετά από το χρόνο t.

Η λύση του προβλήματος οριακών τιμών που παρουσιάζεται στη Σχέση 4.16, προκύπτει θεωρώντας ότι ο συντελεστής διάχυσης (D) παραμένει σταθερός, καθώς και τις οριακές συνθήκες:

- Αρχική συνθήκη: $C_{(x,t)} = x > 0$
- Οριακή συνθήκη: $C_{(0,t)} = C_s \cdot t \geq 0$

$$C_{(x,t)} = C_s \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \cdot \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \quad (4.16)$$

όπου: $C(x,t)$ = η περιεκτικότητα σε Cl^- σε βάθος x , μετά από χρόνο t (%)

C_s = η περιεκτικότητα σε Cl^- στην επιφάνεια του δοκιμίου (%)

x = το βάθος (m)

D = ο συντελεστής διάχυσης (m^2/s)

erf = η συνάρτηση σφάλματος (error function)

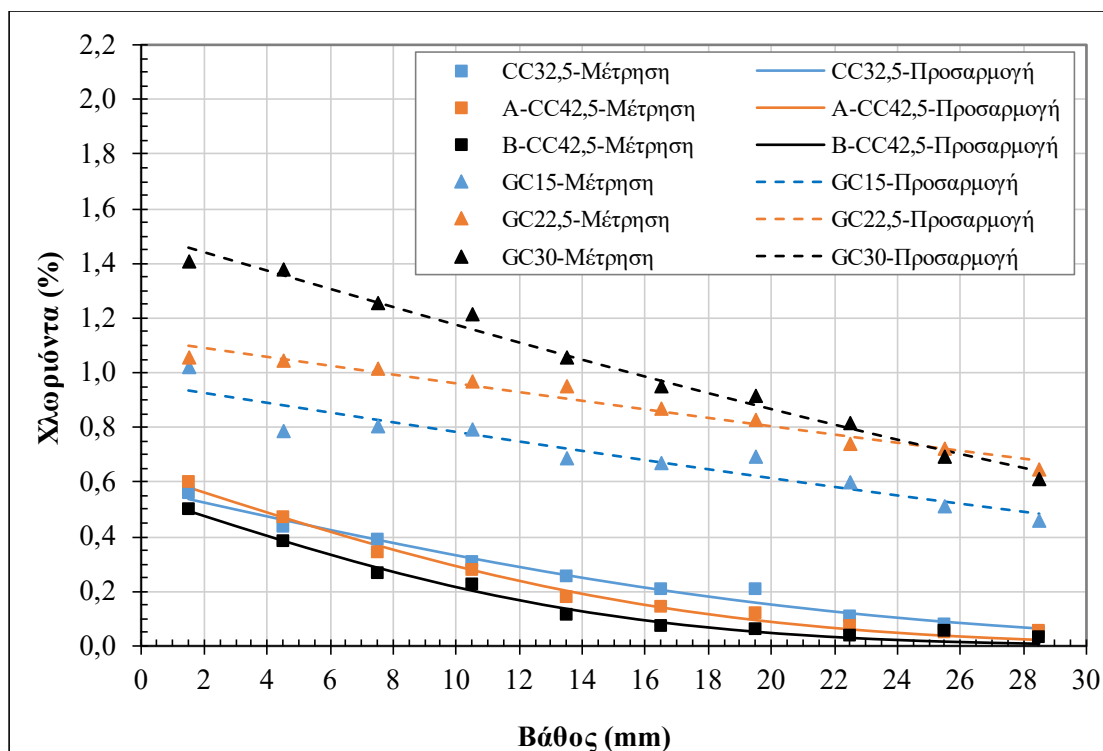
t = ο χρόνος συντήρησης του δοκιμίου στο διάλυμα NaCl (s).

Στον Πίνακα 4.16 παρουσιάζεται ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων (D) για κάθε σύνθεση CC και GC μετά την παραμονή των δοκιμίων 3 μήνες στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου (16.5% w/w).

Πίνακας 4.16: Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων σε συμβατικά (CC) και γεωπολυμερικά (GC) σκυροδέματα.

Σύνθεση	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D ($\cdot 10^{-11} m^2/s$)	5.28	3.01	2.25	29.94	49.89	21.00

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στο Σχήμα 4.35 παρουσιάζονται, σε διάφορα βάθη για όλες τις συνθέσεις CC και GC, η μετρούμενη περιεκτικότητα χλωριόντων στο δείγμα και η προσαρμοσμένη με την εφαρμογή του νόμου του Fick. Τα GC φαίνεται να έχουν πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση σε συνολικά χλωριόντα από τα CC, κάτι το οποίο σε συνδυασμό με το ανοιχτό πορώδες και την υδατοαπορροφητικότητα, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, να είναι αναμενόμενο. Τέλος, συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της IT στη σύνθεση των GC, τόσο αυξάνεται και η συγκέντρωση σε συνολικά χλωριόντα, κάτι στο οποίο συμφωνεί και η σχετική βιβλιογραφία (Απρογέρακας, 2013).



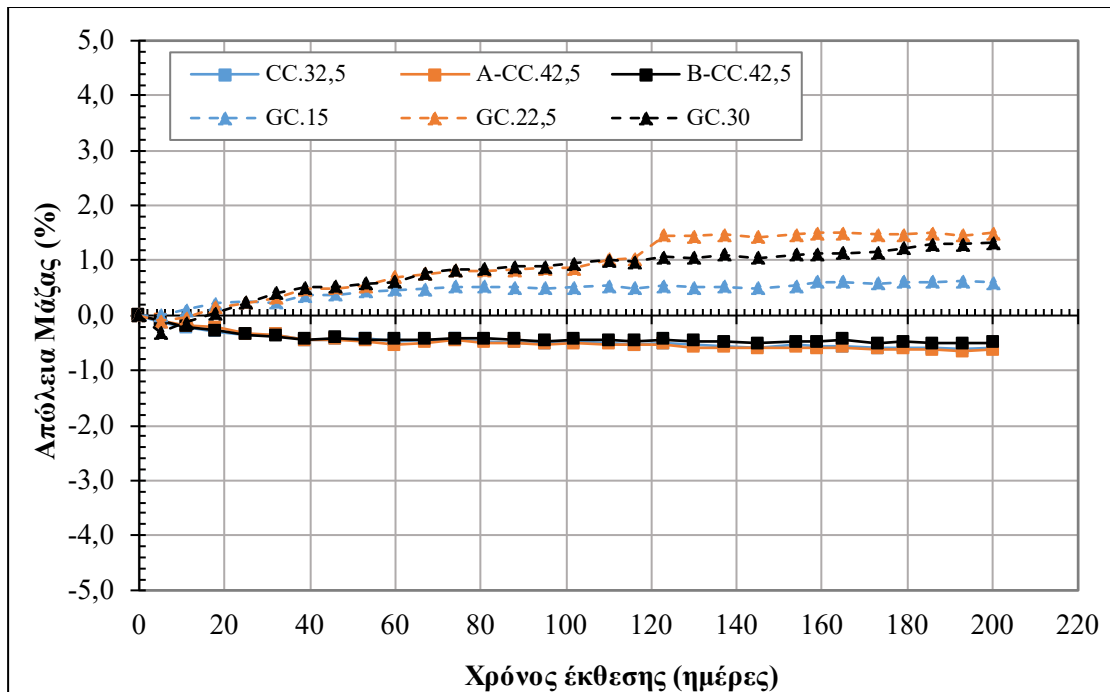
Σχήμα 4.35: Συνολικά χλωριόντα (%) συμβατικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων σε συνάρτηση του μέσου βάθους και προσαρμογή στο 2^ο νόμο του Fick.

4.2.2.9. Ανθεκτικότητα σε Διαβρωτικό Περιβάλλον

Τα διαβρωτικά περιβάλλοντα που επιλέχθηκαν να εκτεθούν τα GC και τα CC ήταν σε θεικά ιόντα δύο διαφορετικών θερμοκρασιών, 5°C και 20°C, καθώς και σε οξέα, θεικό και οξικό.

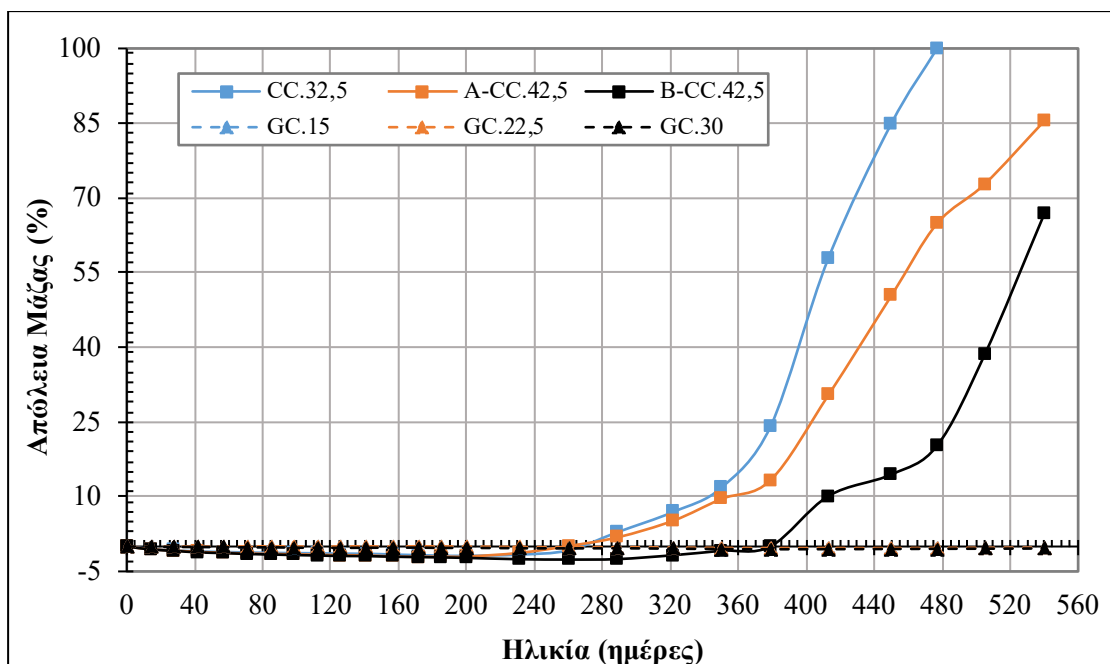
- Ανθεκτικότητα σε Περιβάλλον Θεικών Ιόντων

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής έκθεσης των σκυροδεμάτων στο διάλυμα θεικού μαγνησίου στους 20°C, φάνηκε τα δείγματα να μην έχουν κάποια απώλεια μάζας μέχρι τις 200 μέρες έκθεσης τους, κάτι το οποίο αποτυπώνεται και στο Σχήμα 4.36, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής. Πιο συγκεκριμένα, τα GC έχουν μια αμελητέα απώλεια μάζας, κάτω από 1.5% τα GC.22,5 και GC.30 και μόλις 0.5% το GC.15. Από την άλλη πλευρά, τα CC εμφάνισαν μία αύξηση της μάζας τους της τάξης του 0.5%, η οποία θα μπορούσε να αποδοθεί στον πιθανό σχηματισμό γύψου ή ετρινγκίτη στο επιφανειακό πορώδες των δειγμάτων. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει η βιβλιογραφία, το θεικό μαγνήσιο προσβάλλει το υδροξείδιο του ασβεστίου προς σχηματισμό γύψου, ενώ το θεικό μαγνήσιο αντιδρά, επίσης, με το ένυδρο αργιλικό ασβέστιο προς σχηματισμό ετρινγκίτη (Ασπρογέρακας, 2013). Εναλλακτικά η αύξηση της μάζας μπορεί να αποδοθεί στην πρόοδο της ενυδάτωσης. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι μακροσκοπικά δεν παρατηρήθηκε φθορά των δοκιμίων τόσο των CC όσο και των GC.



Σχήμα 4.36: Απόλεια μάζας συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος εκτεθειμένου σε περιβάλλον θεικών ιόντων σε θερμοκρασία 20°C.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής με θερμοκρασία του διαλύματος θεικών ιόντων στους 5°C, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.37, η οποία πραγματοποιήθηκε για 540 ημέρες (18 μήνες) και όχι για 200, όπως η αντίστοιχη στους 20°C. Στις 200 ημέρες διαπιστώθηκε μια μικρή αύξηση της μάζας (2.0%) των δοκιμίων των συνθέσεων CC και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα σχετικής έρευνας (Σκαροπούλου, 2009) αποφασίστηκε η παράταση της δοκιμής.

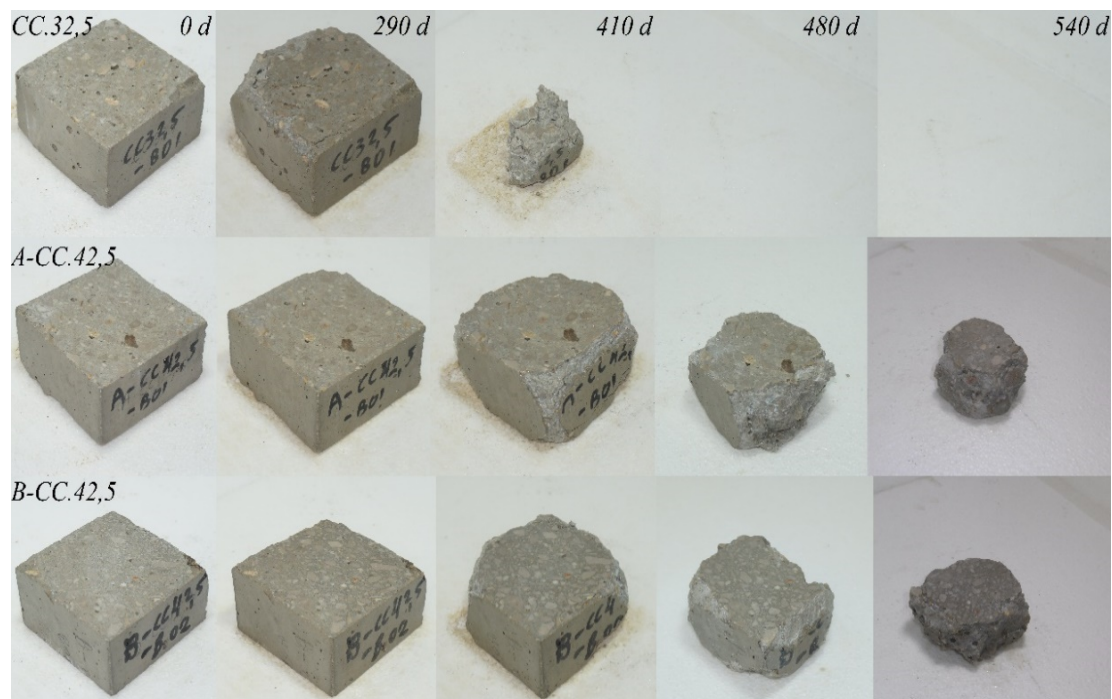


Σχήμα 4.37: Απόλεια μάζας συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος εκτεθειμένου σε περιβάλλον θεικών ιόντων σε θερμοκρασία 5°C.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.37, οι συνθέσεις του GC δεν παρουσίασαν κάποια φθορά, σε αντίθεση με τις συνθέσεις του CC. Πιο συγκεκριμένα τα CC, περίπου από τις 30-35 ημέρες, παρουσίασαν μία αύξηση της μάζας τους. Οι πρώτες φθορές στις συνθέσεις CC.32,5 και A-CC.32,5 άρχισαν να κάνουν την εμφάνιση τους στην ηλικία περίπου των 290 ημερών. Η σύνθεση B-CC.42,5 παρουσίασε τις πρώτες φθορές λίγο μετά τις 400 ημέρες. Η ολική κατάρρευση του CC.32,5 έγινε στις 480 ημέρες, ενώ στο πέρας της δοκιμής (540 ημέρες) το A-CC.42,5 είχε απώλεια μάζας πάνω από 85% και το B-CC.42,5 πάνω από 65%.

Η διόγκωση και εν συνεχεία η απώλεια μάζας των CC αποδίδεται, με βάση τη βιβλιογραφία, στην εμφάνιση ταουμασίτη στο πορώδες των δειγμάτων (Σκαροπούλου, 2009). Το σημαντικό συμπέρασμα της δοκιμής αυτής είναι ότι τα GC έχουν όχι απλά καλύτερη συμπεριφορά από τα CC, αλλά εμφανίζονται πλήρως ανθεκτικά σε προσβολή από θειικά ιόντα σε χαμηλή θερμοκρασία.

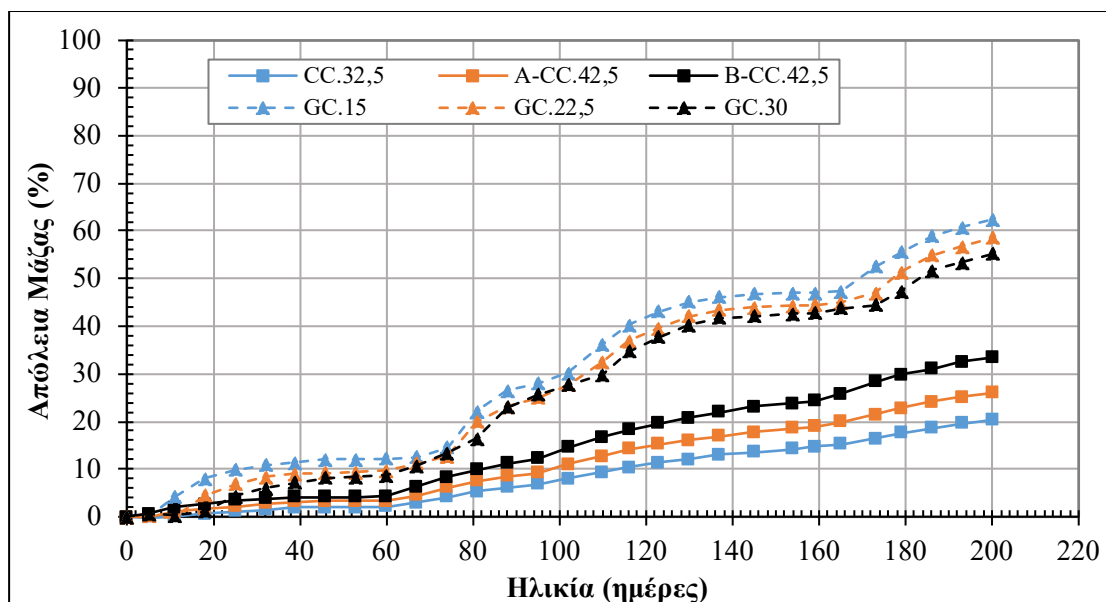
Στο Σχήμα 4.38 παρουσιάζονται δείγματα όλων των συνθέσεων CC στις κρίσιμες ηλικίες της δοκιμής, όπου αντικατοπτρίζεται πλήρως η εξέλιξή της.



Σχήμα 4.38: Εξέλιξη απώλειας μάζας των συμβατικών σκυροδεμάτων (CC) κατά τη δοκιμή ανθεκτικότητας σε περιβάλλον θεικών ιόντων σε θερμοκρασία 5°C.

- Ανθεκτικότητα σε Θεικό Οξύ

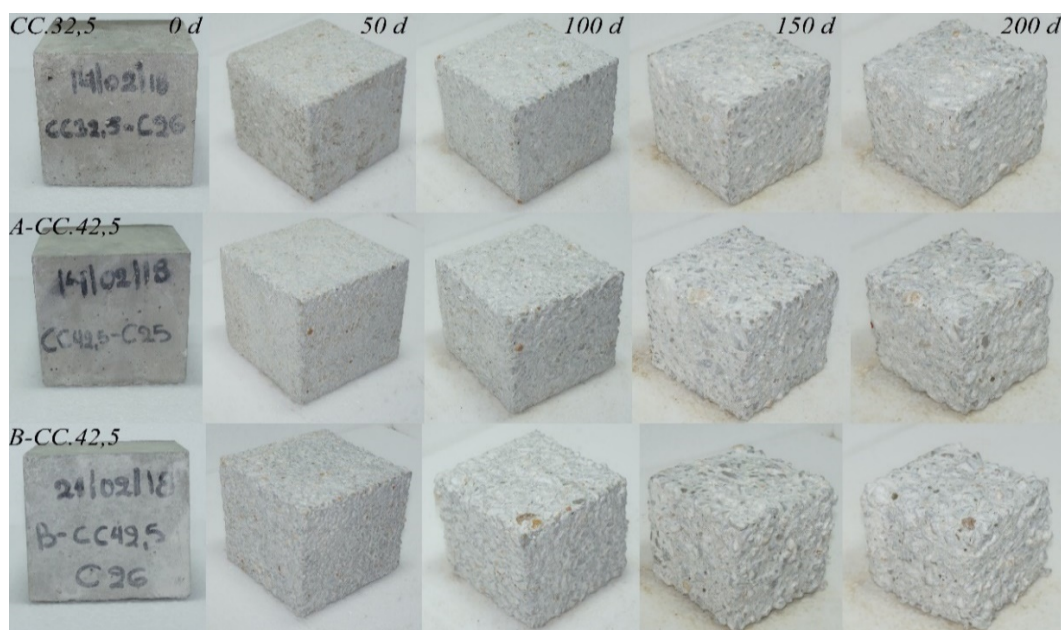
Το Σχήμα 4.39 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής έκθεσης όλων των συνθέσεων CC και GC σε διάλυμα θεικού οξέος. Ένα «σκαλοπάτι» που εμφανίζεται στις καμπύλες φθοράς κάθε περίπου 30 ημέρες είναι το σημείο όπου γινόταν αντικατάσταση του διαλύματος έκθεσης των σκυροδεμάτων με νέο.



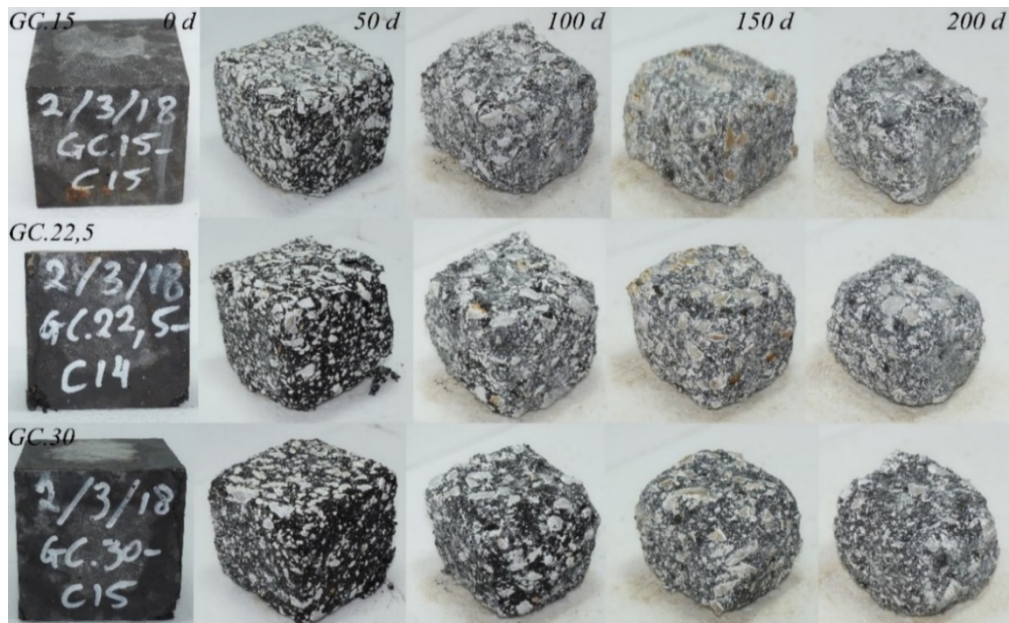
Σχήμα 4.39: Απόλεια μάζας συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος εκτεθειμένου σε περιβάλλον θεικού οξέος.

Στις 200 ημέρες που διήρκησε η δοκιμή, οι συνθέσεις των CC εμφάνισαν απώλεια μάζας περίπου 20-35% με το B-CC.42,5 να έχει τη χειρότερη και το CC.32,5 την καλύτερη συμπεριφορά. Οι συνθέσεις των GC εμφάνισαν φθορά 55-65%, με το GC.30 να έχει τη χειρότερη συμπεριφορά και το GC.15 την καλύτερη. Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση της περιεκτικότητας της IT στη σύνθεση των GC συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα προσβολής από θεικά οξέα.

Στα Σχήματα 4.40 και 4.41 παρουσιάζονται οι φθορές των δειγμάτων CC και GC, αντίστοιχα, κατά την εξέλιξη της δοκιμής. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα CC έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τα GC όταν εκτεθούν σε θειικό οξύ.



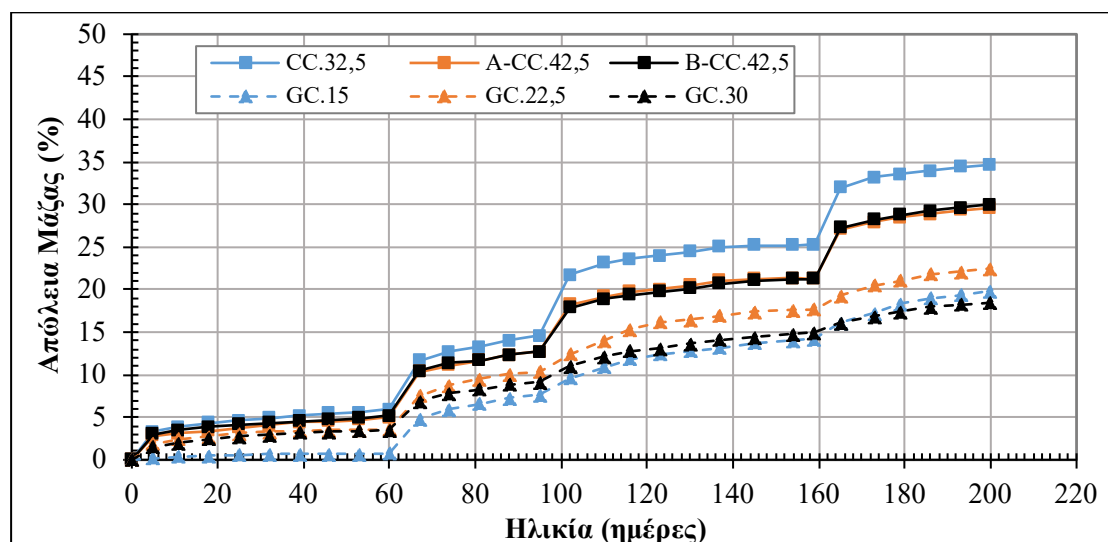
Σχήμα 4.40: Εξέλιξη απώλειας μάζας των συμβατικών σκυροδεμάτων (CC) κατά τη έκθεσή τους σε διάλυμα θεικού οξέος έως τις 200 ημέρες (d).



Σχήμα 4.41: Εξέλιξη απώλειας μάζας των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) κατά τη έκθεσή τους σε διάλυμα θεικού οξέος έως τις 200 ημέρες (d).

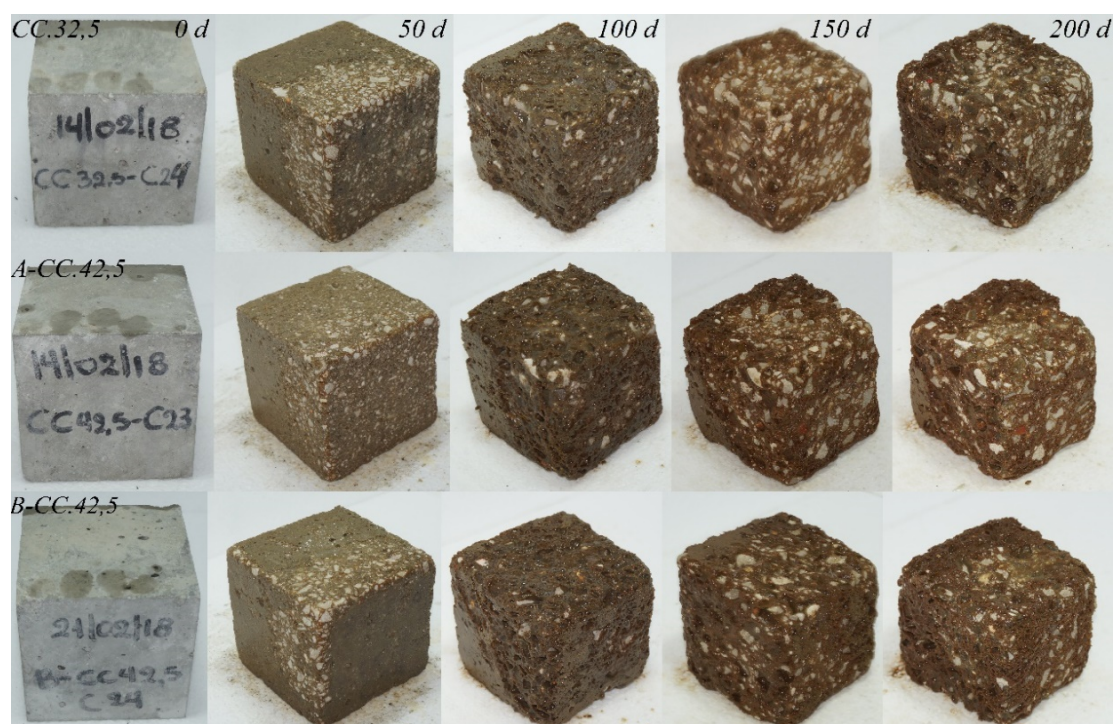
- Ανθεκτικότητα σε οξικό οξύ

Η απώλεια μάζας όλων των συνθέσεων CC και GC κατά την έκθεσή τους σε οξικό οξύ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.42. Τα «σκαλοπάτια» που εμφανίζονται στις καμπύλες του διαγράμματος και σε αυτή τη δοκιμή κάθε περίπου 30 ημέρες, οφείλονται επίσης στην αντικατάσταση του διαλύματος από νέο. Η τελική φθορά που παρουσίασαν τα CC στις 200 ημέρες ήταν 35% για τη σύνθεση CC.32,5 και 30% για τις συνθέσεις A-CC.42,5 και B-CC.42,5. Από την άλλη πλευρά, στα GC, η φθορά στις συνθέσεις GC.15, GC.22,5 και GC.30 ήταν 18%, 19% και 23% αντίστοιχα. Όσο αφορά τα GC, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε IT φαίνεται να μην παίζει και τόσο σημαντικό ρόλο στην προσβολή από οξικό οξύ, αφού η φθορά των δειγμάτων όλων των συνθέσεων κυμάνθηκε σχεδόν στα ίδια πλαίσια, γύρω στο 20%.

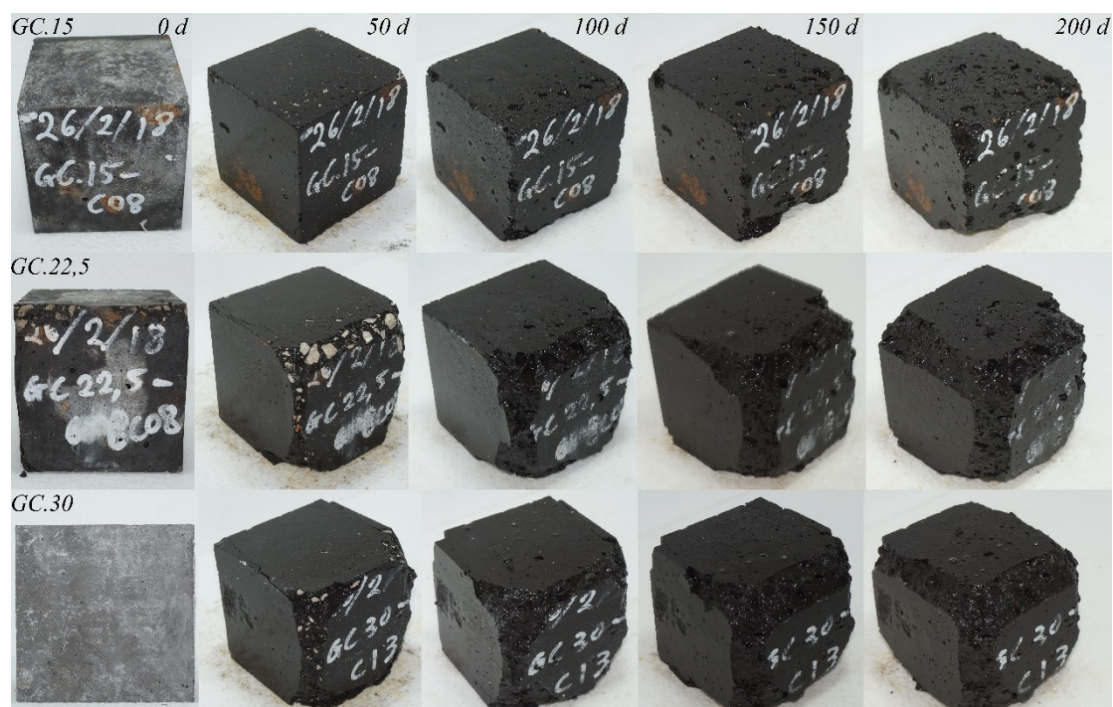


Σχήμα 4.42: Απόλεια μάζας συμβατικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος εκτεθειμένου σε περιβάλλον οξικού οξέος.

Στο Σχήμα 4.43 γίνεται απεικόνιση των δειγμάτων των CC κατά την έκθεση τους σε διάλυμα οξικού οξέος και στο Σχήμα 4.44 των GC σε διάφορες ηλικίες. Στα CC παρατηρείται ότι πλέον της απώλειας στη μάζα τους, είχαν και μία έντονη χρωματική αλλαγή που τείνει προς το χρώμα του διαλύματος. Η χρωματική αλλαγή αυτή οφείλεται στην αντίδραση του οξικού οξέος με το υδροξείδιο του ασβεστίου του νερού των πόρων του σκυροδέματος (Witkowska-Dobrev et al., 2021). Στην οπτική επιθεώρηση στα GC αρχικά φαίνεται ότι τα δείγματα παρουσίασαν φθορές, όμως με μια πιο προσεκτική παρατήρηση γίνεται αντιληπτό ότι η απώλεια της μάζας και του σχήματός τους οφείλεται κυρίως στη διάβρωση και εν τέλει πλήρη απώλεια των αδρανών υλικών και όχι τόσο στη γεωπολυμερική πάστα. Πολύ έντονη απεικόνιση αυτής της απώλειας φαίνεται στη σύνθεση GC.22,5 μεταξύ των ηλικιών 50 και 100 ημερών.



Σχήμα 4.43: Φωτογραφίες των συμβατικών σκυροδεμάτων (GC) κατά την έκθεσή τους σε διάλυμα οξικού οξέος έως τις 200 ημέρες (d).



Σχήμα 4.44: Φωτογραφίες των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC) κατά την έκθεσή τους σε διάλυμα οξικού οξέος έως τις 200 ημέρες (d).

Από το διάγραμμα και το μακροσκοπικό έλεγχο των δειγμάτων, ως σημαντικό συμπέρασμα προκύπτει ότι τα GC έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τα CC όταν αυτά εκτεθούν σε περιβάλλον οξικού οξέος, όπου η απώλεια μάζας των GC οφείλεται ως επί το πλείστον στη φθορά των ασβεστολιθικών αδρανών.

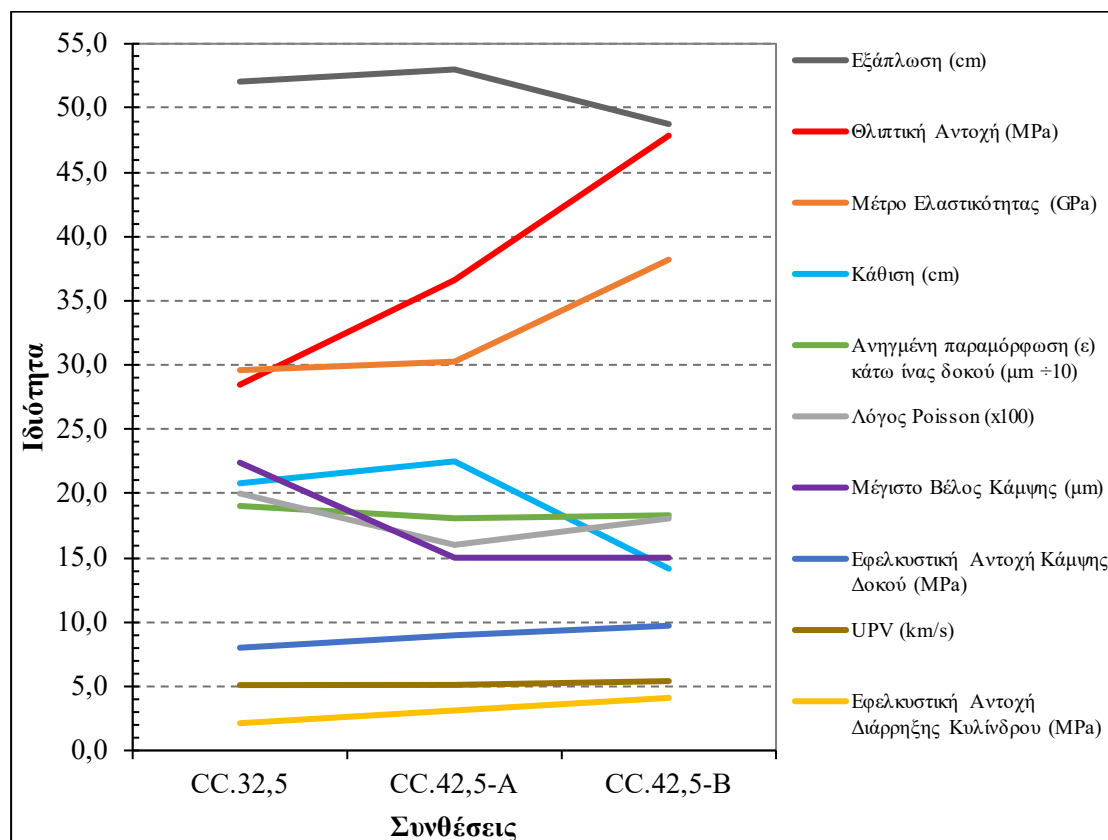
4.3. Συγκριτικά Αποτελέσματα

Πέραν της γενικής σύγκρισης των CC με τα GC, εξίσου σημαντική είναι και η σύγκριση των CC μεταξύ τους, καθώς επίσης και των GC μεταξύ τους. Αυτό θα βοηθήσει στην επιλογή της βέλτιστης σύνθεσης του σκυροδέματος ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε έργου.

- Σύγκριση μεταξύ των συνθέσεων CC

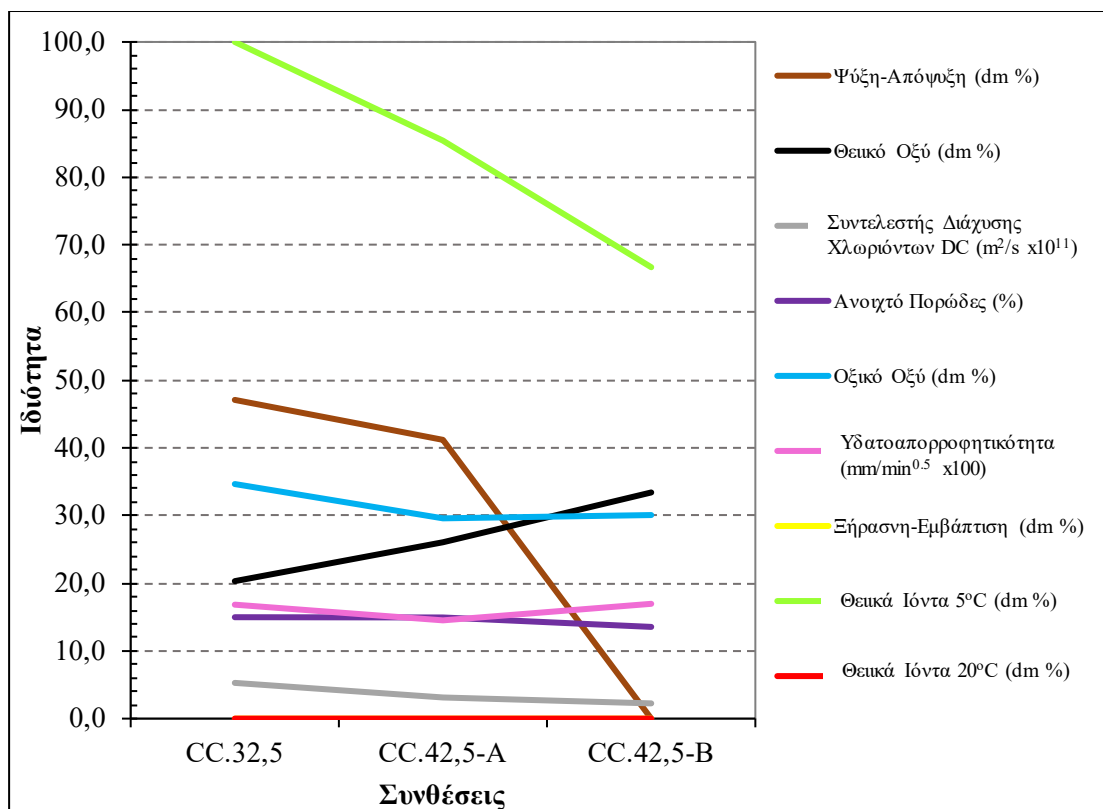
Στο Σχήμα 4.45 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των CC.32,5, A-CC.42,5 και B-CC.42,5 που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η εργασιμότητα μετρούμενη με τη δοκιμή της τράπεζας εξάπλωσης, είναι σχεδόν ίδια για όλα τα μίγματα που ανήκουν στην κατηγορία F4. Όσον αφορά τη δοκιμή της κάθισης, οι συνθέσεις CC.32,5, A-CC.42,5 και B-CC.42,5 ανήκουν στις κατηγορίες S4, S5 και S3, αντίστοιχα. Η ανάπτυξη αντοχής σε θλίψη είναι φυσιολογική και αναμενόμενη για όλες τις συνθέσεις. Το A-CC.42,5 εμφανίζει περίπου 30% μεγαλύτερη αντοχή από το CC.32,5, ενώ το B-CC.42,5 περίπου 30% μεγαλύτερη αντοχή από το A-CC.42,5. Όσον αφορά την αντοχή σε διάρρηξη κυλίνδρου και σε κάμψη δοκού, τα σκυροδέματα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με την αντοχή σε θλίψη. Το B-CC.42,5 παρουσιάζει περίπου 25% μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας

από τα CC.32,5 και A-CC.42,5. Το σκυρόδεμα με τη χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη (CC.32,5) εμφανίζει το μεγαλύτερο βέλος κάμψης και το μεγαλύτερο λόγο Poisson. Η ανηγμένη παραμόρφωση ϵ στην κάτω ίνα της δοκού κατά τη δοκιμή του εφελκυσμού και η UPV είναι σχεδόν παρόμοια σε όλα τα CC.



Σχήμα 4.45: Σύγκριση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των συνθέσεων των συμβατικών σκυροδεμάτων (CC).

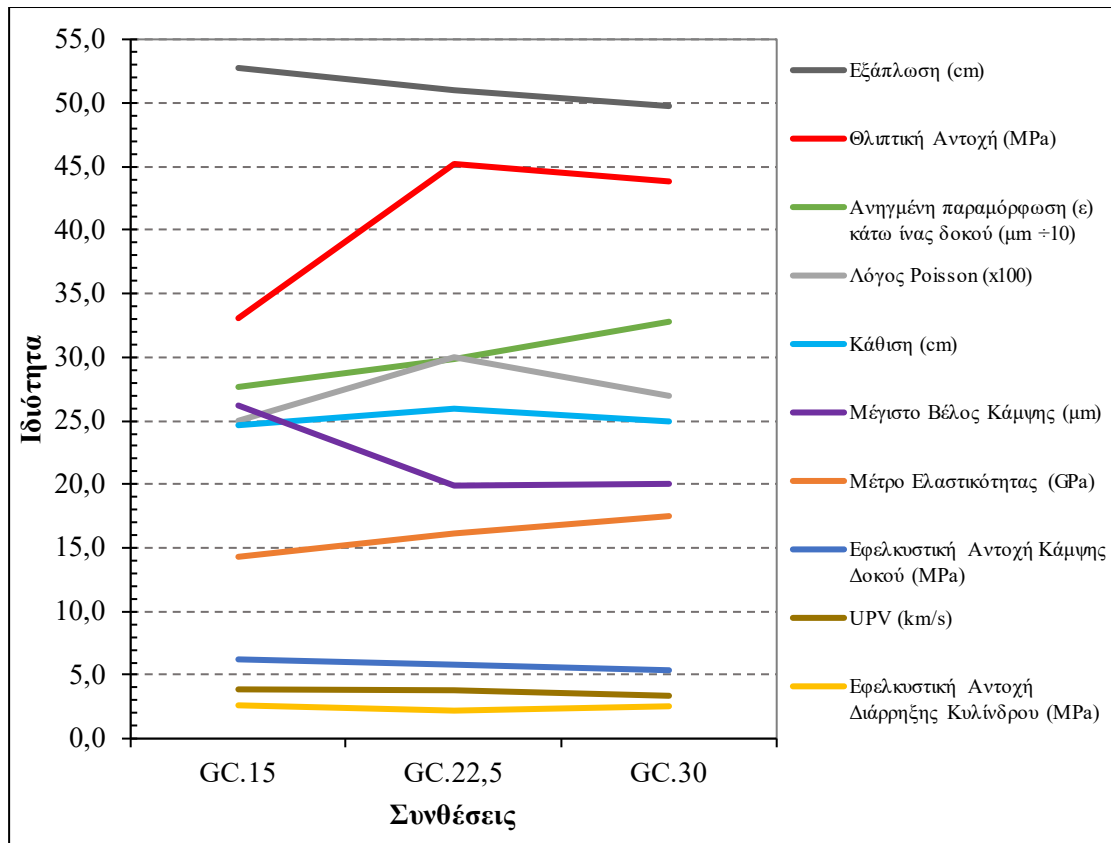
Το Σχήμα 4.46 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών ανθεκτικότητας των CC που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Στη δοκιμή ψύξης – απόψυξης το B-CC.42,5 φαίνεται να είναι ανθεκτικό, αφού είχε 0% απώλεια μάζας, ενώ τα CC.32,5 και το A-CC.42,5 είχαν 50% και 40% αντίστοιχα. Η απώλεια μάζας σε περιβάλλον θεικού οξέος των CC κυμαίνεται από 20.3% και 33.4%, με το CC.32,5 να έχει τη μικρότερη και το B-CC.42,5 τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας. Σε περιβάλλον οξικού οξέος η απώλεια μάζας μεταξύ των συνθέσεων CC είναι πολύ κοντά (30.0% έως 34.7), με το CC.32,5 να εμφανίζει τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας. Όσον αφορά τη διάχυση χλωριόντων, το ανοιχτό πορώδες, την υδατοαπορροφητικότητα, την ξήρανση – εμβάπτιση και την έκθεση σε θεικά ιόντα στους 20°C, η συμπεριφορά όλων των CC ήταν σχεδόν η ίδια. Στην έκθεση σε θεικά ιόντα στους 5°C, τα CC δεν έδειξαν καλή συμπεριφορά, αφού το CC.32,5 είχε 100% απώλεια μάζας, το A-CC.42,5 85% και το B-CC.42,5 68%.



Σχήμα 4.46: Σύγκριση της ανθεκτικότητας των συνθέσεων των συμβατικών σκυροδεμάτων (CC).

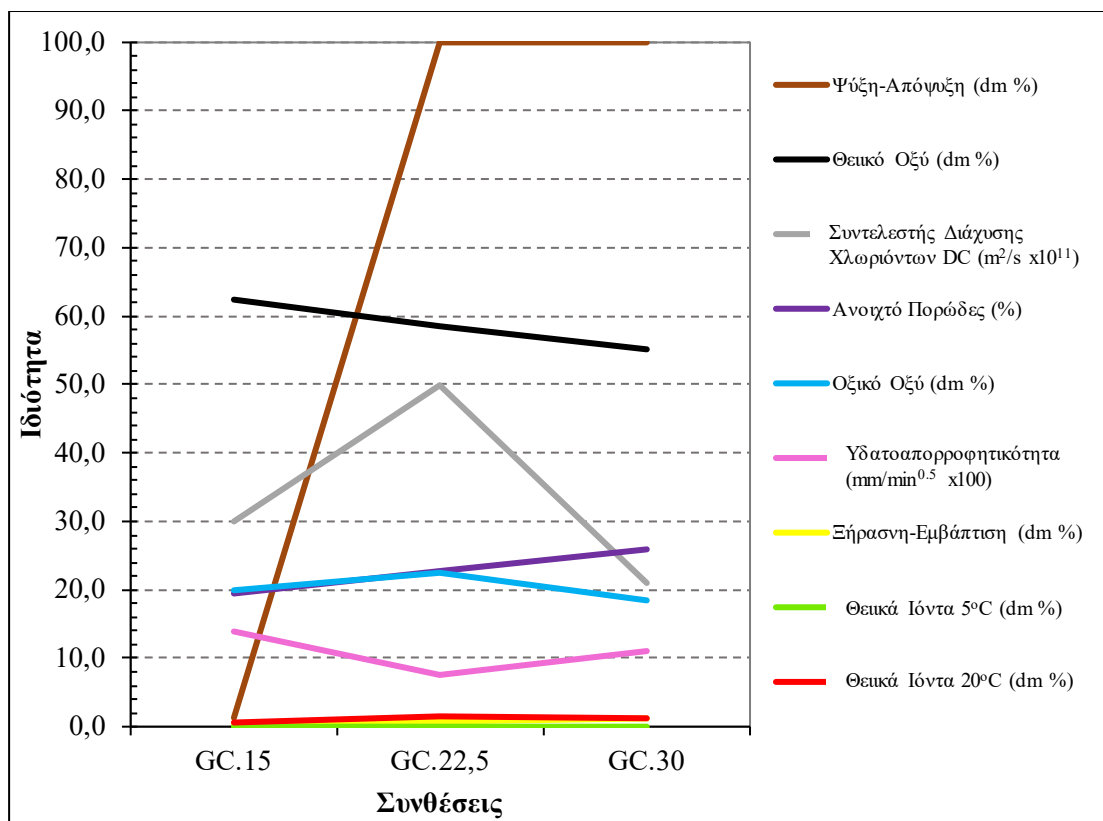
- Σύγκριση μεταξύ των συνθέσεων GC

Στο Σχήμα 4.47 παρουσιάζονται όλες οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των GC που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η εργασιμότητα είναι σχεδόν ίση για όλα τα μίγματα. Όλες οι συνθέσεις του GC στη μέθοδο του μέτρου εξάπλωσης ανήκουν στην κατηγορία F4 και στη δοκιμή της κάθισης στην κατηγορία S5, ικανοποιώντας τους στόχους του σχεδιασμού της σύνθεσης. Τα GC.22,5 και GC.30 παρουσιάζουν παρόμοια ανάπτυξη αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και έχουν περίπου 35% μεγαλύτερη αντοχή από το GC.15. Τόσο στη διάρρηξη κυλίνδρου, όσο και στην κάμψη δοκού η αντοχή σε εφελκυσμό είναι σχεδόν ίδια σε όλες τις συνθέσεις. Το μέτρο ελαστικότητας των GC αυξάνεται όσο αυξάνεται και η περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα, καθώς γίνεται πιο ψαθυρό σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Mehta και Monteiro, 2005 και Neville, 2012). Αυτό επιβεβαιώνεται και από το βέλος κάμψης, αφού το GC.15, με τη χαμηλότερη αντοχή, έχει την υψηλότερη παραμόρφωση. Η ανηγμένη παραμόρφωση στην κάτω ίνα της δοκού στη δοκιμή της κάμψης αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα, αφού επηρεάζεται από την άνω πλευρά της δοκού, η οποία θλίβεται. Το GC.22,5 παρουσιάζει το μεγαλύτερο λόγο Poisson, ενώ η UPV είναι παρόμοια σε όλες τις συνθέσεις.



Σχήμα 4.47: Σύγκριση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των συνθέσεων των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC).

Στο Σχήμα 4.48 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών ανθεκτικότητας των GC που μετρήθηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω. Στη δοκιμή ψύξης – απόψυξης μόνο το GC.15 δεν επηρεάστηκε καθόλου, ενώ τα υπόλοιπα GC είχαν πλήρη κατάρρευση. Η ανθεκτικότητα σε θεικό οξύ των GC φαίνεται να βελτιώνεται αισθητά όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε IT. Το ανοιχτό πορώδες στα GC φαίνεται να αυξάνεται και αυτό όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε IT. Η ανθεκτικότητα σε οξικό οξύ φαίνεται να είναι αρκετά καλή για όλες τις συνθέσεις GC, αφού η απώλεια μάζας ήταν περίπου 20%. Ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων δείχνει να έχει την καλύτερη (μικρότερη) τιμή στο GC.30. Όλα τα μίγματα GC παρουσιάζουν ομοιόμορφη υδατοαπορροφητικότητα, ανθεκτικότερα σε ξήρανση – εμβάπτιση και ανθεκτικότερα σε περιβάλλον θεικών ιόντων στους 5°C και στους 20°C.



Σχήμα 4.48: Σύγκριση της ανθεκτικότητας των συνθέσεων των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC).

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, φαίνεται ότι η αναλογία συνδετικού υλικού (IT) προς αδρανή υλικά έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του GC. Αυτή η αναλογία, η οποία προκύπτει από τα δεδομένα του Πίνακα 3.5 της παρούσας διατριβής, είναι 0.24, 0.46 και 0.87 για GC.15, GC.22,5 και GC.30 αντίστοιχα. Οι GC με τις υψηλότερες αναλογίες (GC.22,5 και GC.30) έδειξαν καλύτερες ιδιότητες.

Τέλος, σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, φαίνεται ότι οι GC.22,5 και GC.30 παρουσίασαν την καλύτερη συμπεριφορά σχεδόν σε όλους τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προτείνεται το GC.30 επειδή έχει τη μέγιστη περιεχόμενη IT (750 kg/m^3) σε συνδυασμό με την ελάχιστη περιεκτικότητα αδρανών (φυσικών πόρων).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα, τα οποία θα διατυπωθούν παρακάτω, προκύπτουν από τα αποτελέσματα της έρευνας της εφαρμογής γεωπολυμερισμού για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στην τεχνολογία σκυροδέματος. Ως τελικό συμπέρασμα μπορεί να αναφερθεί ότι η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το αποκλειστικό συνδετικό υλικό (αντί του τσιμέντου) για την παραγωγή γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων ικανοποιητικών μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων, καθώς και ανθεκτικότητας. Η διατριβή αυτή μπορεί να συμβάλει στη χρήση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος.

5.1. Γεωπολυμερική Πάστα (GFA)

Τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Ο χρόνος αρχής πήξης καλύπτει τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1 για τα τσιμέντα και αυτό είναι ένα σημαντικό στοιχείο για την αξιοποίηση των γεωπολυμερών στην παραγωγή σκυροδέματος. Επίσης, δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από το λόγο στερεό/υγρό (S/L).
- Η μείωση του λόγου S/L οδηγεί σε σημαντική αύξηση της εργασιμότητας, χωρίς όμως σημαντική διαφοροποίηση στη θλιπτική αντοχή. Η συμπεριφορά αυτή των γεωπολυμερών χαρακτηρίζεται πολύ θετική, αφού διευκολύνει την εφαρμογή τους στα δομικά έργα και ειδικά σε αυτά με υψηλές απαιτήσεις σε εργασιμότητα.
- Η αντοχή σε θλίψη των γεωπολυμερών φαίνεται να μην επηρεάζεται από το λόγο S/L και τα δοκίμια να έχουν ικανοποιητική αντοχή ακόμα και χωρίς θερμική ωρίμανση. Η θερμική ωρίμανση επιδρά θετικά στις πρώιμες αντοχές και αυτό θα μπορούσε να αξιοποιηθεί κατάλληλα στον κατασκευαστικό τομέα.
- Η υδατοαπορροφητικότητα των γεωπολυμερών φαίνεται να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο S/L.
- Η συστολή ξήρανσης των γεωπολυμερών εμφανίζεται παρόμοια με αυτή των τσιμεντοειδών και φαίνεται ότι μειώνεται όσο μειώνονται και τα υγρά στοιχεία του μίγματος.
- Τα χημικά πρόσμικτα τσιμεντοειδών δείχνουν να επηρεάζουν και τις ιδιότητες των γεωπολυμερών σε μεγάλο βαθμό, αλλά όχι όλα. Κάποια έχουν την αναμενόμενη επίδραση, ενώ κάποια την ακριβώς αντίθετη. Ο λόγος S/L δείχνει να μην έχει μονοσήμαντη επίδραση, αφού ορισμένα πρόσμικτα λειτούργησαν για S/L=3.0 και κάποια άλλα για S/L=3.2. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την εμβάθυνση στη δράση των χημικών προσμίκτων στα γεωπολυμερή.
- Οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες μπορούν να αξιοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δομικών υλικών και ειδικότερα γεωπολυμερικών κονιαμάτων και σκυροδεμάτων.

5.2. Γεωπολυμερικό Σκυρόδεμα (GC)

Το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα (GC) ελέγχθηκε σε αρκετές δοκιμές που αφορούν τις μηχανικές και τις φυσικές του ιδιότητες, καθώς και την ανθεκτικότητά του. Αναλύοντας τα παραπάνω και συγκρίνοντάς το με το συμβατικό σκυρόδεμα (CC) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Μπορεί να παρασκευαστεί GC με ελεγχόμενη εργασιμότητα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου και να ενταχθεί στις αντίστοιχες κατηγορίες της κάθε δοκιμής κατά ΚΤΣ-2016.
- Η περιεκτικότητα σε αέρα των νωπών GC κυμαίνεται στα ίδια όρια με τις συνθέσεις των CC και δείχνει να μειώνεται όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα της ΙΤ στη σύνθεση.
- Η μέθοδος υπολογισμού της μελέτης σύνθεσης των CC (ACI 211.1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια και στα GC, αφού φαίνεται ότι συνδράμει στη σωστή επιλογή αναλογιών των υλικών.
- Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της ιπτάμενης τέφρας αυξάνεται και η θλιπτική αντοχή των GC, αλλά μέχρι ένα ποσοστό, κάτι το οποίο ισχύει και στα CC με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Ακόμη, οι αντοχές σε θλίψη των GC έφτασαν, κατά κανόνα, στο μέγιστο από τις 3 ημέρες, παρέμειναν σταθερές ακόμα και μετά από 2 χρόνια και εντάσσονται στις κλάσεις αντοχών του ΚΤΣ-2016.
- Η εφελκυστική αντοχή που προκύπτει τόσο από τη δοκιμή διάρρηξης όσο και από τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων βρίσκεται εντός των ορίων της εκάστοτε κατηγορίας που ορίζει ο ΕΚΩΣ 2000 για τα CC. Επίσης, η εφελκυστική αντοχή των GC δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από την περιεκτικότητα σε ΙΤ. Η σχέση μεταξύ θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής φαίνεται να ισχύει και στα GC.
- Τα GC εμφανίζονται να έχουν μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης από τα αντίστοιχα CC, αφού το βέλος κάμψης τους κατά τη σχετική δοκιμή ήταν μέχρι και 35% μεγαλύτερο.
- Το μέτρο ελαστικότητας των GC βρέθηκε να είναι περίπου το μισό από αυτό των αντίστοιχων κατηγοριών CC που ορίζονται στον ΕΚΩΣ 2000 και ο λόγος Poisson τους φάνηκε να είναι λίγο μεγαλύτερος από το άνω όριο που αναφέρει ο ίδιος κανονισμός για τα CC.
- Οι υπέρηχοι μεταφέρονται διαφορετικά διαμέσου της μάζας των GC από ότι των CC, με αποτέλεσμα η ταχύτητα μετάδοσης υπερήχων (UPV) να είναι αρκετά διαφοροποιημένη ακόμα και για ίδιας αντοχής σκυροδέματα. Η ποιοτική κατάταξη των GC δεν μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση το σχετικό πίνακα της βιβλιογραφίας που υπάρχει για τα CC. Επίσης, θα πρέπει να βρεθεί νέα εξίσωση εκτιμώμενης αντοχής μέσω των UPV που να αφορά αποκλειστικά τα GC, αφού η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τα CC διαφοροποιεί αρκετά τα αποτελέσματα.
- Η υδατοαπορροφητικότητα των GC φάνηκε να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των CC, παρόλο που το ανοικτό πορώδες των GC βρέθηκε να είναι μεγαλύτερο. Επίσης, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ΙΤ στη σύνθεση των GC, τόσο αυξάνεται και το ανοικτό πορώδες.

- Το pH των GC είναι αλκαλικό, όπως και των CC, όπου αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και χαλύβδινος οπλισμός, αφού το αλκαλικό περιβάλλον που θα εγκιβωτιστεί ο χάλυβας δε είναι διαβρωτικό για αυτόν.
- Το GC έδειξε ότι μπορεί να έχει ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης – απόψυξης, αρκεί η περιεκτικότητα σε IT να διατηρηθεί σε χαμηλά ποσοστά. Έτσι, η σύνθεση με 15% IT ήταν η μόνη που ολοκλήρωσε τη δοκιμή χωρίς απώλεια μάζας.
- Η ανθεκτικότητα του GC σε κύκλους ξήρανσης – εμβάπτισης φάνηκε να είναι ικανοποιητική, αφού σε όλες τις συνθέσεις που δοκιμάστηκαν η σχετική απώλεια μάζας ήταν πολύ μικρή.
- Τα CC έδειξαν να υπερτερούν αρκετά έναντι των GC όσον αφορά το συντελεστή διάχυσης χλωριόντων εντός της μάζας του σκυροδέματος.
- Σε περιβάλλον θεικών ιόντων σε χαμηλές θερμοκρασίες (5°C) τα GC δείχνουν να έχουν πλήρη ανθεκτικότητα, σε αντίθεση με τα CC που παρουσίασαν πάνω από 75% απώλεια μάζας. Σε κανονικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20°C) οι συνθέσεις τόσο των GC όσο και των CC δεν παρουσίασαν κάποια φθορά.
- Όσον αφορά την έκθεση των σκυροδεμάτων σε οξέα, τα GC παρουσιάζουν κατά 50% μεγαλύτερη απώλεια μάζας από τα CC σε περιβάλλον θεικού οξέος, ενώ σε οξικό οξύ τα αποτελέσματα ήταν αντίθετα, με τα GC να εμφανίζουν αρκετά μικρότερη φθορά από τα CC.
- Το GC με τη μέγιστη περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα (750 kg/m³) φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής μπορεί να συμβάλει στην ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας στην τεχνολογία σκυροδέματος, όχι ως πρόσθετο ορυκτής προέλευσης, αλλά ως αποκλειστικό συνδετικό υλικό.

5.3. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε μια εκτενή έρευνα στη δημιουργία γεωπολυμερικού σκυροδέματος, το οποίο δοκιμάστηκε σε αρκετές πειραματικές διατάξεις. Όμως, με την ολοκλήρωσή της έρευνας δημιουργήθηκαν νέα δεδομένα και ταυτόχρονα σκέψεις για περαιτέρω έρευνα του υλικού.

Πρώτη σκέψη νέας έρευνας είναι ο έλεγχος συνάφειας του GC με το χαλύβδινο κλασικό οπλισμό. Η συνάφεια θα πρέπει να ελεγχθεί όχι μόνο ως προς την συγκόλληση και ολίσθηση του οπλισμού εντός του GC, αλλά και ως προς τη συμπεριφορά τους ως ένα ενιαίο στοιχείο σε δυναμικές και μη καταπονήσεις.

Σε συνέχεια του παραπάνω, αφού θα υπάρξουν στο μέλλον κατασκευές από GC, θα πρέπει να μπορεί να ελέγχεται η υφιστάμενη αντοχή τους και με μη καταστροφικές μεθόδους, όπως η μέτρηση ταχύτητας υπερήχων (UPV). Έτσι λοιπόν, χρειάζεται να δημιουργηθεί ένας νέος πίνακας ποιοτικής κατάταξης αποκλειστικά για τα GC με βάση το UPV.

Επίσης, θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθεί η ανθεκτικότητα του GC σε έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, αφού είναι μια ιδιότητα που χρειάζεται σε κάποιες εφαρμογές.

Επειδή είναι δύσκολο να υπάρξει θερμική επεξεργασία κατά την ωρίμαση του GC όταν αυτό θα χρησιμοποιείται σε κτηριακές και όχι μόνο κατασκευές, προτείνεται να ερευνηθεί εκ νέου η συμπεριφορά του σε αντίστοιχες δοκιμές με την παρούσα διατριβή, χωρίς όμως να έχει υποστεί κάποια θερμική ωρίμανση.

Τέλος, προτείνεται να γίνει μια έρευνα ως προς τη χρήση των χημικών προσμίκτων των CC στα GC, για να διαπιστωθεί εάν επηρεάζουν τις ιδιότητες του νωπού ή σκληρυμένου GC. Ιδανικά, προτείνεται να πραγματοποιηθεί έρευνα για τη δημιουργία εξειδικευμένων χημικών προσμίκτων προς χρήση σε GC.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ασπρογέρακας Α., (2013), «Συγκριτική αξιολόγηση ανθεκτικότητας γεωπολυμερών από ιπτάμενη τέφρα και τσιμεντοκονιαμάτων», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Γιαννοπούλου Ι., Πάνιας Δ., (2008), «Γεωπολυμερικά δομικά υλικά από στερεά αργιλοπυριτικά παραπροϊόντα», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα.
- Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος – ΕΚΩΣ (2000), Αθήνα.
- ΕΛΟΤ EN 196-1, (2005), «Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου - Μέρος 1: Προσδιορισμός αντοχών».
- ΕΛΟΤ EN 196-2, (2013), «Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου - Μέρος 2: Χημική Ανάλυση Τσιμέντου».
- ΕΛΟΤ EN 196-3, (2008), «Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου - Μέρος 3: Προσδιορισμός χρόνου πήξης και σταθερότητας όγκου».
- ΕΛΟΤ EN 196-7, (2007), «Μέθοδοι δοκιμής τσιμέντου - Μέρος 7: Μέθοδοι λήψης και παρασκευής δειγμάτων τσιμέντου».
- ΕΛΟΤ EN 197-1, (2011), «Τσιμέντο - Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα».
- ΕΛΟΤ EN 933-1, (2012), «Δοκιμές γεωμετρικών ιδιοτήτων των αδρανών - Μέρος 1: Προσδιορισμός του διαγράμματος κοκκομετρίας - Μέθοδος με κόσκινα».
- ΕΛΟΤ EN 933-3, (2012), «Δοκιμές γεωμετρικών ιδιοτήτων των αδρανών - Μέρος 3: Προσδιορισμός της μορφής των κόκκων - Δείκτης Πλακοειδούς».
- ΕΛΟΤ EN 933-8, (2012), «Δοκιμές γεωμετρικών ιδιοτήτων των αδρανών - Μέρος 8: Αξιολόγηση λεπτόκοκκου κλάσματος (παιπάλης) - Δοκιμή ισοδυνάμου άμμου».
- ΕΛΟΤ EN 933-9, (2013) «Δοκιμές γεωμετρικών ιδιοτήτων των αδρανών - Μέρος 9: Αξιολόγηση λεπτόκοκκου κλάσματος (παιπάλης) - Δοκιμή μπλε του μεθυλενίου».
- ΕΛΟΤ EN 934-1, (2008), «Πρόσθετα σκυροδέματος κονιαμάτων και ενεμάτων - Μέρος 1: Κοινές απαιτήσεις».
- ΕΛΟΤ EN 934-2, (2012), «Πρόσθετα σκυροδέματος κονιαμάτων και ενεμάτων - Μέρος 2: Πρόσθετα σκυροδέματος - Ορισμοί, απαιτήσεις, συμμόρφωση, σήμανση και επισήμανση».
- ΕΛΟΤ EN 1008, (2002), «Νερό ανάμειξης σκυροδέματος - Προδιαγραφή για δειγματοληψία, έλεγχο και αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού , συμπεριλαμβανομένου του νερού που ανακτάται από διεργασίες στη βιομηχανία σκυροδέματος, για τη χρήση του ως νερό ανάμειξης σκυροδέματος».
- ΕΛΟΤ EN 12350-1, (2009), «Δοκιμές νωπού σκυροδέματος - Μέρος 1: Δειγματοληψία».
- ΕΛΟΤ EN 12350-2, (2009), «Δοκιμές νωπού σκυροδέματος - Μέρος 2: Δοκιμή κάθισης».
- ΕΛΟΤ EN 12350-5, (2009), «Δοκιμές νωπού σκυροδέματος- Μέρος 5: Δοκιμή σε τράπεζα εξαπλώσεως».
- ΕΛΟΤ EN 12350-6, (2009), «Δοκιμές νωπού σκυροδέματος- Μέρος 6: Πυκνότητα».
- ΕΛΟΤ EN 12350-7, (2009), «Δοκιμές νωπού σκυροδέματος - Μέρος 7: Περιεκτικότητα σε αέρα- Μέθοδοι με πίεση».

- ΕΛΟΤ EN 12390-1, (2012), «Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 1: Σχήμα, διαστάσεις και άλλες απαιτήσεις για δοκίμια και μήτρες».
- ΕΛΟΤ EN 12390-2, (2009), «Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 2: Παρασκευή και συντήρηση δοκιμίων για δοκιμές αντοχής».
- ΕΛΟΤ EN 12390-3, (2009), «Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 3: Αντοχή σε θλίψη δοκιμίων»
- ΕΛΟΤ EN 12390-5, (2009), «Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 5: Αντοχή σε κάμψη δοκιμίων».
- ΕΛΟΤ EN 12390-6, (2009), «Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 6: Εφελκυστική αντοχή δοκιμίων σε διάρρηξη δοκιμίων».
- ΕΛΟΤ EN 12390-7, (2009), «Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 7: Πυκνότητα σκληρυμένου σκυροδέματος».
- ΕΛΟΤ EN 12504-4, (2004), «Δοκιμές σκυροδέματος στις κατασκευές - Μέρος 4: Προσδιορισμός της ταχύτητας μετάδοσης του ήχου με υπέρηχους».
- ΕΛΟΤ EN 12620, (2013), «Αδρανή για σκυρόδεμα».
- ΕΤΕΠ, (2007), «Ελληνικές Ιπτάμενες Τέφρες», ΔΙΠΑΔ/οικ. 281/Φ200 (ΦΕΚ 551/Β/18-4-2007).
- Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., Παναγιωτοπούλου Χ., Ασπρογέρακας Α., (2013), «Σύνθεση, χαρακτηρισμός και ιδιότητες γεωπολυμερών από ελληνικές ιπτάμενες τέφρες», 9^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής,, Αθήνα.
- Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος – ΚΤΣ, (2016), Αθήνα.
- Καστανάκη Α., Σωτηρόπουλος Δ., Παπαδοπούλου Ε., (2012), «Η μεταβλητότητα των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών. Εκτιμήσεις για την εξέλιξή τους στο μέλλον.», 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ - Αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων στη δόμηση, Θεσσαλονίκη.
- Κιούπης Δ., Τσιβιλής Σ., Κακάλη Γ., (2017), «Σχεδιασμός και ανάπτυξη πράσινων δομικών υλικών με αλκαλική ενεργοποίηση παραπροϊόντων και αποβλήτων», 11^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Μάιος, Θεσσαλονίκη.
- Μπαδογιάννης Ε., Μπακόλας Σ.Α., Ντάφλου Ε., Ρακαντά Ε., (2019), «Εργαστηριακές Ασκήσεις – Δομικά Υλικά», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα.
- Νικολουτσόπουλος Ν., Σωτηροπούλου Α., Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., (2017), «Επίδραση του λόγου στερεό/υγρό στο χρόνο πήξης, στην εργασιμότητα και την θλιπτική αντοχή γεωπολυμερούς από ιπτάμενη τέφρα», 11^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη.
- Νικολουτσόπουλος Ν., Σωτηροπούλου Α., Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., (2018), «Επίδραση των χημικών προσμίκτων στο χρόνο πήξης, στην εργασιμότητα και στη θλιπτική αντοχή γεωπολυμερούς από ιπτάμενη τέφρα», 18^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, Απρίλιος, Αθήνα.
- Νικολουτσόπουλος Ν., Σωτηροπούλου Α., Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., (2019), «Μηχανικές ιδιότητες γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων από ιπτάμενη τέφρα. Σύγκριση με συμβατικά σκυροδέματα», 12^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Μάιος, Αθήνα.

- Παναγιωτοπούλου Χ., (2009), «Αξιοποίηση ελληνικών βιομηχανικών ορυκτών και παραπροϊόντων στην τεχνολογία των γεωπολυμερών», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παπαγιάννη Ι., (2011), «Σκυρόδεμα: Μικροδομή, ιδιότητες και υλικά», Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- Παπαδοπούλου Ελένη, (2021), «Παραγωγή και εκμετάλλευση ιπτάμενης τέφρας στην Ελλάδα για τα έτη 2019 και 2020», Υποτ. Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Αδειοδοτήσεων Κλ. Εκμετάλλευσης/ ΤΠ&ΧΤ Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Λιγνιτικών Μονάδων, e-mail, Ημερομηνία αποστολής: 17/11/21]
- Σκαροπούλου Α., (2009), «Διερεύνηση και ερμηνεία της επίδρασης του ασβεστόλιθου στην ανθεκτικότητα δομικών υλικών σε περιβάλλον θεικών ιόντων», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Σουλιώτη Δ., Ματίκας Θ., (2008), «Μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με διαφορετική γεωμετρία και ποσότητα χαλύβδινων ινών», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, Αθήνα, 21-23 Μαΐου.
- Σπανός Χ., Σπιθάκης Μ., Τρέζος Κ., (2006), «Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών», ΤΕΕ, Αθήνα.
- Σωτηριάδης Κ., (2011), «Διερεύνηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς ασβεστολιθικών τσιμέντων σε συνδυασμένο περιβάλλον χλωριόντων και θεικών ιόντων», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Σωτηροπούλου Α., Πασσά Δ., (2010), «Αντοχή υλικών: Εργαστηριακές εφαρμογές», Ιών, Αθήνα.
- Τρέζος Κ., Γεωργίου Κ., Μαραβέλιας Χρ., (1993), «Προσδιορισμός της επιτόπου αντοχής του σκυροδέματος με έμμεσες μεθόδους. Βαθμονόμηση του κρουσιμέτρου και των υπερήχων», Τεχνικά Χρονικά ΤΕΕ, vol. 13, p.p. 27-44
- Τριανταφύλλου Α., (2013), «Δομικά Υλικά», 10^η Έκδοση, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Τσιβιλής Σ., (2009), «Μελέτη παραμέτρων που επιδρούν στην υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος», Σημειώσεις Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υλικών, Αθήνα.
- Τσίμας Σ., Τσιβιλής Τ., (2010), «Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Τσιρίδης Β., Νταρακάς Ε., Πεταλά Μ., Κούγκολος Α., (2012), «Μέθοδοι εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μπορεί να προκύψουν από τη διάθεση και αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων», 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ - Αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων στη δόμηση, Θεσσαλονίκη.
- Τσιτούρας Α., (2013), «Αξιοποίηση ελληνικών καολινών στην τεχνολογία των γεωπολυμερών», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Adak D., Mandal S., (2015), «Study on the modified process for the development of fly ash based geopolymer mortar cured at ambient temperature», Indian Concrete Journal vol. 89, p.p. 31-40.
- Aleem M.I.A., Arumairaj P.D., (2012), «Optimum mix for the geopolymer concrete», Indian Journal of Science and Technology Vol. 5 No. 3.

- Adam A.A., (2014), «*The effect of temperature and duration of curing on the strength of fly ash based geopolymer mortar*», *Procedia Engineering*, Elsevier, vol. 95, p.p. 410-414.
- Anuradha R., Sreevidyaa V., Venkatasubramania R., Ranganb B.V., (2012), «*Modified guidelines for geopolymer concrete mix design using indian standard*», *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, vol. 13, p.p. 353-364.
- ASTM C188, (2014), «*Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*», ASTM International, West Conshohocken, PA, 645.
- ASTM C642, (1997), «*Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*», ASTM International, West Conshohocken, PA, 645.
- ASTM C666 / C666M, (1997), «*Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*», ASTM International, West Conshohocken, PA, 645.
- ASTM C1437, (2007), «*Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*», ASTM International, West Conshohocken, PA, 645.
- ASTM C1585, (2020), «*Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*», ASTM International, West Conshohocken, PA, 645.
- Athanasopoulou A., Nikoloutsopoulos N., Neroutsou A., (2016), «*An experimental study on the effect of chemical admixtures on unreinforced concrete mechanical behavior*», 11th HSTAM International Congress on Mechanics Athens, 27 – 30 May, Greece
- Bhavsar G.D., Talavia K. R., Suthar D. P., (2014), «*Workability properties of geopolymer concrete using accelerator and silica fume as an admixture*», *International Journal for Technological Research In Engineering*, vol. 1, Issue 8, p.p. 541-544.
- Bhowmick A., Ghosh S., (2012), «*Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of Fly ash based Geopolymer mortar*», *International journal of civil and structural engineering*, vol. 3, p.p. 168-177.
- Davidovits J., (2013), «*Geopolymer cement*», Geopolymer Institute, France.
- Demie S., Fadhil N. M., Shafiq N., (2013), «*Effects of micro-structure characteristics of interfacial transition zone on the compressive strength of self-compacting geopolymer concrete*», *Construction and Building Materials* 41, p.p. 91–98
- EN 12390-13, (2013), «*Testing hardened concrete. Determination of secant modulus of elasticity in compression*».
- EN 12617-4, (2002), «*Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of shrinkage and expansion*».
- Farhan N.A., Sheikh M.N., Hadi M.N., (2019), «*Investigation of engineering properties of normal and high strength fly ash based geopolymer and alkali-activated slag concrete compared to ordinary Portland cement concrete*». *Construction and Building Materials*, Elsevier, vol. 196, p.p. 26–42.
- Fareed A.M., Fadhil N.M., Shafiq N., (2011), «*Compressive strength and workability characteristics of low-calcium fly ash-based self-compacting*

- geopolymer concrete*», World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, vol. 5, p.p. 64-70.
- Fu Y., Cai L., Wu Y., (2011), «*Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete*», Construction and Building Materials, Elsevier, vol. 25, p.p. 3144–3148.
 - Ganesan N., Abraham R., Raj S.D., (2015), «*Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete*», Construction and Building Materials, Elsevier, vol. 93, p.p. 471–476.
 - Ghosh K., Ghosh P., (2012), «*Effect of Na_2O/Al_2O_3 , SiO_2/Al_2O_3 and W/B ratio on setting time and workability of fly ash based geopolymer*», International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), vol. 2 p.p. 2142-2147.
 - Ghosh R., Sagar S.P., Kumar A., Gupta S.K., Kumar S., (2018), «*Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser*», Journal of Building Engineering, Elsevier, vol. 16, p.p. 39-44.
 - Hardjito D., Rangan B.V., (2005), «*Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*», Research Report GC 1 Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia.
 - Hardjito D., Wallah S. E., Sumajouw D.M.J., Rangan B.V., (2005), «*Introducing fly ash-based geopolymer concrete: manufacture and engineering properties*», 30th Conference on Our world in concrete & structures: 23 - 24 August, Singapore.
 - Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J., Rangan B.V., (2004), «*On the development of fly ash-based geopolymer concrete*», ACI Materials Journal, vol. 101, p.p. 467-472.
 - Hojati M., Rajabipour F., Radlińska A., (2016), «*Drying shrinkage of alkali activated fly ash: effect of activator composition and ambient relative humidity*», 4th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Las Vegas, USA.
 - Kim J.S, Kim T.H., (2015), «*An ultrasonic pulse velocity test on fly-ash based geopolymer concrete in frequency domains*», Applied Mechanics and Materials, vol. 700, p.p. 310-313.
 - Komnitsas K., Zaharaki D., Vlachou A., Bartzas G., Galetakis M., (2015), «*Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers*», Advanced Powder Technology, Elsevier, vol. 26, p.p. 368-376.
 - Kong D.L.Y., Sanjayan J.G., (2010), «*Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete*», Cement and Concrete Research, Elsevier, vol. 40, p.p. 334–339.
 - Lloyd N., Rangan B., (2010), «*Geopolymer concrete with fly ash*», Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies vol. 3, pp. 1493-1504. Ancona, Italy.
 - Luhar S., Khandelwal U., (2015), «*A study on water absorption and sorptivity of geopolymer concrete*», International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE), vol. 2, p.p. 1-9.
 - Malhotra V., Mehta P., (2002), «*High-performance, high-volume fly ash concrete: Materials, mixture proportioning, properties, construction practice and case*

- histories*», Supplementary cementing materials for sustainable development Inc., Ottawa, Canada.
- McLellana B.C., Williams R.P., Lay J., Riessen A.V., Corder G.D., (2011), «*Costs and carbon emissions for geopolymers pastes in comparison to ordinary portland cement*», Elsevier, Journal of Cleaner Production vol. 19, p.p. 1080-1090.
 - Mehta P.K., Monteiro P.J.M., (2005), «*Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*», McGraw-Hill Professional, 3rd edition, New York, USA.
 - Memon F.A., Nuruddin M.F., Khan S., Shafiq N., (2011), «*Effect of curing conditions on strength of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete*», World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, vol:5, No:8, p.p. 678-681.
 - Memon F.A., Nuruddin M.F., Khan S., Shafiq N., Ayub T., (2013), «*Effect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete*», Journal of Engineering Science and Technology vol. 8, No. 1, p.p. 44 – 56.
 - Motorwala A., Shah V., Kammula R., Nannapaneni P., Raijiwala D.B., (2013), «*Alkali activated fly-ash based geopolymer concrete*», International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Vol 3, Issue 1, p.p. 159-166.
 - Naik S., Gadhiya J., Dhameliya H., (2016), «*Effect of duration and temperature of curing on compressive strength of fly ash based geopolymer concrete*», International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, vol. 5, p.p. 845-849.
 - Neville A., (2012), «*Properties of concrete*», Prentice Hall, 5th Edition, New Jersey, USA.
 - Nikoloutsopoulos N., Athanasopoulou A., Mamai E., (2016), «*Investigation on the effect of ordinary portland cement type on fresh and hardened concrete properties*», 11th HSTAM International Congress on Mechanics Athens, 27 – 30 May, Greece.
 - Nikoloutsopoulos N., Sotiropoulou A., Kakali G., Tsivilis S., (2018), «*The effect of Solid/Liquid ratio on setting time, workability and compressive strength of fly ash based geopolymers*», Materials Today: Proceedings, Elsevier, vol. 5 p.p. 27441–27445.
 - Nikoloutsopoulos N., Sotiropoulou A., Kakali G., Tsivilis S., (2021), «*Physical and mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete compared to those of conventional concrete*», MDPI, Buildings, vol. 11, issue 5, No 178, p.p. 1-14
 - NT BUILD 443, (1995), «*Concrete, Hardened: Accelerated chloride penetration*».
 - Nuruddin M.F., Demie S., Ahmed M.F., Shafiq N., (2011), «*Effect of Superplasticizer and NaOH Molarity on Workability, Compressive Strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete*», World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Geological and Environmental Engineering Vol:5, No:3, p.p. 1308-1315.
 - Nuruddin M.F., Haruna S., Mohammed B.S., Sha'aban I.G., (2018), «*Methods of curing geopolymer concrete: A review*», International Journal of Advanced and Applied Sciences, vol. 5, pp. 31-36.

- Patankar S.V., Jamkar S.S., Ghugal Y.M., (2013) «*Effect of water-to-geopolymer binder ratio on the production of fly ash based geopolymer concrete*», International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering, vol. 2, p.p. 79-83.
- Pilehvar S., Szczotok A.M., Rodríguez J.F., Valentini L., Lanzón M., Pamies R., Kjøniksen A.L., (2019), «*Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials*», Construction and Building Materials, Elsevier, vol. 200, p.p. 94–103.
- Ramujee K., Raju P.M., (2013), «*Development of mix design for low calcium based geopolymer concrete in low, medium and higher grades -indian scenario*», Journal of Civil Engineering and Technology (JCIET), vol. 1, p.p. 15-25.
- Rangan, B.V., Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., (2005), «*Studies on fly ash-based geopolymer concrete*», Proceedings of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, France, 28 June – 1 July, pp. 133–138.
- Rangan B.V., (2008), «*Fly ash-based geopolymer concrete*», Research Report GC 4 Engineering Faculty Curtin University of Technology Perth, Australia.
- Ryu G.S, Lee Y.B., Koh K.T., Chung Y.S, (2013), «*The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators*», Construction and Building Materials, Elsevier, vol. 47 p.p. 409-418.
- Rattanasak U., Pankhet K., Chindapasirt P., (2011), «*Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer*», International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Springer, vol. 8, p.p. 364-369.
- Sahana R., (2013), «*Setting time, compressive strength and microstructure of geopolymer paste*», International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol. 2, p.p. 311-316.
- Sharma A., Ahmad J., (2017), «*Experimental study of factors influencing compressive strength of geopolymer concrete*», International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 4, Issue 5, p.p. 1306-1313.
- Shehab H.K., Eisa A.S., Wahba A.M., (2016), «*Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement*», Construction and Building Materials, Elsevier, vol. 126 p.p. 560-565.
- Silva S.V.A., Kithalawa A.J.N.J., Wijewardena C. L., Nanayakkara S. M. A., (2011), «*Development of Fly Ash Based Geopolymer Concrete*», 17th ERU Research Symposium : Faculty of Engineering, University of Moratuwa, Sri Lanka.
- Singh B., Ishwarya G., Gupta M., Bhattacharyya S.K, (2015), «*Geopolymer concrete: A review of some recent developments*», Construction and Building Materials, Elsevier, vol. 85 p.p. 78-90.
- Siyal A.A., Azizli K.A., Man Z., Ullah H., (2016), «*Effects of parameters on the setting time of fly ash based geopolymers using Taguchi method*», Procedia Engineering, Elsevier, vol. 148 p.p. 302-307.
- Sotiriadis K., Mácová1 P., Mazur A., Viani A., Tsivilis S., (2019), «*Microstructural investigation of portland-limestone cement concrete with pozzolanic materials after long-term exposure to sulfate environment*», 12^o PSCCM, Athens.

- Trochez J.J., Gutiérrez R.M., Rivera J., Bernal S.A., (2015), «*Synthesis of geopolymer from spent FCC: Effect of SiO₂/Al₂O₃ and Na₂O/SiO₂ molar ratios*», *Materiales de Construcción* Vol. 65, Issue 317, p.p. 1-11.
- Uddin F., Shaikh A., (2016), «*Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates*», *International Journal of Sustainable Built Environment*, Elsevier, vol. 5, p.p. 277–287.
- Vairavan S.A., Dharmar S., (2017), «*Experimental study on geopolymer concrete under daylight curing*», *International Journal of Science Technology & Engineering (IJSTE)*, Vol. 3, Issue 8, p.p. 159-163.
- Wallah S., Rangan B., (2006), «*Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties*», Research Report GC 2, Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia.
- Wattanachai P., Suwan T., (2014), «*Strength of Geopolymer Cement Curing at Ambient Temperature by Non-Oven Curing Approaches: An Overview*», *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 212, p.p. 1-6.
- Wijaya A.L., Ekaputri J.J., Triwulan, (2017), «*Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste*», *MATEC Web of Conferences*, vol. 138, p.p. 1-9.
- Witkowska-Dobrev J., Szlachetka O., Dohojda M., Wisniewski K., (2021), «*Effect of Acetic Acid on Compressive Strength and Geometric Texture of the Surface of C20/25 Class Concrete*», *Sustainability*, MDPI, vol. 13, 5136.
- Xu H., Van Deventer J.S.J., (2000), «*The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals*», *International Journal of Mineral Processing*, vol. 59, p.p. 247-266.
- Yaseri S., Hajiaghaci G., Mohammadi F., Mahdikhani M., Farokhzad R., (2017), «*The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste*», *Construction and Building Materials*, Elsevier, vol. 157, p.p. 534-545.
- [www.globenewswire.com, https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/12/15/2574687/0/en/Global-Fly-Ash-Market-to-Surpass-Valuation-of-5-97-Billion-by-2028-Global-Fly-Ash-Production-to-Reach-1-04-Billion-Tons-SkyQuest-Technology.html](https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/12/15/2574687/0/en/Global-Fly-Ash-Market-to-Surpass-Valuation-of-5-97-Billion-by-2028-Global-Fly-Ash-Production-to-Reach-1-04-Billion-Tons-SkyQuest-Technology.html) [Ημερομηνία πρόσβασης: 28/02/23]
- [www.iea.org, https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/transformation#electricity-generation](https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/transformation#electricity-generation) [Ημερομηνία πρόσβασης: 09/01/22]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

1. ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Επώνυμο : Νικολουτσόπουλος
Όνομα : Νικόλαος
Πατρώνυμο : Δημήτριος
Ημ/νία-Τόπος Γέννησης : 07/10/1983, Λεμεσός - Κύπρος
Διεύθυνση : Αγίας Παρασκευής 43, Χαϊδάρι, Τ.Κ. 12462
Τηλέφωνο : 210 5320271 – 693 8215443
e-mail : nikolasnikoloutso@hotmail.com
Ιστότοπος : <http://www.linkedin.com/pub/nikolaos-nikoloutsopoulos/55/931/859>
Οικογενειακή κατάσταση : Άγαμος
Στρατιωτικές υποχρεώσεις : Εκπληρωμένες
Δίπλωμα Οδήγησης: A, A2 and B

2. ΣΠΟΥΔΕΣ

- **10/2001 – 02/2006: Πτυχίο Εκπαιδευτικού Τεχνολόγου Πολιτικού Μηχανικού**, Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης (ΑΣΠΑΙΤΕ – Πρώην ΑΣΕΤΕΜ- ΣΕΛΕΤΕ)
- **10/2007 – 11/2009: Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης με τίτλο Διαχείριση και Διοίκηση Κατασκευών**, MSc in Management in Construction, Kingston University of London.
- **11/2018 – 07/2020: Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης με τίτλο Διοίκηση Επιχειρήσεων (MBA) με κατεύθυνση Management**, στη Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.
- **10/2020 – Σήμερα: Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης με τίτλο Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Έργα**, στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.
- **06/2014 – Σήμερα: Υποψήφιος Διδάκτωρ** στη σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με Υποτροφία του ΕΛΚΕ του ΕΜΠ, στη γνωστική περιοχή Δομικά Υλικά – Σκυρόδεμα με θέμα «Εφαρμογή γεωπολυμερισμού για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στην τεχνολογία σκυροδέματος».

3. ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

- **Αγγλικά:** Επίπεδο ανάγνωσης, γραφής και συνεννόησης Αρίστο C2 (MSc και FCE)

4. ΆΛΛΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ – ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ & ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

- **07/2005:** ECDL, Core Certificate, MS Office Specialist.
- **02/2008:** Προηγμένα Πληροφοριακά Συστήματα Επεξεργασίας δεδομένων μεγάλων τεχνικών έργων, Κατάρτιση Master Κ.Ε.Κ.
- **09/2021:** Οργάνωση Εφαρμογής Σύνθετων Μονωτικών Συστημάτων σε Κτήρια/Εγκαταστάσεις, Κατάρτιση Κε.Δι.Βι.Μ.2 Integration Κ.Ε.Κ.
- **09/2021:** Τεχνικός Μόνωσης - Μονωτής Σε Κτήρια - Υπεύθυνος Συνεργείου, Πιστοποίηση TUV Hellas.
- **03/2023:** ISO 14001:2015 Environmental Management Systems requirements with guidance for use, TUV Hellas.

5. ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

5.1. Εργασιακή εμπειρία

- **03/2021 – Σήμερα:** Πολιτικός Μηχανικός Τ.Ε. – Επίβλεψη Έργων, στη Γενική Διεύθυνση Μεγάλων Έργων της Ε.Υ.Δ.Α.Π. Α.Ε. για τα έργα αποχέτευσης στην Ανατολική Αττική.
- **07/2018 – 03/2021:** Διευθυντής Εργαστηρίου και Υπεύθυνος Ελέγχου Ποιότητας - Πολιτικός Μηχανικός, στην J/V Ellisdon S.A. – Technerga Α.Τ.Ε.Ε. για το έργο: Αεροπορική Βάση του ΝΑΤΟ, «Ανακατασκευή Δ/Π, Π/Τ, Τ/Δ και κατασκευή νέου δαπέδου στάθμευσης Α/ΦΩΝ» στο Στρατιωτικό Αεροδρόμιο της Ελευσίνας.
- **10/2014 – 07/2018:** Πολιτικός Μηχανικός - Εξωτερικός συνεργάτης, στην εταιρεία Eleven Constructions Ltd ως επιβλέπον μηχανικός σε διάφορα τεχνικά έργα.
- **03/2007 – 10/2014:** Προϊστάμενος Ελέγχου Ποιότητας Τεχνολογίας Σκυροδέματος - Πολιτικός Μηχανικός, στις εταιρείες Εδαφομηχανική ΑΤΕ και Γεωτεχνικές Έρευνες ΑΤΕ. Ως συνεργάτης και υπεύθυνος στον τομέα του Σκυροδέματος και των Δομικών Υλικών, με κύριο αντικείμενο απασχόλησης τον Εργαστηριακό και Επιτόπιο Ποιοτικό Έλεγχο μεγάλων δημόσιων και ιδιωτικών έργων.

5.2. Διδασκαλία

- **10/2006 – 07/2023:** Εργαστηριακός Συνεργάτης Καθηγητής στην ΑΣΠΑΙΤΕ (πρώην ΣΕΛΕΤΕ) στο Τμήμα Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών.
- **03/2020 – 02/2023:** Πανεπιστημιακός Υπότροφος στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.) στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- **10/2013 – 02/2016:** Πανεπιστημιακός Υπότροφος στο ΤΕΙ Πειραιά στη Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

- **10/2014 – 07/2017: Συνεργάτης Καθηγητής** στο University Of East London (UEL) Athens Campus - Μητροπολιτικό Κολέγιο.
 - Στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, θεωρία και εργαστήριο.
 - Στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, εργαστήριο.
- **10/2015 – 07/2020: Συνεργάτης Καθηγητής** στο University Of East London (UEL) Athens Campus - Μητροπολιτικό Κολέγιο στη Σχολή Πληροφορικής και Δικτύων, θεωρία και εργαστήριο.
- **10/2018 – 02/2022: Συνεργάτης Καθηγητής** στο Solent University of Southampton, Piraeus Campus - Μητροπολιτικό Κολέγιο στη Σχολή Εμπορικού Ναυτικού, θεωρία.
- **11/2007 – 03/2008: Ωρομίσθιος Καθηγητής** στο 5^ο Λύκειο Πετρούπολης.

6. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

6.1. Διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές

1. **Nikoloutsopoulos N.D.**, Sotiropoulou A.B., Pandermarakis Z.G., (2010), «*Fiber Reinforced Cement Mortars Degradation after their Exposure to Fire Conditions*», European Physical Journal (EPJ Web of Conf) vol.6 No.23001 p.p. 1-6.
2. Pandermarakis Z.G., Sotiropoulou A.B., **Nikoloutsopoulos N.D.**, (2010), «*Ultrasound inspection of fiber reinforced cement based composites after their exposure to fire conditions*», International Journal of Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, vols. 123-125, p.p. 915-918.
3. Pandermarakis Z.G., Sotiropoulou A.B., **Nikoloutsopoulos N.D.**, (2012), «*The Influence of Short Glass and Polypropylene Fibers on First Crack Formation and Toughness of Cement Based Composites after their Exposure to Fire Conditions*», Key Engineering Materials (KEM), Trans Tech Publications, vols. 488-489, p.p. 569-572.
4. Pandermarakis Z.G., Sotiropoulou A.B., **Nikoloutsopoulos N.D.**, Passa D.P., (2012), «*Experimental Study of Fiber reinforced Mortars that are used in the Restoration of Traditional Buildings*» Sustainable Development, culture, traditions Journal, vol.1, p.p. 15-30.
5. Sotiropoulou A., Gavela S., **Nikoloutsopoulos N.**, Passa D., Papadakos G., (2017), «*Experimental study of wood shaving addition in mortar and statistical modeling on selected effects*», Journal of the mechanical behavior of materials (JMBM), vol 26 (1-2), p.p. 55-63.
6. **Nikoloutsopoulos N.**, Sotiropoulou A., Kakali G., Tsvivilis S., (2018), «*The effect of Solid/Liquid ratio on setting time, workability and compressive strength of fly ash based geopolymers*», Materials Today: Proceedings, Elsevier, vol. 5 p.p. 27441–27445.
7. Gavela S., **Nikoloutsopoulos N.**, Papadakos G., Passa D., Sotiropoulou A., (2018), «*Multifactorial experimental analysis of concrete compressive strength as a*

- function of time and water to cement ratio*», Structural Integrity Procedia, Elsevier, vol. 10 p.p. 135-140.
8. **Nikoloutsopoulos N.**, Passa D., Gavela S., Sotiropoulou A., (2018), «*Comparison of shear strengthening technics of reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymers (CFRPs)*», Structural Integrity Procedia, Elsevier, vol. 10 p.p. 141-147.
 9. Gavela S., **Nikoloutsopoulos N.**, Papadakos G., Passa D., Sotiropoulou A., (2019). «*Experimental uncertainty budget for concrete compressive strength test based on a multifactorial analysis*», Frattura ed Integrità Strutturale, vol. 50, p.p 383-394.
 10. Gavela S., **Nikoloutsopoulos N.**, Papadakos G., Sotiropoulou A., (2021), «*Combination of compressive strength test and ultrasonic pulse velocity test with acceptable uncertainty*», Wiley, Material Design and Processing Communication, vol. 3 (e171), issue 4, p.p. 1-6.
 11. **Nikoloutsopoulos N.**, Sotiropoulou A., Kakali G., Tsivilis S., (2021), «*Physical and mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete compared to those of conventional concrete*», MDPI, Buildings, vol. 11, issue 5, No 178, p.p. 1-14.
 12. **Nikoloutsopoulos N. D.**, Nikolopoulou S.P., Pandermarakis Z.G., (2021), «*Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Cement Mortar Composites with Variable Water/Cement Ratio*», Trans Tech Publications, Materials Science Forum, vol. 1042, p.p. 157-163.
 13. **Nikoloutsopoulos N. D.**, Pandermarakis Z. G., Papadioti A., Douvis P., (2021), «*Complete Experimental Investigation for Short Polypropylene Fiber Reinforced Cement Mortars*», Trans Tech Publications, Key Engineering Materials, vol. 902, p.p. 161-168.
 14. **Nikoloutsopoulos N.**, Sahinidis A., Panagopoulou M., (2022), «*The Role of Work Environment in Employee Motivation: The Case of the Construction Industry*», International Journal of Engineering, Management and Humanities (IJEMH), vol. 3, issue 1, p.p. 129-136.
 15. **Nikoloutsopoulos N.**, Sotiropoulou A., Passa D., (2023), «*Deep embedment and NSM techniques for shear strengthening of reinforced concrete with cFRP rope*», Materials Today: Proceedings, Elsevier [Under review].

6.2. Διεθνή συνέδρια με κριτές και πρακτικά

1. **Nikoloutsopoulos N.D.**, Sotiropoulou A.B., Pandermarakis Z.G., (2010), «*Fiber reinforced cement mortars degradation after their exposure to fire conditions*», 14th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM 14), Poitiers, France, 4-8 July.
2. Pandermarakis Z.G., Sotiropoulou A.B., **Nikoloutsopoulos N.D.**, (2010), «*Ultrasound inspection of fiber reinforced cement based composites after their*

- exposure to fire conditions*», 3rd International Conference on «Multi-Functional Materials and Structures», Jeonju, Korea, 14-18 September.
3. Pandermarakis Z.G., Sotiropoulou A.B., **Nikoloutsopoulos N.D.**, (2010), «*Structural integrity breakdown of fiber reinforced cement based composites after their exposure to high temperatures*», 1st National Conference on «Fracture Mechanics of Materials and Structures», Xanthi, Greece, 20-23 October.
 4. Kortesi V., Sotiropoulou A.B., Pandermarakis Z.G., **Nikoloutsopoulos N.D.**, (2011), «*Fracture Response Variations of Concrete Elements due to Dehydration Processes during their Exposure to Fire Conditions*», 2nd International Conference of Engineering Against Fracture (ICEAF II), Mykonos, Greece, 22-24 June.
 5. Pandermarakis Z.G., Sotiropoulou A.B., **Nikoloutsopoulos N.D.**, (2011), «*The Influence of Short Glass and Polypropylene Fibers on First Crack Formation and Toughness of Cement Based Composites after their Exposure to Fire Conditions*», in Proc., 10th International Conference on «Fracture and Damage Mechanics (FDM2011)», Dubrovnik, Croatia, 19-21 September.
 6. Athanasopoulou A., **Nikoloutsopoulos N.**, Neroutsou A., (2016), «*An experimental study on the effect of chemical admixtures on unreinforced concrete mechanical behavior*», 11th HSTAM International Congress on Mechanics Athens, Greece, 27 – 30 May.
 7. **Nikoloutsopoulos N.**, Athanasopoulou A., Mamai E., (2016), «*Investigation on the effect of ordinary portland cement type on fresh and hardened concrete properties*», 11th HSTAM International Congress on Mechanics Athens, Greece, 27 – 30 May.
 8. Gavela S., **Nikoloutsopoulos N.**, Papadakos G., Passa D., Sotiropoulou A., (2018), «*Multifactorial experimental analysis of concrete compressive strength as a function of time and water to cement ratio*», 1st International Conference of the Greek Society of Experimental Mechanics of Materials, Athens, Greece, 10-12 May.
 9. **Nikoloutsopoulos N.**, Passa D., Gavela S., Sotiropoulou A., (2018), «*Comparison of shear strengthening technics of reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymers (CFRPs)*», 1st International Conference of the Greek Society of Experimental Mechanics of Materials, Athens, Greece, 10-12 May.
 10. **Nikoloutsopoulos N.D.**, Nikolopoulou S.P., Pandermarakis Z.G., (2021), «*Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Cement Mortar Composites with Variable Water/Cement Ratio*», 4th International Symposium on Advance Materials and Applications (ISAMA), Incheon, South Korea, 05-07 February.
 11. **Nikoloutsopoulos N. D.**, Pandermarakis Z. G., Papadioti A., Douvis P., (2021), «*Complete Experimental Investigation for Short Polypropylene Fiber Reinforced Cement Mortars*», 11th International Conference on Key Engineering Materials (ICKEM), Moscow, Russia, 26-29 March.

12. **Nikoloutsopoulos N.**, Sahinidis A., Panagopoulou M., (2021), «*The Role of Organizational External Environment in Motivating Office and Construction Site Employees*», International Conference of School of Business Administration in Karvina, Opava, Czech Republic, 13-14 May.
13. **Nikoloutsopoulos N.**, Sotiropoulou A., Passa D., (2022), «*Deep embedment and NSM techniques for shear strengthening of reinforced concrete with cFRP rope*», 38th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Poros, Greece, 20-23 September.

6.3. Ελληνικά συνέδρια με κριτές και πρακτικά

1. Πανδερμαράκης Ζ.Γ., Σωτηροπούλου Α.Β., **Νικολουτσόπουλος Ν.Δ.**, (2009), «*Μελέτη της μείωσης της αντοχής ινοπλισμένων κονιαμάτων, κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες*», 16^ο Συνεδρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος, Κύπρος, – Δ' Τόμος Πρακτικών σελ. 578-589, Οκτώβριος.
2. **Νικολουτσόπουλος Ν.Δ.**, Σωτηροπούλου Α.Β., Πανδερμαράκης Ζ.Γ., (2009), «*Έλεγχος της μηχανικής συμπεριφοράς ενισχυμένων με ίνες υάλου και πολυπροπυλενίου, κονιαμάτων, μετά τη θερμική τους καταπόνηση σε συνθήκες πυρκαγιάς*», Πρακτικά του Συνεδρίου «Η εκπαίδευση των εκπαιδευτικών της δευτεροβάθμιας επαγγελματικής και τεχνολογικής εκπαίδευσης στην Ελλάδα», ΑΣΠΑΙΤΕ, Δεκέμβριος.
3. Πασσά Δ., Σωτηροπούλου Α., Γκαβέλα Σ, **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Τσίγκος Α., Τσάνη Π., (2017), «*Μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας νέων κονιαμάτων που περιέχουν ροκανίδι και πριονίδι*», 3^ο Επιστημονικό Συνέδριο Επαγγελματική Εξέλιξη & Ανάπτυξη του Τεχν. Εκπαιδευτικού, ΑΣΠΑΙΤΕ, Μάιος.
4. **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Πασσά Δ., Σερέτης Σ., Κωστόπουλος Δ., Γκαβέλα Σ., Αντωνόπουλος Κ., Σωτηροπούλου Α., (2017), «*Ενίσχυση Δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε διάτμηση με σύνθετα υλικά*», 3^ο Επιστημονικό Συνέδριο Επαγγελματική Εξέλιξη & Ανάπτυξη του Τεχν. Εκπαιδευτικού, ΑΣΠΑΙΤΕ, Μάιος.
5. Γκαβέλα Σ., Σωτηροπούλου Α., **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Πασσά Δ., Παπαδάκος Γ., (2017), «*Μηχανικές ιδιότητες νέων κονιαμάτων που περιέχουν ροκανίδι και στατιστική μοντελοποίηση αυτών.*», 3^ο Επιστημονικό Συνέδριο Επαγγελματική Εξέλιξη & Ανάπτυξη του Τεχν. Εκπαιδευτικού, ΑΣΠΑΙΤΕ, Μάιος.
6. **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Σωτηροπούλου Α., Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., (2017), «*Επίδραση του λογού Στερεό/Υγρό στο χρόνο πήξης, στην εργασιμότητα και στην θλιπτική αντοχή γεωπολυμερούς από ιπτάμενη τεφρά*», 11^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής (ΠΕΣΧΜ) , Θεσσαλονίκη.
7. **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Νικολοπούλου Σ., (2018), «*Πειραματική διερεύνηση τιμεντοκονιάματος ινοπλισμένου με ίνες πολυπροπυλενίου με μεταβλητό λόγο Νερό/Τσιμέντο*», 18^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αθήνα, Μάρτιος.
8. **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Σωτηροπούλου Α., Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., (2018), «*Επίδραση των χημικών προσμίκτων στο χρόνο πήξης, στην εργασιμότητα και στην*

- θλιπτική αντοχή γεωπολυμερούς από ιπτάμενη τέφρα», 18^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αθήνα, Μάρτιος.
9. Γκαβέλα Σ., Παπαδάκος Γ., **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Πασσά Δ., Σωτηροπούλου Α., (2018), «Προσδιορισμός της αβεβαιότητας κατά τη δοκιμή της αντοχής σκυροδέματος σε θλίψη με Τύπου Α εκτίμηση», 18^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αθήνα, Μάρτιος.
 10. **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Πασσά Δ., Γκαβέλα Σ., Αντωνόπουλος Κ., Σωτηροπούλου Σ., (2018), «Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς σε διάτμηση δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένων με σύνθετα υλικά», 18^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος Αθήνα, Μάρτιος.
 11. Κατσιαούνης Α., **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Αναγνωστόπουλος Ν., (2018), «Ενίσχυση σε κάμψη δοκών με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών άνθρακα σε εγκοπή», 18^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αθήνα, Μάρτιος.
 12. **Νικολουτσόπουλος Ν.**, Σωτηροπούλου Α., Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., (2019), «Μηχανικές ιδιότητες γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων από ιπτάμενη τέφρα. Σύγκριση με συμβατικά σκυροδέματα», 12^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής (ΠΕΣΧΜ) , Αθήνα, Μάιος.

7. ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΙΣ ΣΕ ΗΜΕΡΙΔΕΣ – ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ

1. **Νικολουτσόπουλος Ν.Δ.**, (2006), «Παραγωγή και χρήση Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος», Ημερίδα ΑΣΠΑΙΤΕ, Απρίλιος.
2. Σωτηροπούλου Α.Β., Πανδερμαράκης Ζ.Γ., **Νικολουτσόπουλος Ν.Δ.**, Πασσά Δ.Σ., (2012), «Πειραματική Μελέτη Ενισχυμένων Κονιαμάτων που Χρησιμοποιούνται στην Αποκατάσταση Παραδοσιακών Κτισμάτων», 2^ο Διαπανεπιστημιακό Σεμινάριο Βιώσιμης Ανάπτυξης Πολιτισμού και Παράδοσης, Σύρος, Ιούλιος.

8. ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΒΡΑΒΕΙΑ

1. Υποτροφία από τον Ε.Λ.Κ.Ε του Ε.Μ.Π. για την πραγματοποίηση Διδακτορικής Διατριβής από τον Ιούνιο 2017 έως τον Ιούνιο 2021.
2. Paper award: 1st Price for a Young Scientist from the Greek Society of Experimental Mechanics of Materials for a paper I co-authored: Gavela S., **Nikoloutsopoulos N.**, Papadakos G., Passa D., Sotiropoulou, A., (2018), «*Multifactorial experimental analysis of concrete compressive strength as a function of time and water to cement ratio*», 1st Inter. Conf. of the GSEMM, Athens, Greece, May 10-12.
3. Best Paper in Sustainable Development, Culture, Traditions Journal (SDCT-Journal) Vol. 2102/1A entitled «*Experimental Study of Fiber reinforced Mortars that are used in the Restoration of Traditional Buildings*».