



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Εργαστήριο Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων

Διπλωματική Εργασία

**«Επίδραση Στερεών Αποβλήτων στην Ποιότητα του
Τσιμεντοκονιάματος»**

ΝΙΚΟΛΙΑ ΣΤΩΪΚΟΥ



Εξεταστική Επιτροπή:

Ευάγγελος Γιδαράκος (Επιβλέπων Καθηγητής)

Κωνσταντίνος Προβιδάκης (Καθηγητής)

Ιωάννης Γεντεκάκης (Καθηγητής)

Αναπληρωματικό Μέλος: Ιωάννης Τσομπανάκης (Αν. Καθηγητής)

Χανιά, Σεπτέμβριος 2017

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της. Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου, κ. Ευάγγελο Γιδαράκο, για την ανάθεση αυτού του πολύ ενδιαφέροντος θέματος και για όλες τις γνώσεις που μου μετέφερε κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Στην εργασία αυτή, μου δόθηκε η ευκαιρία να κατανοήσω τη σημασία της ορθής διαχείρισης στερεών αποβλήτων, καθώς και την επιτακτική ανάγκη για ανεύρεση αποτελεσματικών μεθόδων αξιοποίησης, οι οποίες μπορούν να συνεισφέρουν στην μείωση του όγκου των παραγόμενων αποβλήτων.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη, Ιωάννη Γεντεκάκη και Ιωάννη Τσομπανάκη για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και για την αξιολόγηση της εργασίας μου

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα κα. Βασιλική Σαββιλωτίδου για την πολύτιμη βοήθειά της. Η συμβολή της ήταν καθοριστική, καθώς σε οποιαδήποτε δυσκολία μου, ήταν πάντα διαθέσιμη και πρόθυμη να με καθοδηγήσει. Επίσης, ευχαριστώ την κα. Ελένη Καστανάκη και τον κ. Ιωάννη Μουκαζή για τη βοήθεια τους σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε στο Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κα. Άννα Κρητικάκη από το Εργαστήριο Τεχνολογιών Διαχείρισης Μεταλλευτικών και Μεταλλουργικών Αποβλήτων και Αποκατάστασης Εδαφών, τον κ. Στέλιο Μαυριγιαννάκη από το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων, τον κ. Βαγγέλη Λιαράκο από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής και τον κ. Γιώργο Αποστολάκη (Παρασκευαστήριο – Εργαστήριο Λείανσης Πετρωμάτων) για την πολύτιμη βοήθειά τους στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, που μου έδωσαν την δυνατότητα να πραγματοποιήσω τους στόχους μου, καθώς όλα αυτά τα χρόνια στήριζαν τις επιλογές μου και ήταν στο πλευρό μου.

Νικολία Στωϊκού

Χανιά, 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανεξέλεγκτη απόρριψη στερεών αποβλήτων, καθώς και η μη ορθή διαχείρισή τους συμβάλλουν τόσο στη ρύπανση του περιβάλλοντος (έδαφος, υπόγεια ύδατα, ατμόσφαιρα), όσο και στην αισθητική υποβάθμισή του. Τα τελευταία χρόνια η αξιοποίηση στερεών αποβλήτων στον κατασκευαστικό τομέα για την παραγωγή δομικών υλικών αποτελεί μία από τις πιο σύγχρονες τάσεις της περιβαλλοντικής μηχανικής στα πλαίσια της εναλλακτικής διαχείρισης. Προς την κατεύθυνση της εναλλακτικής διαχείρισης, το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στη χρήση στερεών αποβλήτων για την παραγωγή δομικού υλικού και πιο συγκεκριμένα τσιμεντοκονιάματος. Ως τσιμεντοκονίαμα νοείται το μείγμα που αποτελείται από αδρανή (άμμο), τσιμέντο και νερό και χρησιμοποιείται στη σύνθεση δομικών υλικών, στη δόμηση των τοιχοποιιών, στην παρασκευή επιχρισμάτων και στη στεγανοποίηση χώρων.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν ανόργανα απόβλητα (ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη, γυαλί), καθώς και οργανικά απόβλητα (πλαστικό, πυρηνόξυλο), ως πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμεντοκονιάματος. Τα απόβλητα αυτά αναμίχθηκαν με τα φυσικά υλικά αντικαθιστώντας (α) τα αδρανή και / ή, (β) το τσιμέντο, προσφέροντας συνάμα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά την προεπεξεργασία των αποβλήτων (ανάκτηση και τεμαχισμός γυαλιού, τεμαχισμός πλαστικού και πυρηνόξυλου) ώστε να αποκτήσουν κατάλληλη μορφή και επιθυμητή κοκκομετρία (διάμετρος <4 mm). Ακολούθως εξετάζεται η αναλογία μίγματος (α) αποβλήτου: αδρανών, και (β) αποβλήτου: τσιμέντου παρασκευάζοντας κυβικά δοκίμια (5 cm) τα οποία μελετώνται ως προς τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν. Επίσης, πραγματοποιούνται πρότυπες δοκιμές ανθεκτικότητας προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των υλικών και να διαπιστωθεί αν πληρούνται οι απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας, προκύπτει ότι η ποιότητα του τσιμεντοκονιάματος, δηλαδή οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζει, επηρεάζονται από την προσθήκη αποβλήτων στο μείγμα. Οι κύριες παράμετροι επίδρασης είναι το είδος και η ποσότητα (% κατά βάρος) του αποβλήτου που προστίθεται, καθώς και η αντικατάσταση της πρώτης ύλης ((α) αδρανή ή (β) συνδετικό υλικό).

ABSTRACT

The uncontrolled waste disposal and its improper management contribute to the environmental pollution (soil, underground water, atmosphere) and to the aesthetic degradation of the environment. Over the last years, using solid waste in the construction field, in order to produce building materials, constitutes one of the most modern methods as alternative management. Towards the direction of alternative management, this project focuses on the usage of solid waste in order to produce building materials, specifically cement mortar. Cement mortar is constituted by a mixture of aggregates (sand), cement and water and it is used in composing building materials, masonry construction, preparation of coating and waterproofing.

During the experiment, inorganic wastes (lignite fly ash, glass) and organic wastes (plastic, olive stone) were used as raw materials for the cement mortar production. These particular wastes were mixed with natural materials in order to replace (a) the aggregates and / or, (b) the cement whilst there are environmental and economic benefits.

The experimental procedure includes the waste pretreatment (recovery and glass cutting, plastic and olive stone cutting) in order to be in the right form and desirable size (diameter < 4 mm). Subsequently, the mixing ratios are examined (a) waste: aggregates (b) waste: cement and cubic specimens (5 cm) are constructed, whose mechanical and physical properties are studied. In addition, standard durability tests are conducted in order to examine the material behavior and ascertain the required technical specifications.

According to the experimental results, the cement mortar quality (mechanical physical properties) is influenced by the wastes been added in it. The main factors of influence are related to the kind and the amount of waste and the raw material replacement ((a) aggregates (b) binder).

Contents

Ευχαριστίες	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
Ευρετήριο Εικόνων, Πινάκων και Διαγραμμάτων	vi
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	4
2.1 Ιπτάμενη Λιγνιτική τέφρα.....	4
2.1.1 Διαχείριση της τέφρας.....	5
2.2 Πυρηνόξυλο	8
2.2.1 Διαχείριση του πυρηνόξυλου	10
2.3 Γυαλί από οθόνες LCD	12
2.3.1 Διαχείριση του γυαλιού LCD.....	13
2.4 Πλαστικό από ηλεκτρονικά απόβλητα	15
2.4.1 Διαχείριση του πλαστικού	16
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	18
3.1 Στόχος της πειραματικής διαδικασίας.....	18
3.2 Προεπεξεργασία υλικών.....	19
3.2.1 Ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα	19
3.2.2 Πυρηνόξυλο	22
3.2.3 LCD Γυαλί	22
3.2.4 Πλαστικό	24
3.3 Σύνθεση τσιμεντοκονιάματος.....	25
3.3.1 Αναλογίες αντικατάστασης άμμου ή τσιμέντου	28
3.4 Χαρακτηρισμός νωπού κονιάματος.....	28
3.4.1 Εξάπλωση.....	29
3.4.2 Αερισμός	30
3.4.3 Λόγος νερού/τσιμέντου (N/T)	32
3.5 Χαρακτηρισμός σκληρυμένων δοκιμίων	33
3.5.1 Μηχανικές ιδιότητες.....	33
3.5.2 Φυσικές ιδιότητες.....	34
3.5.3 Δοκιμή ενανθράκωσης	35
3.5.4 Δοκιμή διείδυσης χλωριόντων	36
3.5.5 Δοκιμή σε περιβάλλον θετικών ιόντων.....	38

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	39
4.1 Χαρακτηριστικά νωπού κονιάματος.....	39
4.2 TCLP Ανάλυση	44
4.3 Μηχανικές ιδιότητες.....	45
4.3 Φυσικές ιδιότητες.....	56
4.4 Δοκιμή ενανθράκωσης	60
4.5 Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων	61
4.6 Δοκιμή σε περιβάλλον θειικών ιόντων.....	63
5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
6.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ.....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	68

Ευρετήριο Εικόνων, Πινάκων και Διαγραμμάτων

Εικόνα 1. Διαδικασία παραγωγής πυρηνόξυλου (Δουρουντάκης, 2012)	9
Εικόνα 2. Λιγνιτική τέφρα με άμμο	19
Εικόνα 3.Βερμικουλίτης με ίνες προπυλενίου	21
Εικόνα 4. (α) Μαχαιρόμυλος puluerisette 19 FRITCH, (β) τεμαχισμένο πυρηνόξυλο	22
Εικόνα 5.Απομάκρυνση πολωτή από οθόνη LCD	23
Εικόνα 6. Γυαλί σε θραύσματα (αριστερά), γυαλί σε σκόνη (δεξιά)	23
Εικόνα 7. Τεμαχισμός πλαστικού καλωδίου	24
Εικόνα 8. Τριμμένο πλαστικό	24
Εικόνα 9. Μηχανικός αναδευτήρας.....	26
Εικόνα 10. Νωπό κονίαμα σε μήτρες (α), σκληρυμένα δοκίμια μετά από 24 ώρες (b)	27
Εικόνα 11. Δοκίμια με πυρηνόξυλο	28
Εικόνα 12.Νωπό κονίαμα στην κωνική μήτρα εξάπλωσης	30
Εικόνα 13. Νωπό κονίαμα στην τράπεζα εξάπλωσης	30
Εικόνα 14. Μηχανή θλιπτικής αντοχής.....	33
Εικόνα 15. Διαδικασία προσδιορισμού πορώδους υπό κενό αέρα.....	35
Εικόνα 16. Βάθος ενανθράκωσης (Jiang et al., 2017)	36
Εικόνα 17. Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων σε διάλυμα 5% NaCl	37
Εικόνα 18 .Βάθος διείσδυσης χλωριόντων (Higashiyama et al., 2012).....	37
Εικόνα 19. Δοκιμή Sulfate attack σε διάλυμα 5% Na ₂ SO ₄	38
Πίνακας 1.Όρια TCLP ανάλυσης (EHSO,2016)	20
Πίνακας 2.Αναλογίες υλικών	25

Πίνακας 3.Αναλογίες αντικατάστασης άμμου και τσιμέντου από τα απόβλητα	28
Πίνακας 4. Κωδικοποίηση δοκιμών.....	39
Πίνακας 5.Αποτελέσματα ιδιοτήτων νωπού κονιάματος	41
Πίνακας 6.Αποτελέσματα ανάλυσης TCLP σε δοκίμια με λιγνιτική τέφρα	44
Πίνακας 7.Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμών τέφρας	45
Πίνακας 8.Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμών LCD γυαλιού	49
Πίνακας 9. Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμών με πλαστικό	52
Πίνακας 10.Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμών με πυρηνόξυλο	55
Πίνακας 11. Βέλτιστες τιμές θλιπτικής αντοχής.....	56
Πίνακας 12. Αποτελέσματα φυσικών ιδιοτήτων.....	56
Πίνακας 13. Σύγκριση φυσικών ιδιοτήτων πυρηνόξυλου με βιβλιογραφικές πηγές.....	59
Πίνακας 14. Τιμές ενανθράκωσης σπασμένων δοκιμών	61
Πίνακας 15. Βάθος διείδυσης ιόντων χλωρίου	62
Πίνακας 16. Αποτελέσματα της δοκιμής σε περιβάλλον θεικών ιόντων.....	64

Διάγραμμα 1.Ποσοστό πλαστικών στα ηλεκτρονικά απόβλητα (Menad et al., 2016).....	15
Διάγραμμα 2. Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών	25
Διάγραμμα 3. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει του λόγου N/T (Domonone and Thurairatnam, 1986)	32
Διάγραμμα 4.Θλιπτική αντοχή συναρτήσει της περιεχόμενης τέφρας (%) ως αδρανές υλικό	46
Διάγραμμα 5. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει της περιεχόμενης τέφρας (%) ως συνδετικό υλικό	46
Διάγραμμα 6. Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της περιεχόμενης τέφρας (%) ως αδρανές υλικό	47
Διάγραμμα 7. Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της περιεχόμενης τέφρας (%) ως συνδετικό υλικό	47
Διάγραμμα 8. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει του περιεχόμενου γυαλιού LCD (%) ως αδρανές υλικό	49
Διάγραμμα 9.Θλιπτική αντοχή συναρτήσει του περιεχόμενου γυαλιού LCD (%) ως συνδετικό υλικό	50
Διάγραμμα 10. Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει του περιεχόμενου γυαλιού LCD (%) ως αδρανές υλικό.....	50
Διάγραμμα 11. Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει του περιεχόμενου γυαλιού LCD (%) ως συνδετικό υλικό	51
Διάγραμμα 12. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει του περιεχόμενου πλαστικού (%) ως αδρανές	53
Διάγραμμα 13. Μέτρο ελαστικότητας- συναρτήσει του περιεχόμενου πλαστικού (%) ως αδρανές.....	53

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συνεχώς αυξανόμενες ποσότητες στερεών αποβλήτων συνιστούν σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα, καθώς από τη μία η παραγωγή τους αντιπροσωπεύει απώλεια πόρων, με τη μορφή υλικών και ενέργειας, και από την άλλη η τυχόν εναπόθεση ή η μη ορθή διαχείρισή τους ελλοχεύει κινδύνους για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα της Eurostat, εκτιμάται ότι κάθε χρόνο παράγονται 1.3 δις τόνοι αποβλήτων στην Ευρώπη, εκ των οποίων 250 εκατομμύρια τόνοι είναι αστικά απόβλητα και 850 εκατομμύρια είναι βιομηχανικά απόβλητα, αντίστοιχα (**European Environmental Agency, 2016**). Συν αυτού, οι χώροι υγειονομικής ταφής και οι υφιστάμενες μέθοδοι διαχείρισης δεν επαρκούν για την αντιμετώπιση των παραγόμενων ποσοτήτων αποβλήτων και της επερχόμενης αύξησής τους, με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης.

Η προσθήκη στερεών αποβλήτων σε δομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα ή το τσιμεντοκονίαμα αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο αξιοποίησής κατά την οποία οι πρώτες ύλες (αδρανή, συνδετικά υλικά) που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον τομέα των κατασκευών αντικαθίστανται από δευτερογενείς πρώτες ύλες. Με αυτόν τον τρόπο παράγονται χρήσιμα υλικά με επιθυμητά χαρακτηριστικά και / ή βελτιωμένες ιδιότητες, οι οποίες αποδίδονται στη φύση του αποβλήτου και μπορούν να το καταστήσουν κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές. Σε προγενέστερες μελέτες έχει διερευνηθεί η χρήση διαφόρων ειδών αποβλήτων, οργανικών και ανόργανων για την παραγωγή δομικών στοιχείων. Μεταξύ άλλων, παράδειγμα αποτελεί η χρήση γεωργικών αποβλήτων, (όπως κέλυφος αραβοσίτου, φλοιός ρυζιού, φελλός, κέλυφος στρειδιού, καλάμι μπαμπού, τέφρα φοινικέλαιου και απόβλητα καπνού) τα οποία προσδίδουν πολύ καλές ιδιότητες αντοχής και θερμομόνωσης σε σκυρόδεμα και κονίαμα(**Prusty et al, 2016; Awal and Mohammadhosseini, 2016**). Αντίστοιχες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με προσθήκη υλικών, όπως το γυαλί, το πλαστικό (**Manjunath Ashwini , 2016; Wang, 2009**), η τέφρα επικίνδυνων αποβλήτων από μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (**Coo and Pheeraphan, 2016**) και η τέφρα από την καύση ιατρικών αποβλήτων (**Akyildiz et al., 2017**).

Ταυτόχρονα με την αξιοποίηση των αποβλήτων, στην περίπτωση που τα δομικά υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κτιρίων, ενισχύεται η εξοικονόμηση ενέργειας

Η Οδηγία 2010/31/ΕΕ της Ευρωπαϊκής Ένωσης, θέτει ως στόχο τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας έως 20% για την κατασκευή κτιρίων μέχρι το 2020. Η ανάγκη έκδοσης της Οδηγίας αυτής απορρέει από το γεγονός ότι τα κτίρια ευθύνονται για το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Μάλιστα, σύμφωνα με την επιστημονική κοινότητα (**Meyer, 2009**), η βιομηχανία παραγωγής δομικών υλικών αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές φυσικών πόρων και οδηγεί στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το τσιμέντο, καθώς έρευνες επισημαίνουν ότι η παραγωγή 1 τόνου τσιμέντου οδηγεί αντίστοιχα στην παραγωγή 1 τόνου CO₂ (**Wallah and Hardjito, 2015**). Ως εκ τούτου, υπολογίζεται ότι σε συνδυασμό με την δημογραφική αύξηση και την εκτεταμένη εκβιομηχάνιση η ρύπανση από την παραγωγή του τσιμέντου σε λίγα χρόνια θα αντιπροσωπεύει το 17 % των εκπομπών CO₂ παγκοσμίως (**Damilola, 2013**). Προς την κατεύθυνση της πρόληψης, μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση ανακυκλωμένων υλικών ως αδρανή ή η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου από αυτά μπορούν να επιφέρουν σημαντικό όφελος στη βελτίωση της αειφορίας των κτιρίων (**Kwan et al., 2012; Marie and Quiasrawi, 2012**).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η σύνθεση τσιμεντοκονιάματος με προσθήκη (α) ιπτάμενης λιγνιτικής τέφρας, (β) πυρηνόξυλου, (γ) γυαλιού από οθόνες LCD και (δ) πλαστικού από ηλεκτρονικά απόβλητα.

(α) Η ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα αποτελεί υποπροϊόν της καύσης λιγνίτη στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, και στην Ελλάδα η παραγωγή της υπολογίζεται σε 13.000.000 τόνους ετησίως. Η ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα αξιοποιείται σε μικρό βαθμό στον ελλαδικό χώρο, περίπου 15 %, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται και με την βροχή να παρασύρεται και να εισχωρεί σε κοντινές καλλιέργειες και υδροφορείς (**Στιβανάκης, 2003**).

(β) Το πυρηνόξυλο, παράγωγο ελαιουργείων, προκύπτει κατά τη διάρκεια παραγωγής ελαιολάδου και η παραγωγή του στην Ελλάδα ανέρχεται περίπου σε 50.000 τόνους ετησίως. Μέχρι σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για την παραγωγή θερμικής ενέργειας με βαθμό απόδοσης 70-80 % (**Βασίλειος, 2009**).

(γ) Το LCD γυαλί και το πλαστικό είναι δύο απόβλητα που προκύπτουν από ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, μια κατηγορία αποβλήτων που η ποσότητά τους

αυξάνεται με ποσοστό 16-28 % κάθε 5 χρόνια (**Crowe et al., 2003**). Εκτιμάται ότι η Ελλάδα βρίσκεται στην 22^η θέση στον τομέα της ανακύκλωσης Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ). Υπολογίζεται, επίσης, ότι κάθε χρόνο συσσωρεύονται στους χώρους ταφής της μέχρι και 200,000 τόνοι ηλεκτρονικών αποβλήτων.

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης των προαναφερθέντων αποβλήτων στην ποιότητα του τσιμεντοκονιάματος, εξετάστηκαν διαφορετικές αναλογίες αποβλήτου στο μίγμα σύνθεσης, καθώς επίσης η αντικατάσταση (α) αδρανών ή / και (β) τσιμέντου με απόβλητο, και επίσης, η ηλικία των δοκιμών (7 και 28 ημέρες). Για τον χαρακτηρισμό του νωπού κονιάματος προσδιορίστηκε η ροή του μίγματος (δοκιμή εξάπλωσης), ο περιεχόμενος αέρας και ο λόγος νερού/τσιμέντο (N/T). Έπειτα, προσδιορίστηκαν οι φυσικές (πυκνότητα, πορώδες, υδατοαπορροφητικότητα) και μηχανικές (αντοχή σε θλίψη, μέτρο ελαστικότητας) ιδιότητες των κονιαμάτων, καθώς και η ανθεκτικότητά τους σε συνθήκες διάβρωσης (δοκιμή ενανθράκωσης, δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων, δοκιμή σε περιβάλλον θεικών ιόντων).

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Ιπτάμενη Λιγνιτική τέφρα

Η καύση του λιγνίτη συνοδεύεται από την παραγωγή παραπροϊόντων. Ένα από τα κύρια παραπροϊόντα των θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας είναι η ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα (ΙΛΤ). Πρόκειται για ένα ανόργανο, στερεό, κονιώδες και λεπτόκοκκο υλικό το οποίο συλλέγεται από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα των εγκαταστάσεων αποκονίωσης κατά την έξοδο από τα φουγάρα.

Ορυκτολογικά η ΙΛΤ αποτελείται από ένα μείγμα ετερογενών υλικών που περιέχει άμορφες και κρυσταλλικές φάσεις, καθώς και από άμορφο υλικό κυρίως ασβεστίτη, χαλαζία, ανυδρίτη, άσβεστο, αστρίους και πορτλανδίτη σε μικρότερες ποσότητες. Επίσης, εμφανίζονται σε μικρό ποσοστό μαρμαριγία, αργιλικά ορυκτά και γκελενίτης. Ορισμένα δείγματα περιέχουν επίσης γύψος και αιματίτης. Το ολικό ποσοστό του άμορφου υλικού κυμαίνεται από 3-37 % κ.β. Τα περισσότερα από τα κύρια στοιχεία της τέφρας (Si, Al, Ca, Mg, Fe, Na) δεν είναι επικίνδυνα για το περιβάλλον. Ωστόσο, τα περισσότερα πτητικά ιχνοστοιχεία (B, Cd, Cr, Co, Se, As) συμπυκνώνονται στην επιφάνεια των σωματιδίων της, ενώ μπορούν να εκπλυθούν από το νερό και είναι περισσότερο τοξικά σε χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης από ότι τα κύρια στοιχεία (Τύπου,1999).

Όσον αφορά την μορφολογία της ΙΛΤ, αποτελείται από ακανόνιστα, ωοειδή και σφαιρικά σωματίδια, ενώ εντοπίζονται ακόμη πληροσφαιρίδια, κενοσφαιρίδια, και σφαιρικά σωματίδια με την διάμετρό τους να εκτιμάται μικρότερη από 10 μm. Η συγκεκριμένη διάμετρος τα καθιστά εσπνεύσιμα από τον ανθρώπινο οργανισμό, άρα και επικίνδυνα για την υγεία. Συνήθως, τα σωματίδια με μικρή διάμετρο είναι εύκολο να ανααιωρηθούν προκαλώντας ατμοσφαιρική ρύπανση ($d < 60 \mu m$) σε συνδυασμό με αυτά που διαφεύγουν από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα των καπνοδόχων. (Adamidou et al., 2005).

Υπάρχουν δύο κατηγορίες στις οποίες μπορούμε να κατατάξουμε την τέφρα ανάλογα με το είδος της, ο τύπος C και ο τύπος F. Ο τύπος τέφρας F παράγεται από καύση ανθρακίτη ή βιταμινούχου κάρβουνου με τουλάχιστον 70 % SiO_2 , Al_2O_3 , και Fe_2O_3 . Ο τύπος τέφρας C προέρχεται από καύση λιγνίτη και υπό-βιταμινούχου κάρβουνου και περιέχει τουλάχιστον 50 %, αλλά λιγότερο από 70 % SiO_2 , Al_2O_3 , και Fe_2O_3 (Θεοφυλάκτου, 2015). Οι

ελληνικές υπτάμενες τέφρες ανήκουν στην κατηγορία C σύμφωνα με το ASTM C 618, λόγω των υψηλών ποσοτήτων CaO που περιέχουν (Στιβανάκης, 2003).

Η αυξανόμενη χρήση των στερεών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας έχει οδηγήσει στην αύξηση της παραγόμενης ποσότητας υπτάμενης τέφρας χωρίς αυτή να αξιοποιείται σε επαρκή βαθμό προκειμένου να μειωθούν τα προβλήματα που απορρέουν από αυτή. Στη χώρα μας, η ποσότητά της ετησίως ανέρχεται περίπου στους 13 εκατομμύρια τόνους με μόνο το 15 % να αξιοποιείται.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, τα σωματίδια της τέφρας εισπνεόμενου μεγέθους ($<10\ \mu\text{m}$) εισέρχονται και βιοσυσσωρεύονται στις κυψελίδες των πνευμόνων με αποτέλεσμα την αυξημένη συχνότητα εμφάνισης παθήσεων του ανώτερου και κατωτέρου αναπνευστικού συστήματος, αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης αγγειακών διαταραχών και στεφανιαίας νόσου, αλλά και υψηλά ποσοστά πρόωρων θανάτων από καρκίνους. Επίσης, η φυσική ραδιενέργεια, που υπάρχει στον λιγνίτη, ενδέχεται να απελευθερώνεται κατά την καύση, χωρίς ωστόσο αυτό να έχει εξακριβωθεί (Adamidou et al., 2005).

2.1.1 Διαχείριση της τέφρας

Οι αρνητικές συνέπειες της ΙΛΤ στο περιβάλλον και στην υγεία του ανθρώπου δημιουργούν την ανάγκη διερεύνησης εναλλακτικών μεθόδων για την ορθή διαχείριση και την αξιοποίηση του αποβλήτου.

Μέχρι σήμερα η ΙΛΤ εναποτίθεται σε διαθέσιμες εδαφικές εκτάσεις, συνήθως κοντά στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ή σε ανενεργά λιγνιτωρυχεία. Ωστόσο, αυτή η επιλογή δεν είναι πλέον διαθέσιμη, καθώς αφενός δεν είναι εύκολη η εύρεση τέτοιων χώρων εναπόθεσης, και αφετέρου λόγω των πολυάριθμων και σοβαρών προβλημάτων που προκύπτουν από την ρύπανση του νερού και του εδάφους. Το υπερκείμενο υγρό σε αυτούς τους χώρους αποβάλλεται σε επιφανειακά ρεύματα, λόγω κορεσμού των πόρων με νερό σε περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων. Ακόμα και στην περίπτωση ενός σωστά δομημένου χώρου εναπόθεσης τέφρας εκτιμάται ότι είναι πρακτικά αδύνατο να αποφευχθεί η έκπλυση από όμβρια ύδατα και επομένως η ρύπανση των επιφανειακών και υπογείων νερών. Όσον αφορά το έδαφος, προκαλείται η αλλοίωσή του, επιφέροντας αύξηση αλατότητας, μεταβολή του pH και μείωση της γονιμότητάς του. Πρόσθετα προβλήματα

εμφανίζονται στην περίπτωση ανεμοθύελλας λόγω μεταφοράς της τέφρας σε κοντινές περιοχές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εναπόθεσή της σε καλλιέργειες κηπευτικών και κατά συνέπεια εισαγωγή της στην τροφική αλυσίδα (**Τύπου, 1999**).

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, προκύπτει η ανάγκη για νέες εναλλακτικές λύσεις με σκοπό την περιβαλλοντική προστασία και το οικονομικό όφελος.

- Κατασκευαστικός τομέας

Η ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό σε δρόμους, γέφυρες και άλλου είδους έργα. Ελαφρά αδρανή από τέφρα μπορούν να αντικαταστήσουν ικανοποιητικά τα φυσικά ελαφρά αδρανή, όπως άργιλο και σχιστόλιθο, και να χρησιμοποιηθούν είτε σε ασφαλτοστρώσεις είτε στην διαδικασία παραγωγής τσιμέντου, τούβλων και σκυροδέματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του φράγματος της Πλατανόβρυσης, για την κατασκευή του οποίου χρησιμοποιήθηκαν 150.000 τόνοι τέφρας από το εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής στην περιοχή της Πτολεμαΐδας (**Στεφανάκος και Τσικνάκου, 2005; Tsimas and Moutsatsou-Tsima, 2005**).

Σε ερευνητικό επίπεδο σύμφωνα με μελέτες, έχει διαπιστωθεί ότι η αντικατάσταση τσιμέντου 5 και 10 % από ιπτάμενη τέφρα συμβάλλει στην δημιουργία σκυροδέματος με βελτιωμένη θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας (**Chousidis et al., 2015**), ενώ η αντικατάσταση τσιμέντου σε ποσοστό 30 % έχει αποδειχτεί ότι συμβάλλει στην διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (**Sua-iam and Makul, 2014**). Η μέγιστη αναλογία αντικατάστασης τσιμέντου από τέφρα σε δομικά υλικά, ώστε να διατηρούνται οι απαιτούμενες ιδιότητες, δεν έχει προσδιοριστεί καθώς σύμφωνα με την μελέτη των **Dinakar et al. (2013)**, η προσθήκη τέφρας μεγαλύτερη από 50 % οδηγεί σε 50% μείωση της θλιπτικής αντοχής, 50 % μείωση της εφελκυστικής αντοχής και 30 % μείωση του μέτρου ελαστικότητας αντίστοιχα (**Dinakar et al., 2013**), ενώ οι **Arezoumandi and Volz (2013)** συμπεραίνουν ότι η προσθήκη τέφρας κλάσης C σε ποσοστό 70 % προσδίδει μεγαλύτερη διατμητική αντοχή συγκριτικά με την πρότυπη αναλογία του υλικού (**Arezoumandi and Volz, 2013**).

Η μελέτη για τη χρήση της υπτάμενης λιγνιτικής τέφρας σε δομικά υλικά έχει προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς τα αποτελέσματα σχετικών ερευνών είναι πολύ ενθαρρυντικά. Γι' αυτό το λόγο στην παρούσα μελέτη, μελετάται και η χρήση πρόσθετων υλικών (βερμικουλίτης, ίνες προπυλενίου) που προσδίδουν διαφορετικές ιδιότητες όπως θερμομόνωση, ηχομόνωση και πυραντοχή (**Leiva et al., 2015**).

- Παραγωγή υλικών

Στον ερευνητικό τομέα η ΙΛΤ έχει εφαρμοστεί για την παραγωγή χρήσιμων υλικών. Ένα παράδειγμα αποτελεί ο μουλίτης, ένα πυριτικό ορυκτό, που χρησιμοποιείται ως πυρίμαχο υλικό στην κατασκευή πορσελάνης, λόγω του υψηλού σημείου τήξης του (1840 °C). Σύμφωνα με μελέτες, ο μουλίτης μπορεί να προκύψει από ανάμειξη προεπεξεργασμένης τέφρας και βωξίτη, μετά από θέρμανση στους 1400 °C. Το νέο υλικό που προκύπτει εμφανίζει όμοιες ιδιότητες με τον φυσικό μουλίτη, ενώ η κατασκευή του γίνεται με πολύ χαμηλότερο κόστος (**Dong et al., 2008**).

Η ΙΛΤ έχει χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία ζεόλιθων, δηλαδή αργυλοπυριτικών ορυκτών, που χρησιμοποιούνται ως προσροφητικά υλικά και καταλύτες. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι τεχνητοί ζεόλιθοι από τέφρα έχουν έως και 10 φορές καλύτερη ικανότητα προσρόφησης από τους φυσικούς (**Hui et al., 2005**). Κατά την διαδικασία παραγωγής τεχνητών ζεόλιθων συνίσταται προσοχή στις συνθήκες κρυστάλλωσης, καθώς με βάση ερευνητικά αποτελέσματα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες (≈ 100 °C) και διαδικασίες μεγαλύτερης διάρκειας (≈ 12 ώρες) οδηγούν στην δημιουργία υλικών με υψηλότερη απόδοση (**Sommerville et al., 2013**).

Επίσης, η χρήση της ΙΛΤ βρίσκει εφαρμογή στην δημιουργία γυαλιού και υαλωδών κεραμικών. Αυτό επιτυγχάνεται με την υαλοποίηση της τέφρας στους 1350-1450 °C (**Karamberi and Moutsatsou, 2006**). Ενθαρρυντικά είναι τα αποτελέσματα από την προσθήκη τέφρας σε ποσοστό μέχρι και 50 % μαζί με απόβλητα γυαλιού και δολομίτη για την παραγωγή υαλοκεραμικών, καθώς το παραγόμενο υλικό εμφανίζει ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες (**Barbieri et al., 1999**).

- Η τέφρα ως προσροφητικό υλικό

Ένας επιπλέον τρόπος χρήσης της ΙΑΤ είναι η εφαρμογή της ως προσροφητικό υλικό. Συγκρίνοντας την με τα υπόλοιπα ευρέως χρησιμοποιούμενα προσροφητικά υλικά, όπως ο ενεργός άνθρακας ή η ρητίνη ιονανταλλαγής, πλεονεκτεί ως προς το χαμηλότερο κόστος και τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητά της. Έχει διαπιστωθεί ότι η ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα, επεξεργασμένη με ελαϊκό νάτριο, λόγω της δομής της και της ειδικής της επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσροφητικό υλικό πετρελαίου σε υδάτινο περιβάλλον, συμβάλλοντας έτσι στην αντιμετώπιση του προβλήματος των πετρελαιοκηλίδων (**Σισιάκης, 2016**).

- Βελτίωση της ποιότητας του εδάφους

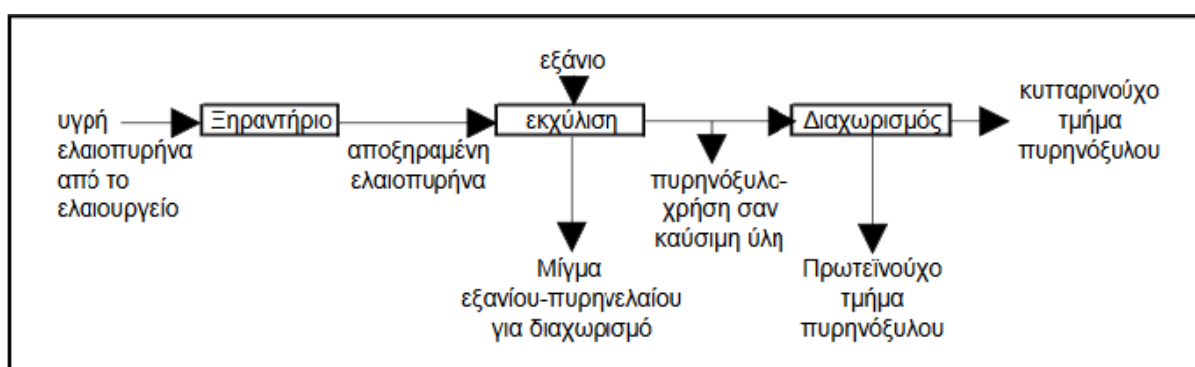
Τέλος, μία ακόμη πολύ ενδιαφέρουσα χρήση της λιγνιτικής τέφρας αποτελεί η βελτίωση της ποιότητας του εδάφους αυξάνοντας τη γονιμότητα και την παραγωγικότητά του χωρίς δυσμενείς επιδράσεις στο χώμα ή στις καλλιέργειες. Η προσθήκη τέφρας οδηγεί στη βελτίωση των φυσικών, χημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους χάρη στο κατάλληλο pH της, την ικανότητα κατακράτησης νερού και τη χαμηλή της πυκνότητα. Επίσης, συμβάλλει στην βελτίωση περιβαλλοντικά υποβαθμισμένων εδαφών, όπως ορυχείων ή ΧΥΤΑ (**Ram and Masto, 2014**). Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με μελέτες, εδάφη τα οποία εμπλουτίστηκαν με ποσότητες λιγνιτικής τέφρας πριν την καλλιέργειά τους (200 τόνοι/εκτάριο) σε συνδυασμό με προσθήκη γύψου, χουμικού οξέος και βιολιπάσματος πέτυχαν έως και 89 % καλύτερη απόδοση σε καλλιέργειες αραχίδας, αραβόσιτου και κάνναβης (**Ram et al., 2007**).

2.2 Πυρηνόξυλο

Παγκοσμίως καλλιεργούνται περισσότερα από 750 εκατομμύρια ελαιόδεντρα, το 95 % των οποίων βρίσκεται στις Μεσογειακές χώρες στις περιοχές Νότιας Ευρώπης, Νότιας Αφρικής και Εγγύς Ανατολής. Στην Ελλάδα σχεδόν το 60 % του καλλιεργούμενου εδάφους αποτελείται από ελαιώνες έχοντας 132 εκατομμύρια ελαιόδεντρα και παράγοντας περίπου 350,000 τόνους ελαιόλαδου ετησίως.

Τα απόβλητα των ελαιοτριβείων αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα ρύπανσης και ανήκουν στην κατηγορία των επικινδύνων αποβλήτων. Παρόλο τον μεγάλο παραγόμενο όγκο αποβλήτων κάθε χρόνο, δεν έχουν βρεθεί ακόμα ικανοποιητικές λύσεις για την διαχείρισή τους (**Διεύθυνση Περιβάλλοντος & Χωρικού Σχεδιασμού Περιφέρειας Ιονίων Νήσων, 2013**).

Στην συγκεκριμένη μελέτη, υλικό έρευνας αποτελεί ο ξηρός εκχυλισμένος ελαιοπυρήνας, πυρηνόξυλο. Πρόκειται για ακατέργαστο υποπροϊόν που προκύπτει από την επεξεργασία της ελιάς στα ελαιουργεία. Το συγκεκριμένο απόβλητο προκύπτει από την διαδικασία παραλαβής του ελαιόλαδου με την μέθοδο της εκχύλισης. Στη συνέχεια ξηραίνεται ο ελαιοπυρήνας, ώστε η υγρασία του να κατέλθει στο 8-10 %. Έπειτα, ο ξηρός ελαιοπυρήνας εκχυλίζεται με την χρήση εξανίου για την απομάκρυνση του πυρηνέλαιου. Σε ορισμένα πυρηνελαιουργεία ακολουθεί ένας διαχωρισμός του πυρηνόξυλου σε ένα τμήμα πλούσιο σε κυτταρίνη και σε ένα άλλο πλούσιο σε πρωτεΐνες. Το τμήμα του πυρηνόξυλου σε κυτταρίνη έχει μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη από το απλό πυρηνόξυλο. Η διαδικασία παραγωγής του πυρηνόξυλου παρουσιάζεται διαγραμματικά στην **εικόνα 1**.



Εικόνα 1. Διαδικασία παραγωγής πυρηνόξυλου (Δουρουντάκης, 2012)

Το πυρηνόξυλο αποτελείται κατά 55 % του βάρους του από κατακερματισμένα ξυλώδη κομμάτια του πυρήνα της ελιάς, ενώ το υπόλοιπο 45 % από την ψίχα και την φλούδα της υπό μορφή σκόνης. Επίσης, υπάρχει ένα ποσοστό λαδιού που εκτιμάται από 0.5 έως 1.2%. Το ειδικό του βάρος κυμαίνεται από 720-750 Kg/m³ και η υγρασία του από 12-15%. Βασικό του χαρακτηριστικό αποτελεί η υψηλή θερμογόνο δύναμη η οποία ανέρχεται στις 4700-5000 kcal/Kg, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο ως στερεό καύσιμο (**Στροφύλας, 2010**).

Κύριο μειονέκτημα του πυρηνόξυλου είναι η δυσάρεστη οσμή όταν αποθηκεύεται για αρκετό χρονικό διάστημα και η οποία οφείλεται στις ζυμώσεις που διενεργούνται στο σαρκώδες μέρος του και αναδύονται κατά την αναμόχλευση του υλικού. Ταυτόχρονα, ελλοχεύει ο κίνδυνος αυτανάφλεξης εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του καθώς συσσωρεύεται το ένα πάνω στο άλλο **(Στροφύλας, 2010)**. Επίσης, κατά την επεξεργασία του πυρηνόξυλου εκχυλίζεται υδατικό διάλυμα με στερεά έως 6 %, ο επονομαζόμενος κατσίγαρος. Η επεξεργασία του κατσίγαρου είναι πολύ δύσκολη με αποτέλεσμα να ρυπαίνει το περιβάλλον διεισδύοντας σε υδάτινους αποδέκτες και φράζοντας τους πόρους του εδάφους. Τέλος, κατά τη διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα δεν παρατηρείται έκλυση πτητικών ουσιών, υπάρχει ωστόσο εκπομπή σκόνης στο περιβάλλον **(ARGOENERGY, 2005)**.

2.2.1 Διαχείριση του πυρηνόξυλου

Οι κυριότεροι τρόποι αξιοποίησης του πυρηνόξυλου είναι οι ακόλουθοι:

- Το πυρηνόξυλο ως καύσιμο

Το πυρηνόξυλο χρησιμοποιείται ως βιοκαύσιμο με υψηλό βαθμό απόδοσης μετατροπής σε θερμική ενέργεια (~70-80 %) **(Βασίλειος, 2009)** αποτελώντας μια από τις οικονομικότερες λύσεις για οικιακή θέρμανση, αφού το κόστος θέρμανσης συγκριτικά με το πετρέλαιο, μειώνεται έως και 5 φορές. Για την παραγωγή ενέργειας, πραγματοποιείται πυρόλυση κατά την οποία παράγεται αέριο με υψηλή θερμογόνο δύναμη **(Bartocci et al., 2015)**. Σύμφωνα με το πείραμα των **Bartocci et al., (2015)** παρατηρήθηκε έκλυση μεγάλης ποσότητας πτητικών με απόδοση περισσότερο από 40 % κατά βάρος.

- Απομάκρυνση Fe^{3+} από βιομηχανικά απόβλητα

Το πυρηνόξυλο μπορεί να αξιοποιηθεί για να απομακρύνει μεταλλικά ιόντα από βιομηχανικά απόβλητα. Πιο συγκεκριμένα, σε προγενέστερη μελέτη **(Hodaifa et al, 2014)** διερευνήθηκε η προσρόφηση σιδήρου Fe^{3+} . Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πυρηνόξυλο επιτρέπει την επεξεργασία σημαντικών ποσοτήτων βιομηχανικών λυμάτων αναφορικά με

την απομάκρυνση ιόντων σιδήρου. Η απώλεια μάζας εκτιμήθηκε αμελητέα, ενώ σύμφωνα με τους συγγραφείς μετά την προσρόφηση, το πυρηνόξυλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω ως βιοκαύσιμο για οικιακές ή βιομηχανικές χρήσεις.

- Βελτίωση του εδάφους

Μια ακόμη πιθανή χρήση του πυρηνόξυλου είναι αυτή της παραγωγής βιοεξανθρακώματος (biochar), εδαφοβελτιωτικού που παράγεται από βιομάζα με την διαδικασία της πυρόλυσης. Σύμφωνα με την μελέτη των **Karakas et al, (2017)** η χρήση του παραγόμενου βιοεξανθρακώματος αξιολογήθηκε ως στερεό μέσο στο υδροπονικό σύστημα για την καλλιέργεια σπορόφυτων ντομάτας. Για τη διεξαγωγή της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν επίσης άλλα υλικά όπως ο περλίτης και η τύρφη κοκοφοίνικα προκειμένου να συγκριθεί η απόδοση στην ανάπτυξη των φυτών. Η πειραματική μελέτη έδειξε ότι το ψηλότερο δενδρύλλιο τομάτας επιτεύχθηκε όταν χρησιμοποιήθηκε ως στερεό μέσο το βιοεξανθράκωμα από πυρηνόξυλο.

- Ενίσχυση των καλλυντικών

Η βιομηχανία των καλλυντικών τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να χρησιμοποιεί τα υποπροϊόντα της ελιάς και συγκεκριμένα το πυρηνόξυλο για την δημιουργία προϊόντων καλλωπισμού και υγιεινής σώματος λόγω των θρεπτικών συστατικών του. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι ο πυρήνας της ελιάς περιέχει βιοδραστικές ενώσεις με υψηλή αντιοξειδωτική δράση, ενώσεις λιπαρών οξέων και μία σύνθεση μεταλλικών στοιχείων. Ο συνδυασμός κυτταρίνης, ημικυτταρινών, τυρσόλης, υδροξυτυρσοσόλης, ελευρωπαίνης και ελαουροπείνης λειτουργούν ως προστασία κατά της ηλιακής ακτινοβολίας και ως βιολογικό φίλτρο κατά της γήρανσης περιορίζοντας την βλάβη του DNA με αντιοξειδωτικά, βιταμίνες και μέταλλα (**Σισιάκης, 2016; Rodrigues et al, 2014**).

- Κατασκευαστικός τομέας

Εφαρμογές του πυρηνόξυλου συναντώνται και στον τομέα των κατασκευών για την δημιουργία δομικών υλικών. Η χρήση του πυρηνόξυλου έχει οδηγήσει στη δημιουργία τούβλων από πηλό με προσθήκη βιομάζας, άχυρου, και με αλεύρι σιταριού παρουσιάζοντας βελτιωμένες θερμομονωτικές ιδιότητες συγκριτικά με τα συμβατικά

τούβλα (Aouba et al., 2015). Σύμφωνα με μελέτες των Ventola et al (2011), το πυρηνόξυλο μπορεί να προστεθεί σε κονίαμα προσδίδοντας μεγαλύτερη στεγανότητα και μειώνοντας το πορώδες, καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση συγκολλητικού υλικού σε περιπτώσεις αποκατάστασης κτιρίων (Ventola et al., 2011).

2.3 Γυαλί από οθόνες LCD

Η αυξημένη χρήση ηλεκτρονικών συσκευών σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας οδηγεί σε αυξημένη παραγωγή ποσοτήτων ηλεκτρονικών αποβλήτων (e-waste). Υπολογίζεται ότι κάθε χρόνο ο όγκος των ηλεκτρονικών αποβλήτων αγγίζει τα 40 εκατομμύρια τόνους σε παγκόσμια κλίμακα (Savvilotidou et al., 2014; Schluep et al, 2009). Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η παραγωγή αυτού του τύπου αποβλήτων υπολογίζεται 17-20 kg ανά άτομο (Savvilotidou et al., 2014; Huisman, 2003), ενώ στην Κίνα το αντίστοιχο νούμερο εκτιμάται κάτω από 1 kg ανά άτομο (Chancerel and Rotter, 2009).

Ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού όγκου των ηλεκτρονικών αποβλήτων προέρχεται από τις οθόνες, οι οποίες απαρτίζουν πληθώρα συσκευών όπως τηλεοράσεις, κινητά τηλέφωνα, ταμπλέτ ή ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Τα τελευταία χρόνια η χρήση των Οθονών Υγρών Κρυστάλλων (LCD-Liquid Crystal Display) έχει αυξηθεί σημαντικά αποτελώντας έναν από τους επικρατέστερους τύπους οθόνης στην αγορά (Yang et al., 2013). Η δομή του LCD πάνελ αποτελείται από υγρούς κρυστάλλους μεταξύ δύο φύλλων γυαλιού και στρώματα πολωτή που βρίσκονται εξωτερικά από το κάθε φύλλο γυαλιού. Επίσης, η σύσταση του πάνελ αποτελείται από τοξικά, αλλά και σπάνια μέταλλα και μεταλλοειδή (αντιμόνιο (Sb), αρσενικό (As), ίνδιο(In) κα.) (Savvilotidou et al., 2014) .

Η ανακύκλωση των LCD αποβλήτων κρίνεται επιτακτική για δυο βασικούς λόγους. Ο πρώτος λόγος αφορά τα σπάνια και πολύτιμα μέταλλα στα οποία βασίζεται η κατασκευή τους. Είναι ευρέως γνωστό ότι οι επίπεδες οθόνες (Flat Panel Displays, FPD) αποτελούν σήμερα την κυριότερη εφαρμογή ινδίου, για την οποία καταναλώνεται πάνω από το 50 % της παγκόσμιας παραγωγής του παρθένου-εξορυγμένου και περίπου 80 % της συνολικής διαθεσιμότητας συμπεριλαμβανομένου και του ανακτηθέντος ινδίου (Σαββιλωτίδου, 2014; Mikolajczak, 2009). Ο δεύτερος λόγος έγκειται στις επιπτώσεις που ενδέχεται να επιφέρουν στο περιβάλλον και στην υγεία του ανθρώπου σε περίπτωση απόρριψης χωρίς επεξεργασία.

2.3.1 Διαχείριση του γυαλιού LCD

Σκοπός της Οδηγίας 2012/19/ΕΕ σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) είναι να συμβάλλει στη βιώσιμη παραγωγή και κατανάλωση οι οποίες επιτυγχάνονται με ανάκτηση, ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση αυτών των αποβλήτων. Όσον αφορά συγκεκριμένα τις LCDs, σε πειραματικό επίπεδο οι περισσότερες μελέτες, που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, επικεντρώνονται στην ανάκτηση του ινδίου, που βρίσκεται στο στρώμα ITO (Indium – Tin Oxide) και αποτελείται από οξείδιο ινδίου - κασσιτέρου. Σύμφωνα με τους **Chul -Tae Lee, (2015)** το υλικό το οποίο αξίζει να ανακτηθεί από την επεξεργασία των πάνελ είναι το γυαλί LCD, το οποίο αποτελεί περίπου το 40-50% του συνολικού βάρους του πάνελ. Ωστόσο, οι ερευνητές αναφέρουν ότι το γυαλί από οθόνες κατασκευασμένες πριν το 2009 απαιτεί μεγάλη προσοχή κατά τη διαχείριση λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε Sb_2O_3 και As_2O_5 (**Chul -Tae Lee, 2015**). Στη συνέχεια αναφέρονται μέθοδοι που έχουν μελετηθεί για την ανάκτηση πολύτιμων δευτερογενών πρώτων υλών (π.χ. σπάνιων μετάλλων), καθώς και για την αξιοποίηση- επαναχρησιμοποίηση του γυαλιού που εμπεριέχεται στο LCD πάνελ.

- Ανάκτηση σπάνιων μετάλλων με χρήση οξέων

Δοκιμές εκπλυσιμότητας διεξήχθησαν υπό διαφορετικές θερμοκρασίες, χρησιμοποιώντας διάφορες αναλογίες στερεού: υγρού και διαλυτών (μείγματα οξέων) σε δείγμα LCD για τον προσδιορισμό της μέγιστης εκπλυσιμότητας/ ανάκτησης τριών βασικών μετάλλων που απαντώνται σε μία τυπική LCD οθόνη (ίνδιο, αρσενικό, αντιμόνιο). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ίνδιο εμφανίζει τα υψηλότερα ποσοστά ανάκτησης (περίπου 60%) με μέγιστη ικανότητα έκπλυσης 317 mg-In/kg-LCD (**Savvilotidou et al., 2015**). Από τη μελέτη διαπιστώθηκε ότι το ίνδιο είναι ένα στοιχείο που αξίζει να ανακτηθεί από δευτερογενείς πηγές λόγω της σπανιότητας και της ακριβούς του εξόρυξης, αλλά και λόγω των πολλαπλών εφαρμογών του.

- Κατασκευή αφρώδους γυαλιού για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Το LCD γυαλί χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη για την κατασκευή σφαιρικών σωματιδίων αφρού (spherical foam body) τα οποία μπορούν να συνεισφέρουν στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η διαδικασία περιλαμβάνει ανάμιξη γυαλιού LCD με καολινίτη, $NaCO_3$, $CaCO_3$, Na_2SO_4 και MgO και θέρμανση στους 970-1000°C για 10 λεπτά.

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα του παραγόμενου αφρώδους υλικού στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι 70.58% απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, 56.1 % απομάκρυνση BOD, 57.5 % απομάκρυνση COD, 28.6 % απονιτροποίηση και 49.8 % απομάκρυνση φωσφόρου (**Chul-Tae Lee, 2014**). Σύμφωνα με τους συγγραφείς αυτή η μέθοδος έχει μεγάλη δυνατότητα να αναπτυχθεί επιτυχώς σε εμπορική κλίμακα.

- Χρήση του LCD γυαλιού σε δομικά υλικά

Η προσθήκη του γυαλιού LCD έχει εξεταστεί, επίσης, για την κατασκευή δομικών υλικών. Οι **Kidong et al., (2016)** μελέτησαν την παραγωγή κεραμικών πλακιδίων αντικαθιστώντας τον άστριο, ένα τεκτοπυριτικό ορυκτό που παραδοσιακά χρησιμοποιείται για την κατασκευή τέτοιων υλικών, με γυαλί σε ποσοστό έως 40 %. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν πραγματοποιώντας μονοαξονική συμπίεση και έπειτα πυροσυσσωματώθηκαν στους 1500 °C για 1 ώρα. Οι βασικές ιδιότητες των κεραμικών πλακιδίων, όπως η υδατοαπορροφητικότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής επηρεάστηκαν θετικά από την προσθήκη του γυαλιού. Βασικό συμπέρασμα της μελέτης ήταν ότι το ιξώδες και η σύνθεση του γυαλιού LCD διαδραματίζουν κύριο ρόλο στις ιδιότητες και τη μικροδομή του τελικού προϊόντος.

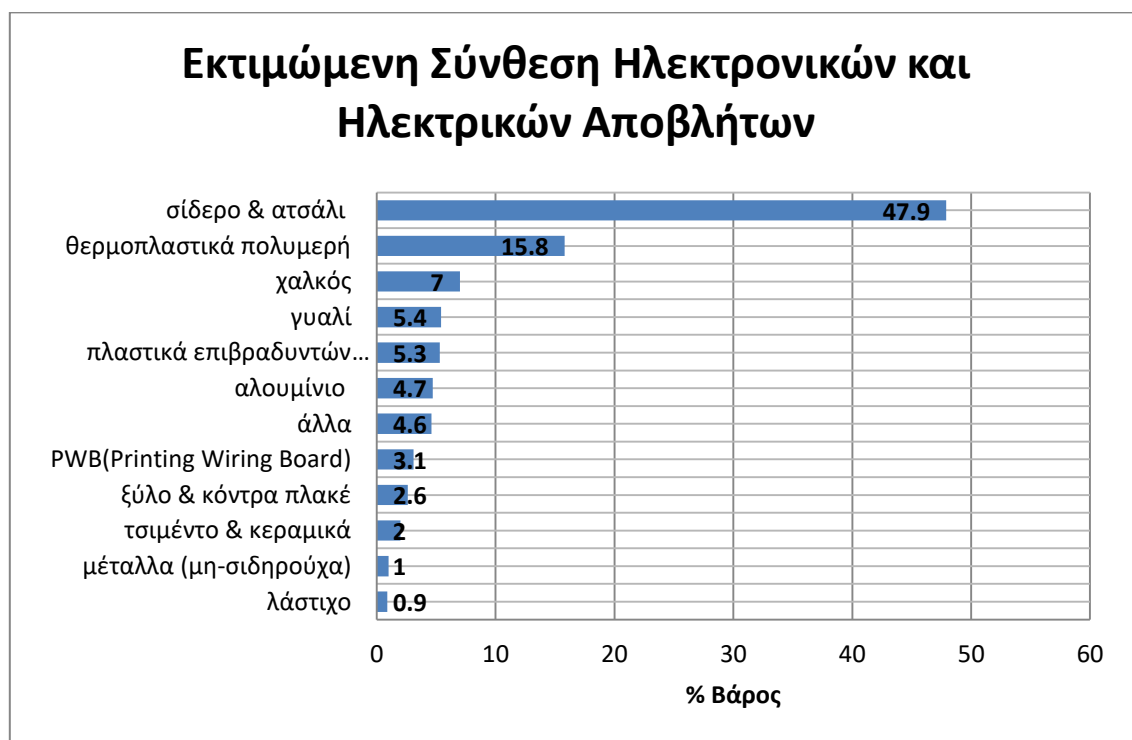
Επιπρόσθετα, σκυρόδεμα από γυαλί LCD έχει παρασκευαστεί βελτιώνοντας την αντοχή και την ανθεκτικότητά του. Οι βέλτιστες ιδιότητες παρατηρήθηκαν στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με 20% αντικατάσταση της άμμου από γυαλί (**Wang, 2009**). Ομοίως, από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη μελέτη **Aliabdo et al., (2016)** εκτιμήθηκε ότι 10 % σκόνης γυαλιού LCD ως αντικατάσταση του τσιμέντου ενίσχυσε το κονίαμα αναφορικά με την αντοχή σε θλίψη.

Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα που αφορούν την προσθήκη γυαλιού LCD σε δομικά υλικά είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, και λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υπάρχει εκτενής έρευνα μέχρι σήμερα, καθώς η διαχείριση των LCD βρίσκεται σε εξέλιξη, στην παρούσα εργασία το απόβλητο γυαλί από LCDs χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παρασκευή κονιάματος.

2.4 Πλαστικό από ηλεκτρονικά απόβλητα

Φυσικό επακόλουθο της αύξησης των ηλεκτρονικών αποβλήτων είναι και η αύξηση παραγωγής πλαστικών αποβλήτων που απορρέουν από τις ηλεκτρονικές συσκευές. Παρόλο που το πλαστικό δεν είναι ούτε το πιο ρυπογόνο, αλλά ούτε και το υλικό που προκύπτει σε μεγαλύτερη ποσότητα κατά βάρος από τέτοιου είδους απόβλητα, καταλαμβάνει αρκετό χώρο, με την σχέση βάρους προς τον όγκο να αντιστοιχεί μέχρι και 1:3. Έχει χαμηλή πυκνότητα και συναντάται σε πολλά και διαφορετικά σχήματα. Με το όγκο των παραγόμενων πλαστικών να αυξάνεται χρόνο με το χρόνο, ο αριθμός τους έχει φτάσει να είναι περίπου ίσος με τον αριθμό των πλαστικών αποβλήτων που παράγονται από αστική χρήση, και ο οποίος εκτιμάται στους 2 τόνους ανά χρόνο με αναμενόμενη αυξητική τάση (Namias, 2013). Στο **διάγραμμα 1** που ακολουθεί, παρουσιάζεται το ποσοστό των πλαστικών που προκύπτει από τα ηλεκτρονικά απόβλητα και εκτιμάται σε 21.1 %, εκ του οποίου το 5.3 % αποτελείται από πλαστικά με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή πλαστικά με επιβραδυντές φλόγας (Flame Retardant Plastics) και το υπόλοιπο 15.8 % να αντιπροσωπεύει τα θερμοπλαστικά πολυμερή (Melt Flow Index Plastics) (Menad et al., 2016).

Διάγραμμα 1. Ποσοστό πλαστικών στα ηλεκτρονικά απόβλητα (Menad et al., 2016)



Τα πλαστικά των ηλεκτρονικών αποβλήτων αποτελούνται από σύνθετα μίγματα πολυμερών, συνήθως περισσότερα από 15 διαφορετικά. Αυτά που απαντώνται συχνότερα είναι το πολυπροπυλένιο, το PVC (χλωριούχο πολυβινύλιο), και πολυμερή βασισμένα στο στυρόλιο όπως το ABS (Ακρυλονιτρίλιο-Βουταδιένιο-Στιρένιο /Acrylonitrile-Butadiene-Styrene), το HIPS (Πολυστυρένιο Υψηλής Επίδρασης/ High Impact Polystyrene), το PS (πολυστυρόλιο/ polystyrene) και το PC (πολυανθρακικό/ Polycarbonate) (**Dimitrakakis et al., 2009**). Η χρήση πολλών και διαφορετικών πολυμερών σε ένα μίγμα συμβάλλει στην πολύπλοκη μορφή τους, η οποία εξαρτάται από την εκάστοτε σύνθεση (**Bio and Xanthos, 1995; Hoyle and Karsa, 1997**). Προκειμένου τα πολυμερή να αποκτήσουν περαιτέρω ιδιότητες, γίνεται χρήση ορισμένων πρόσθετων ουσιών. Αυτές οι ουσίες μπορεί να είναι ανόργανα συστατικά όπως διάφορες χρωστικές ουσίες (TiO_2 , ZnO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3), επιβραδυντές φλόγας (συνήθως βρωμιούχα οργανικά μαζί με Sb_2O_3), καθώς και σταθεροποιητές και πλαστικοποιητές (συστατικά με Ba, Cd, Pb, Sn και Zn) (**Dimitrakakis et al., 2009**). Το βασικό πρόβλημα του πλαστικού είναι η πολύ αργή αποδόμησή του, με αποτέλεσμα να αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά ρύπανσης του φυσικού περιβάλλοντος. Ωστόσο, δεν είναι όλα τα πλαστικά το ίδιο επιβαρυντικά για το περιβάλλον.

Αναφορικά με τις επιπτώσεις που προκαλούν τα πλαστικά των ηλεκτρονικών αποβλήτων, τα διαθέσιμα στοιχεία είναι περιορισμένα. Μόνο ορισμένες μελέτες έχουν ασχοληθεί με τις συγκεντρώσεις συγκεκριμένων επικινδύνων ουσιών που περιέχουν (Pb, Cd, Hg, Cl, Br, Cr), υπό το πρίσμα διαφορετικών μεθοδολογιών και ποικίλων συνθηκών, με αποτέλεσμα το εύρος των τιμών να είναι πολύ μεγάλο και να μη επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων (**Morf et al., 2007; Nnorom and Osibanjo, 2009**).

2.4.1 Διαχείριση του πλαστικού

Για την ορθή διαχείριση του πλαστικού πρέπει αρχικά να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των πολλών διαφορετικών μιγμάτων πολυμερών από τα οποία συνιστάται, το οποίο συνεπάγεται διαφορετική ποιότητα, διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση.

Σχετικά με την ανακύκλωσή του, τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες σε οργανωμένες μονάδες επεξεργασίας, προκειμένου να αποφευχθεί η απόρριψή του σε ΧΥΤΑ ή άλλους ακατάλληλους χώρους. Μερικά από αυτά τα πλαστικά, όπως

παραδείγματος χάρη τα θερμοπλαστικά, διαθέτουν τη δυνατότητα επαναθέρμανσης και επαναδιαμόρφωσής τους, αν και μέσω αυτή της διαδικασίας τελικά υποβαθμίζεται η ποιότητά τους. Εκτός από την ανακύκλωση του πλαστικού, διακρίνονται και άλλοι κλάδοι στους οποίους το συγκεκριμένο υλικό είναι χρήσιμο.

- Ενεργειακός τομέας

Ένας τρόπος διαχείρισης του πλαστικού είναι η καύση του για την παραγωγή ενέργειας, καθώς το υλικό χαρακτηρίζεται από μεγάλη θερμογόνο δύναμη 7000-8000 kcal/kg. Για τον ίδιο σκοπό το υλικό μπορεί να υποστεί και πυρόλυση, κατά την διάρκεια της οποίας σπάει η αλυσίδα των πολυμερών σε αλλά πολύτιμα προϊόντα. Ως ενδιάμεσο προϊόν παράγονται οι υδρογονάνθρακες, ενώ ως τελικό παράγεται σύνθετο πετρέλαιο, στερεό υπόλειμμα άνθρακα (Char) και αέριο. Και τα 3 αυτά προϊόντα, με μία περαιτέρω επεξεργασία χρησιμοποιούνται ως καύσιμα λόγω της υψηλής ενέργειας που εσωκλείουν (**Jamradloedluka and Lertsatitthanakorn, 2014**). Ειδικότερα, στην περίπτωση της καταλυτικής πυρόλυσης απαιτούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες (400°C) και παράγονται ελαφρύτεροι υδρογονάνθρακες (**Panda et al., 2010**).

- Κατασκευαστικός τομέας

Η εφαρμογή του πλαστικού σε δομικά υλικά σχετίζεται με τις εξαιρετικές του ιδιότητες στην θερμομόνωση και ηχομόνωση. Συνήθως χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει τα αδρανή υλικά του σκυροδέματος. Το πλαστικό επιτυγχάνει να κάνει το σκυρόδεμα πιο όλκιμο, γεγονός που βοηθάει τις κατασκευές σε καιρικές συνθήκες που επιφέρουν έντονη συστολή και διαστολή των υλικών. Επίσης, μειώνει το συνολικό βάρος του σκυροδέματος, καθώς το ίδιο είναι ένα πολύ ελαφρύ υλικό συμβάλλοντας στη δημιουργία του λεγόμενου «ελαφρού σκυροδέματος» (**Manjunath Ashwini, 2016**).

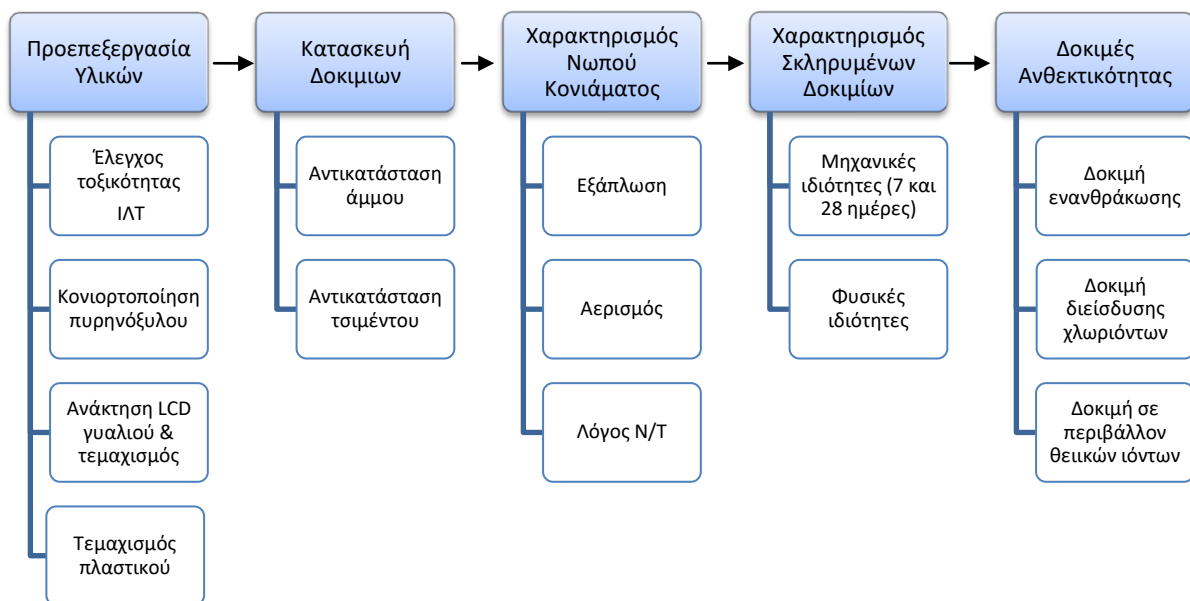
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Στόχος της πειραματικής διαδικασίας

Αναμφίβολα, η προστασία του περιβάλλοντος μπορεί να προωθηθεί μέσω της επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης αποβλήτων. Ωστόσο, μέχρι σήμερα η δυσκολία εφαρμογής μεθόδων αξιοποίησης αποβλήτων σχετίζεται με το οικονομικό κόστος που συνεπάγονται, καθώς τα ανακυκλωμένα υλικά πρέπει να ανταγωνίζονται με προϊόντα χαμηλού κόστους. Απάντηση σε αυτή τη δυσκολία παρέχει η ανεύρεση αποβλήτων των οποίων οι ιδιότητες καθιστούν δυνατή τη χρήση τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές υψηλής προστιθέμενης αξίας (πχ στην παραγωγή δομικών υλικών με ενισχυμένες μηχανικές ή θερμικές ιδιότητες). Σε αυτή την περίπτωση τα προϊόντα που παράγονται μπορούν με επιτυχία να ανταγωνιστούν με προϊόντα που παράγονται από πρωτογενή υλικά, μειώνοντας παράλληλα το περιβαλλοντικό κόστος της διάθεσης αποβλήτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η αξιοποίηση στερεών αποβλήτων στην παραγωγή τσιμεντοκονιάματος. Ως πρώτες ύλες μελετώνται ανόργανα απόβλητα, (α) υπτάμενη λιγνιτική τέφρα και (β) LCD γυαλί, καθώς και οργανικά, (γ) πυρηνόξυλο και (δ) πλαστικό από ηλεκτρονικά απόβλητα. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την αντικατάσταση της άμμου ή / και του τσιμέντου, καθώς αποτελούν τα δύο κύρια υλικά για την παραγωγή του τσιμεντοκονιάματος. Διερευνήθηκε επίσης η επίδραση αυτών των αποβλήτων στην ποιότητα του τσιμεντοκονιάματος εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά του νωπού τσιμεντοκονιάματος, καθώς και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζει μετά από φυσική γήρανση (7 και 28 ημέρες). Τέλος, διαπιστώθηκε η ανθεκτικότητα του δομικού υλικού σε συνθήκες χημικής διάβρωσης και φθοράς, προκειμένου να προσδιοριστεί το πεδίο εφαρμογής με βάση τα χαρακτηριστικά και τις τεχνικές προδιαγραφές που πληροί.

Η μεθοδολογία που πραγματοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων περιγράφεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



3.2 Προεπεξεργασία υλικών

3.2.1 Ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα

Το δείγμα ιπτάμενης λιγνιτικής τέφρας (**Εικόνα 2**), που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, προμηθεύτηκε από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, και συγκεκριμένα από το λιγνιτωρυχείο του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού (ΑΗΣ) Καρδιάς.



Εικόνα 2. Λιγνιτική τέφρα με άμμο

TCLP Ανάλυση

Η τοξικότητα της τέφρας αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τη δοκιμή TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure). Η TCLP αποτελεί διαδικασία χαρακτηρισμού της τοξικότητας του εκχυλίσματος ενός στερεού αποβλήτου και αφορά τις συγκεντρώσεις τοξικών μετάλλων που εκπλύονται σε συγκεκριμένες συνθήκες. Στην παρούσα εργασία η ανάλυση αυτή μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τις συγκεντρώσεις των τοξικών μετάλλων στο αρχικό δείγμα, οι οποίες μετέπειτα θα συγκριθούν με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στο τελικό σταθεροποιημένο δομικό υλικό, τσιμεντοκονιάμα, προκειμένου να διαπιστωθεί αν επιτυγχάνεται η «παγίδευση»/ ακινητοποίηση των τοξικών μετάλλων.

Στον **Πίνακα 1** παρουσιάζονται τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια συγκέντρωσης στοιχείων σύμφωνα με την TCLP.

Πίνακας 1. Όρια TCLP ανάλυσης (ΕΗΣΟ, 2016)

Στοιχεία	Όρια συγκέντρωσης (mg/L)
Αρσενικό	5.0
Βάριο	100.0
Κάδμιο	1.0
Χρώμιο	5.0
Μόλυβδος	5.0
Υδράργυρος	0.2
Σελήνιο	1.0
Άργυρος	5.0

Πρόσθετα υλικά: Βερμικουλίτης, Ίνες Προπυλενίου

Ένας από τους κύριους στόχους της εργασίας ήταν να παρασκευαστεί ένα δομικό υλικό του οποίου η σύσταση να αποτελείται κατά κύριο λόγο από τέφρα. Γνωρίζοντας ότι τα αδρανή υλικά αποτελούν ποσοτικά το κύριο υλικό του τσιμεντοκονιάματος, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση της άμμου από ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα σε ποσοστά από 10 – 40 %. Επίσης, το συνδετικό υλικό, τσιμέντο, αντικαταστάθηκε σε ποσοστό από 10 – 40 %,

στοχεύοντας στον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και στη μείωση της χρήσης πόρων.

Προς την κατεύθυνση σύνθεσης ενός υλικού που θα συνδυάζει εξοικονόμηση ενέργειας προσφέροντας θερμική μόνωση και συνεπώς μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση – ψύξη, χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσθετα (α) βερμικουλίτης και (β) ίνες προπυλενίου (**Εικόνα 3**). Ο βερμικουλίτης είναι υλικό που προέρχεται από ένα ορυκτό, το οποίο ονομάζεται Μίκα και ανήκει στην κατηγορία των Μαρμαρυγιών. Αναφορικά με τη χημική του σύσταση, πρόκειται για ένα ενυδατωμένο πυριτικό άλας, που αποτελείται από μαγνήσιο, αλουμίνιο και σίδηρο και απαντάται με μορφή νιφάδας (**Leiva et al., 2015**), ενώ λόγω της χημικής του αδράνειας χαρακτηρίζεται ως υλικό με χαμηλή θερμική και ακουστική αγωγιμότητα. Συνήθως, ο βερμικουλίτης χρησιμοποιείται στο κονίαμα για πυροπροστασία (**Leiva et al., 2009; Leiva et al., 2015**). Ακόμα, λόγω της χαμηλής του πυκνότητας έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή ελαφρού σκυροδέματος με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες (**Schackow et al., 2014**).

Όσον αφορά τις ίνες προπυλενίου είναι συνθετικές ίνες που προκύπτουν κατόπιν επεξεργασίας. Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κονιαμάτων και σκυροδέματος καθώς, λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας και των συγκολλητικών τους ιδιοτήτων, επιφέρουν μείωση των μικρορωγμών που προκαλούνται εξαιτίας συστολοδιαστολών και μηχανικών φορτίων (**Cao et al., 2017**), και επομένως αύξηση της μηχανικής αντοχής (**Leiva et al., 2009**).

Εικόνα 3.Βερμικουλίτης με ίνες προπυλενίου



3.2.2 Πυρηνόξυλο

Το πυρηνόξυλο, που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, προήλθε από ελαιουργείο, το οποίο εδρεύει στην περιοχή των Χανίων. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δυο κοκκομετρικά κλάσματα προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση της κοκκομετρίας στις ιδιότητες που εμφανίζει το τσιμεντοκονίαμα. Το πυρηνόξυλο κονιορτοποιήθηκε στο μαχαιρόμυλο, puluerisette 19 FRITCH (**Εικόνα 4**), ο οποίος συνδέεται με τον κυκλώνα Nabertherm. Χρησιμοποιήθηκε κόσκινο διαμέτρου 0.25 mm. Τα δύο κλάσματα που παρήχθησαν από την κονιορτοποίηση με διάμετρο κόκκων (α) μικρότερη από 0.25 mm και (β) μεγαλύτερη από 0.25 mm χρησιμοποιήθηκαν για την αντικατάσταση των αδρανών στο τσιμεντοκονίαμα. Ως ποσοστά αντικατάστασης της άμμου επιλέχθηκαν τα ακόλουθα: 5, 20, 40 και 70 % αντοίσιχα.



(α)



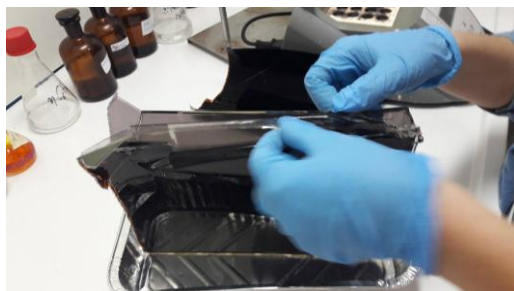
(β)

Εικόνα 4. (α) Μαχαιρόμυλος puluerisette 19 FRITCH, (β) τεμαχισμένο πυρηνόξυλο

3.2.3 LCD Γυαλί

Αναφορικά με το γυαλί, το πρώτο βήμα πριν την προεπεξεργασία του, αφορούσε την ανάκτησή του από το LCD πάνελ στο οποίο εμπεριέχεται. Καθώς το πάνελ αποτελείται από δύο γυάλινα στρώματα, τα οποία εξωτερικά έρχονται σε επαφή με υποστρώματα πολωτή, πραγματοποιήθηκε απομάκρυνσή τους με θερμική μέθοδο. Η αφαίρεση του πολωτή επιτεύχθηκε έπειτα από θερμικό σοκ στους 200°C για 7 min στον κλίβανο (**Savvilotidou et**

al., 2015). Σε αυτές τις συνθήκες αρχίζει η αποκόλληση του πολωτή, και συνεπώς είναι εφικτός ο διαχωρισμός του από το πάνελ με χειρωνακτικό τρόπο (**Εικόνα 5**).



Εικόνα 5. Απομάκρυνση πολωτή από οθόνη LCD

Δεδομένου ότι μεταξύ άλλων (πχ ειδικό βάρος, αντοχή) η κοκκομετρία και το σχήμα των αδρανών επηρεάζουν άμεσα τις ιδιότητες του τσιμεντοκονιάματος, προετοιμάστηκαν δύο δείγματα από θραύσματα γυαλιού με διαφορετικό μέγεθος κόκκων. Βάσει αυτού, δύο κοκκομετρίες παρήχθησαν: (α) τμήμα της γυάλινης οθόνης τεμαχίστηκε σε κομμάτια μεγέθους μικρότερα από 4 mm προκειμένου να πληρείται ο περιορισμός διαστάσεων του μέγιστου κόκκου αδρανών σε συνάρτηση με το πάχος του δομικού στοιχείου, καθώς ο μέγιστος κόκκος των αδρανών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/3 των διαστάσεων του κυβικού δομικού στοιχείου, (β) το υπόλοιπο γυαλί της οθόνης κονιορτοποιήθηκε στο μαχαιρόμυλο με χρήση κόσκινου διαμέτρου 0.5 mm προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το προϊόν με διάμετρο κόκκων μικρότερη από 0.5 mm (**Εικόνα 6**). Τα δύο κλάσματα γυαλιού αναμίχθηκαν με άμμο, τσιμέντο και νερό αντικαθιστώντας 10 και 20 % της άμμου και του τσιμέντου, αντίστοιχα.



Εικόνα 6. Γυαλί σε θραύσματα (αριστερά), γυαλί σε σκόνη (δεξιά)

3.2.4 Πλαστικό

Το πλαστικό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε προήλθε από το κουτί σύνδεσης (junction box), που βρίσκεται στο πίσω μέρος φωτοβολταϊκών πάνελ. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη πλαστικού που περιλαμβάνονται στο κουτί σύνδεσης (α) τα καλώδια, κατασκευασμένα από PVC, καθώς και (β) το κουτί σύνδεσης, κατασκευασμένο από ABS-FR40. Τα δυο είδη πλαστικού που αποτελούνται από διαφορετικό πολυμερές τεμαχίστηκαν χειρονακτικά. Δύο κλάσματα παρήχθησαν από τη διαδικασία τεμαχισμού: (i) τεμάχια με διαστάσεις 0.3 x 0.3 cm **(Εικόνα 7)**, καθώς και (ii) τρίμα πλαστικού μεγέθους 1 x 3 mm **(Εικόνα 8)**. Οι δύο τύποι πλαστικού ((α) και (β)) με μέγεθος κόκκων (i) και (ii) χρησιμοποιήθηκαν για την αντικατάσταση των αδρανών σε ποσοστό 5 και 10 %.



Εικόνα 7. Τεμαχισμός πλαστικού καλωδίου



Εικόνα 8. Τριμμένο πλαστικό

3.3 Σύνθεση τσιμεντοκονιάματος

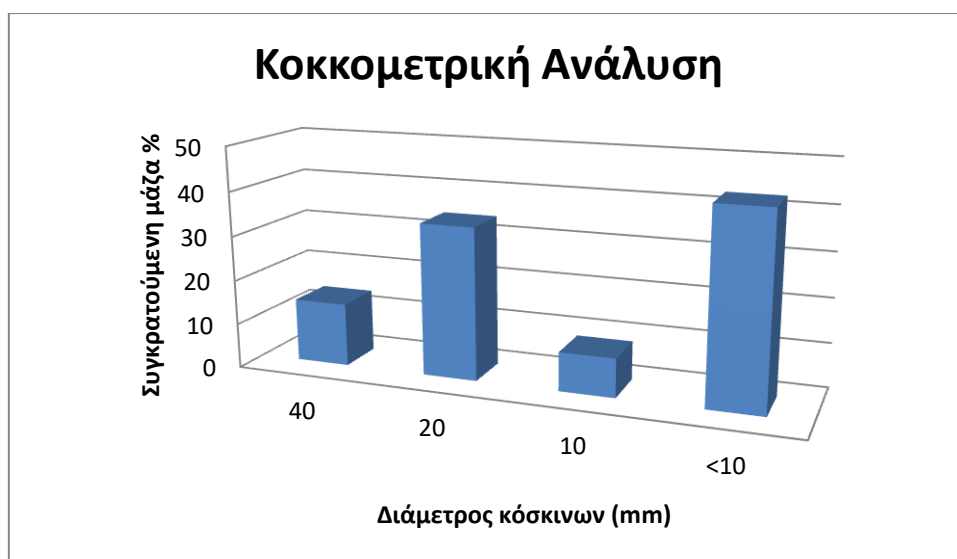
Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τη σύνθεση του τσιμεντοκονιάματος βασίστηκε στην πρότυπη μέθοδο της ASTM (American Society for Testing and Material) για τον έλεγχο της θλιπτικής αντοχής σε υδραυλικά τσιμεντοκονιάματα (ASTM C 109/C 109M-07 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars). Οι αναλογίες των υλικών (τσιμέντο, άμμος, νερό) παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2** σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο κατά την οποία προβλέπεται ο λόγος τσιμέντου: άμμο ίσος με 1:2.75, και αντίστοιχα ο λόγος νερού: τσιμέντο 0.485 για όλους τους τύπους τσιμέντου Portland.

Πίνακας 2. Αναλογίες υλικών

Υλικό	Αναλογία για 6 δοκίμια
Τσιμέντο (g)	500
Άμμος (g)	1375
Νερό (mL)	242

- Η άμμος, που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δομικών στοιχείων, είναι ασβεστολιθική, συσκευασμένη σε σάκους των 25 kg. Η κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών καθορίστηκε με σειρά πρότυπων κοσκίνων και παρουσιάζεται στο **διάγραμμα 2**:

Διάγραμμα 2. Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών



- Το σύνθετο τσιμέντο, τύπου CEM II/A-M (P-LL) 42.5 N Portland που χρησιμοποιήθηκε ήταν συσκευασμένο σε σάκους των 40 kg. Τόσο η άμμος, όσο και το τσιμέντο χρησιμοποιήθηκαν μετά από ξήρανση για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω υγρασίας. Δεδομένου ότι το άνυδρο τσιμέντο δεν μπορεί να συνδεθεί με την άμμο, αλλά αποκτά την συνδετική του ικανότητα μόνο όταν αναμειχθεί με νερό, η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι η αντίδραση που προσδίδει στο υλικό χαρακτηριστικά πήξης και σκλήρυνσης.
- Επίσης, το νερό που χρησιμοποιήθηκε πληροί το σχετικό πρότυπο ΕΛΟΤ 345 και είναι καθαρό, διαυγές, γλυκό και πόσιμο, απαλλαγμένο από επιβλαβείς προσμίξεις.
- Για τον περιορισμό του κόστους, δεν χρησιμοποιήθηκε υπερρευστοποιητής.

Κατά τη σύνθεση του τσιμεντοκονιάματος τα βήματα συνοψίζονται ως εξής:

(α) ξηρή ομογενοποίηση των υλικών στον αναδευτήρα μηχανικής ανάμειξης για 30 sec (**Εικόνα 9**),

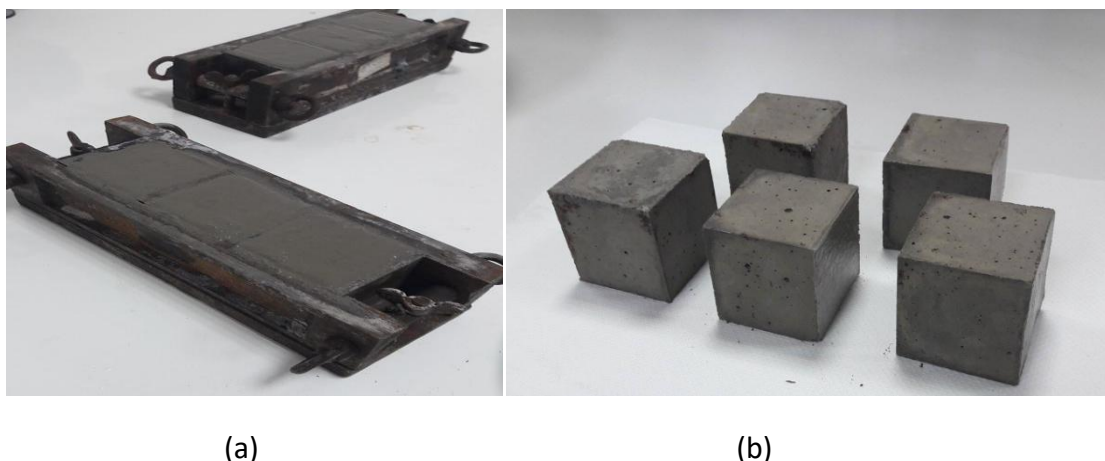
(β) σταδιακή προσθήκη νερού και ανάδευση των υλικών για 2 min.

(γ) με τη χρήση σέσουλας, το νωπό κονίαμα χυτεύεται σε κυβικές μήτρες διαστάσεων 50 mm σε δύο στρώσεις. Η συμπύκνωση της κάθε στρώσης πραγματοποιήθηκε χωρίς δονητή απαιτώντας 25 χτυπήματα με ράβδο για την κάθε στρώση. Η διαμόρφωση της επιφάνειας έγινε με μυστρί και τα δοκίμια διατηρήθηκαν στις μήτρες για 24 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 23.0 ± 3 °C και υγρασία ~50 %, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 10(α)**.



Εικόνα 9. Μηχανικός αναδευτήρας

(δ) Μετά από 24 ώρες, οι μήτρες αφαιρούνται και τα δοκίμια (**Εικόνα 10(b)**) τοποθετούνται σε θάλαμο συντήρησης με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας ($23.0 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) βυθισμένα σε νερό, ώστε να επιτρέπεται η ενυδάτωσή τους. Ο χρόνος παραμονής (ωρίμανσης) των δοκιμίων στο νερό είναι 7 ή 28 μέρες.



Εικόνα 10. Νωπό κονίαμα σε μήτρες (a), σκληρυμένα δοκίμια μετά από 24 ώρες (b)

(ε) Ακολουθεί η μέτρηση αντοχής των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη. Για κάθε σειρά πειραμάτων παρασκευάζονται τρία δοκίμια τα οποία συνθλίβονται σε 7 ημέρες και τρία δοκίμια τα οποία συνθλίβονται σε 28 ημέρες.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία διαφοροποιήθηκε όσον αφορά στις συνθήκες συντήρησης των δοκιμίων που περιέχουν πυρηνόξυλο: τα δείγματα αφέθηκαν να ξηρανθούν φυσικά επί 10 ημέρες και έπειτα (α) μία ομάδα δοκιμίων τοποθετήθηκε έως 28 ημέρες στο νερό, (β) μία ομάδα δοκιμίων αφέθηκε στους $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ οι υπόλοιπες ομάδες τοποθετήθηκαν σε ηλεκτρικό φούρνο για πέντε ώρες στους i) $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και στους ii) $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Alami et al., 2010).



Εικόνα 11. Δοκίμια με πυρηνόξυλο

3.3.1 Αναλογίες αντικατάστασης άμμου ή τσιμέντου

Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι αναλογίες αποβλήτων (σε ποσοστό κατά βάρος) που χρησιμοποιήθηκαν για την αντικατάσταση της άμμου και του τσιμέντου στο κονίαμα

Πίνακας 3. Αναλογίες αντικατάστασης άμμου και τσιμέντου από τα απόβλητα

Υλικά	Αντικατάσταση Άμμου (%)	Αντικατάσταση Τσιμέντου (%)
Τέφρα	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40
Τέφρα+ΐνες+ Βερμικ.	30, 40	30, 40
Πλαστικό PVC (0.3 cm)	5, 10	-
Πλαστικό ABS-FR40 (1 x 3 mm)	5, 10	-
LCD (< 4 mm)	10, 20	10, 20
LCD (< 0.5 mm)	10, 20	10, 20
Πυρηνόξυλο (<0.25 mm)	20, 40, 70	-
Πυρηνόξυλο (> 0.25 mm)	5, 20, 40, 70	-

3.4 Χαρακτηρισμός νωπού κονιάματος

Προκειμένου να χαρακτηριστεί το νωπό κονίαμα ως προς την εργασιμότητά του, πριν τοποθετηθεί στις μήτρες πραγματοποιήθηκαν δοκιμές όπως η εξάπλωση και ο περιεχόμενος αέρας. Επίσης, υπολογίστηκε η αναλογία νερού προς τσιμέντο (N/T) που περιείχε.

3.4.1 Εξάπλωση

Η δοκιμή εξάπλωσης (flow table) δίνει πληροφορίες για τον προσδιορισμό της συνεκτικότητας και της εργασιμότητας του τσιμεντοκονιάματος (**Prusty et al., 2016**). Η πραγματοποίησή της έγινε με βάση τον κανονισμό της ASTM για τον υπολογισμό της εξάπλωσης σε τσιμεντοκονίαμα (ASTM C230/C230M-08 Standard Specification for Flow Table in Tests of Hydraulic Cement και ASTM C1437 – 07 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar).

Η εξάπλωση ως μέτρο εργασιμότητας εκφράζεται με τη μέση διάμετρο σε cm που αποκτά μια κωνική στήλη νωπού κονιάματος, η οποία μορφώνεται επάνω στην τράπεζα εξάπλωσης (255 ± 2.5 mm). Η κωνική μήτρα έχει ύψος 50 ± 0.5 mm, η διάμετρος στο άνω άνοιγμα είναι 70 ± 0.5 mm, ενώ η διάμετρος του ανοίγματος στον πυθμένα είναι 100 ± 0.5 mm (**Εικόνα 12**). Έπειτα, αφού το μείγμα παραμένει μέσα στο δακτύλιο για 1 λεπτό, αφαιρείται ο δακτύλιος και εκτελείται ορισμένος αριθμός αναπηδήσεων της τράπεζας (25 χτυπήματα). Το μείγμα από την μορφή που παίρνει λόγω του δακτυλίου, μετά τα χτυπήματα, αρχίζει να εξαπλώνεται και αποκτά ένα κυκλικό σχήμα (**Εικόνα 13**). Μετράται στη συνέχεια η διάμετρος του, και κρίνεται αν το μείγμα έχει σωστή ποσότητα νερού ή όχι. Σύμφωνα με τους **Prusty et al., (2016)** μία επαρκής ροή είναι 175 ± 10 mm. Σύμφωνα με άλλες πηγές η αύξηση της διαμέτρου εκφράζεται ως ποσοστό της αρχικής με ιδανική τιμή εξάπλωσης στα περισσότερα κονιάματα να ορίζεται ίση με 110 % (**University of Kentucky, 2017**). Παράλληλα, οι **Bilir et al., (2015)** εκτίμησαν ότι στα δείγματά τους η διάμετρος μετά τη δοκιμή κυμαινόταν μεταξύ 168 και 194 mm.

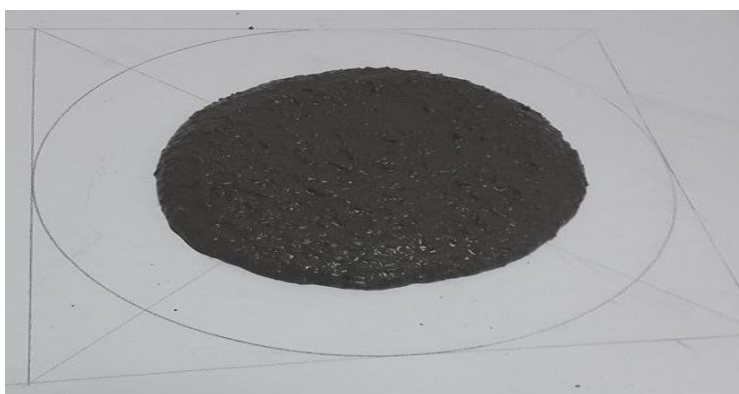
Για τη διεξαγωγή του πειράματος κατασκευάστηκε τράπεζα εξάπλωσης σύμφωνα με τις πρότυπες συνθήκες. Η κίνησή της πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα πραγματοποιώντας 25 κάθετα χτυπήματα ύψους 12.7 ± 0.13 mm σε διάρκεια 15 δευτερολέπτων.



Εικόνα 12. Νωπό κονίαμα στην κωνική μήτρα εξάπλωσης

Στην εργασία η εξάπλωση εκφράστηκε ως ποσοστό της αρχικής διαμέτρου ως εξής

$$flow = \frac{\text{τελική διάμετρος}}{\text{αρχική διάμετρος}} * 100\%$$



Εικόνα 13. Νωπό κονίαμα στην τράπεζα εξάπλωσης

3.4.2 Αερισμός

Κατά τη σύνθεση του κονιάματος παρασύρεται αέρας εντός του μίγματος με μορφή φυσαλίδων. Οι φυσαλίδες αέρα, οι οποίες τυπικά αποτελούν ένα μικρό ποσοστό του όγκου του κονιάματος, παρέχουν κενά για την ενδεχόμενη διαστολή του νερού (καθώς το νερό διαστέλλεται κατά τη διάρκεια ψύξης και δημιουργούνται κρύσταλλοι πάγου) με αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται ρωγμές. Από τη μία, χαμηλή περιεκτικότητα αέρα σε συνδυασμό με χαμηλές θερμοκρασίες προκαλούν ρωγμές στο σκυρόδεμα, ενώ από την άλλη αυξημένη περιεκτικότητα αέρα μπορεί να μειώσει αισθητά στην αντοχή του. Ο περιεχόμενος αέρας που χρειάζεται σε ένα τυπικό κονίαμα είναι 18 %.

Η δοκιμή του αερισμού (Air Content) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ASTM για τον υπολογισμό του περιεχόμενου αέρα στο τσιμεντοκονίαμα (ASTM C185-08 Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar). Έχοντας χρησιμοποιήσει επαρκή ποσότητα νερού ώστε να πληρείται η απαιτούμενη ροή, το νωπό κονίαμα συμπυκνώνεται σε ένα καλούπι γνωστού όγκου και καθορίζεται η μάζα. Έπειτα προσδιορίζεται ο περιεχόμενος αέρας γνωρίζοντας την πυκνότητα του κονιάματος, τις γνωστές πυκνότητες των συστατικών και τις αναλογίες μίγματος. Για τη διεξαγωγή αυτής της δοκιμής απαιτείται ένα κυλινδρικό δοχείο όγκου 400 ± 1 mL, βάθους περίπου 88 mm και εσωτερικής διαμέτρου 76 ± 2 mm. Το δοχείο πληρώνεται με το νωπό κονίαμα σε τρία διαδοχικά επίπεδα, καθένα από το οποίο υφίσταται συμπύκνωση με 20 χτυπήματα με την χρήση μεταλλικής ράβδου. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την πλήρωση και των 400 mL. Τέλος, το δοχείο ζυγίζεται και καταγράφεται η μάζα του κονιάματος. Ο υπολογισμός της εξάπλωσης γίνεται με την εφαρμογή του εξής τύπου:

$$\text{Air Content, volume \%} = 100 - [1 - \left(\frac{W_a}{W_c}\right)]$$

Όπου
$$W_a = \frac{W}{400} \frac{g}{mL}$$

Και
$$W_c = \frac{m_{\text{cement}} + m_{\text{sand}} + m_{\text{cement}} \cdot \frac{w}{c} \cdot 0.01}{\frac{m_{\text{cement}}}{SG_{\text{cement}}} + \frac{m_{\text{sand}}}{SG_{\text{sand}}} + \frac{m_{\text{cement}} \cdot \frac{w}{c} \cdot 0.01}{1}} \rightarrow$$

$$W_c = \frac{500 + 1375 + 500 \cdot \frac{w}{c} \cdot 0.01}{\frac{500}{3.15} + \frac{1375}{2.65} + \frac{500 \cdot \frac{w}{c} \cdot 0.01}{1}} \rightarrow$$

$$W_c = \frac{3752 + \frac{w}{c}}{1375.52 + \frac{w}{c}}$$

Όπου m_{cement} : η μάζα του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε

m_{sand} : η μάζα της άμμου που χρησιμοποιήθηκε

SG_{cement} : το ειδικό βάρος του τσιμέντου

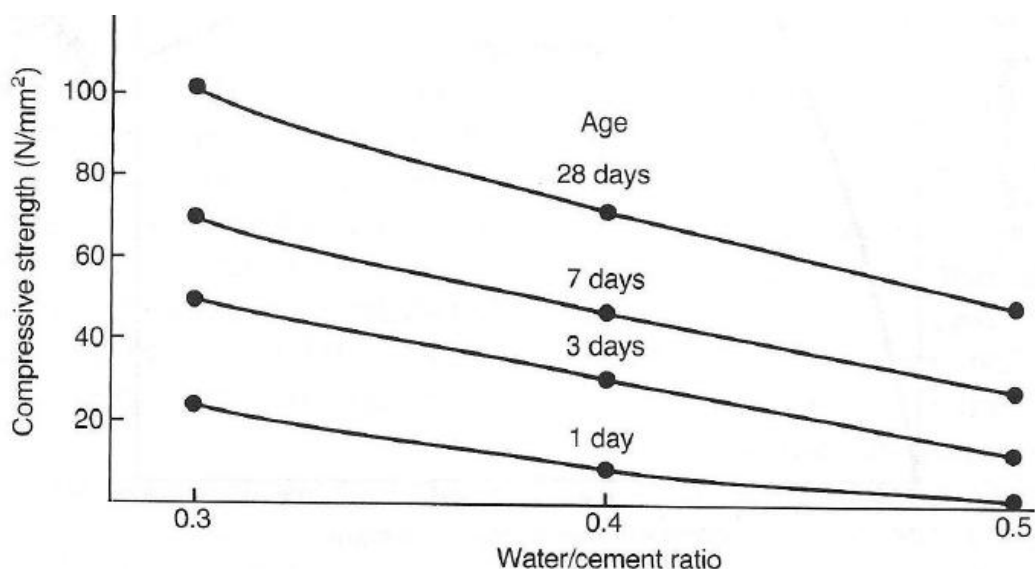
SG_{sand} : το ειδικό βάρος της άμμου

3.4.3 Λόγος νερού/τσιμέντου (N/T)

Μια σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει το κονίαμα είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T). Ο λόγος N/T καθορίζει την αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμό και κάμψη και επηρεάζει το πορώδες και τη συστολή του υλικού.

Το εύρος των τιμών αυτού του λόγου κυμαίνεται από 0.3 έως 0.8 με την τυπική του τιμή να εντοπίζεται στο 0.6-0.7. Όταν ο λόγος είναι πολύ χαμηλός (0.3) το υλικό έχει μικρή εργασιμότητα και κρίνεται απαραίτητη η χρήση υπερρρευστοποιητών. Ωστόσο, η χαμηλή τιμή του λόγου (0.4) υποδηλώνει πολύ καλή ποιότητα κονιάματος με μεγάλη θλιπτική αντοχή περίπου 38 MPa σε αντίθεση με τις υψηλές τιμές του λόγου, οι οποίες δίνουν χαμηλές αντοχές θλίψης περίπου 14 MPa (**Concrete Countertop Institute**). Επίσης, σύμφωνα με τον **Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος**, όταν ο λόγος w/c ξεπερνάει το 0.7 η τσιμεντοπάστα παρουσιάζει διαπερατότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η υδατοαπορροφητικότητα του υλικού και να μειώνεται η αντοχή. Στο **διάγραμμα 3** είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η ηλικία των δοκιμών, αυξάνεται η αντοχή σε θλίψη. Ωστόσο, η μείωση που επιφέρει η αύξηση του λόγου N/T στην αντοχή είναι σημαντική. Επομένως, μπορεί να διαπιστωθεί ότι η ηλικία ενός δοκιμίου, ως παράμετρος που επιδρά στην ποιότητα του κονιάματος, είναι μεν σημαντική, αλλά ο λόγος N/T εξακολουθεί να είναι καθοριστικός και να επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Διάγραμμα 3. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει του λόγου N/T (Domonone and Thurairatnam, 1986)



3.5 Χαρακτηρισμός σκληρυμένων δοκιμίων

Η επίδραση των αποβλήτων στην ποιότητα του τσιμεντοκονιάματος προσδιορίστηκε μελετώντας τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες που παρουσιάζουν.

3.5.1 Μηχανικές ιδιότητες

Θλιπτική αντοχή

Η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων προσδιορίστηκε στα κυβικά δείγματα (5 cm) με χρήση μηχανής θλίψης τύπου MTS (**Εικόνα 14**), με έλεγχο φορτίου και μετατόπισης με ρυθμό 0.01 mm/sec, παρέχοντας καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για κάθε μονοαξονική δοκιμασία συμπίεσης.

Για κάθε παρτίδα, τα δοκίμια υποβλήθηκαν στη δοκιμή θλιπτικής αντοχής μετά από χρόνο ωρίμανσης 7 και 28 ημερών. Η μηχανή θλίψης αποτελείται από δύο μονάδες: η μία είναι η μονάδα ελέγχου με την χρήση Η/Υ, η οποία εξασφαλίζει την εισαγωγή των δεδομένων της θλίψης των δοκιμίων, η δεύτερη αποτελεί την μονάδα εφαρμογής του φορτίου, όπου υπάρχει ο υδραυλικός μηχανισμός που μετακινεί δύο παράλληλες μεταξύ τους πλάκες, στην επιφάνεια των οποίων τοποθετούνται τα δοκίμια και στην συνέχεια θλίβονται.



Εικόνα 14. Μηχανή θλιπτικής αντοχής

Μέτρο ελαστικότητας

Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας (Young 's modulus ή Elastic modulus) γίνεται μέσω του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης, το οποίο έχει μορφή καμπύλης. Η τιμή του εντοπίζεται στο εύρος των σημείων, όπου υπό σταθερή αναλογία φορτίου-παραμόρφωσης η καμπύλη του διαγράμματος είναι γραμμική. Επίσης, το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη μηχανική συμπεριφορά δίνοντας τις περιοχές πλαστικότητας, ελαστικότητας κατά τη φόρτιση του δομικού στοιχείου, καθώς και το όριο θραύσης.

Το μέτρο ελαστικότητας εκφράζει την δυνατότητα που έχει ένα σώμα να αντιστέκεται στην παραμόρφωση. Αναφορικά με το κονιάμα, ο ακριβής προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητάς του είναι μία αρκετά σύνθετη διαδικασία, καθώς μεταβάλλεται συναρτήσει του είδους των αδρανών, της περιεκτικότητας του συνδετικού υλικού, της κοκκομετρικής σύνθεσης, του λόγου N/T, της ηλικίας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας.

3.5.2 Φυσικές ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες, μελετήθηκαν στα δοκίμια μετά από φυσική γήρανση 28 ημερών, και αφορούν το **πορώδες (porosity)**, την **πυκνότητα (bulk density)** και την **απορρόφηση του νερού (water absorption)**, μεγέθη που σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους. Οι φυσικές ιδιότητες κρίνονται σημαντικές για την αξιολόγηση της ποιότητας και ανθεκτικότητας του κονιάματος.

Η δομή των πόρων του κονιάματος επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες και ως εκ τούτου την θλιπτική αντοχή του κονιάματος. Επηρεάζει, επίσης, την ποσότητα του νερού που μπορεί να απορροφήσει και τη διαπερατότητά του καθώς η δομή των πόρων είναι αυτή που διαμορφώνει τα πιθανά μονοπάτια για τα υγρά ή τα αέρια που θα διεισδύσουν στο υλικό, όπως παγωμένο νερό ή ηλεκτρολύτες (**Diamond, 1999**).

Η τυπική τιμή για την πυκνότητα του κονιάματος κυμαίνεται από 1900 έως 2200 kg/m³, ενώ όσο αντικαθίσταται η άμμος με άλλα ελαφριά αδρανή (σκωρία, ζεόλιθοι, μπετονίτης, κίσηρης, περλίτης ή άλλα ανακυκλωμένα αδρανή) η πυκνότητα μειώνεται περίπου στα 1500 kg/m³ (**Σπηλιώτης; Γκόκα, 2013**). Όσον αφορά την

υδατοαπορροφητικότητα του κονιάματος, οι αποδεκτές τιμές εκτιμώνται έως 10 % (**Gingos and Sutan, 2011**).

Ο προσδιορισμός των προαναφερόμενων παραμέτρων έγινε με την μέθοδο του Αρχιμήδη. Για το κάθε δοκίμιο μετρήθηκε η αρχική μάζα με την χρήση ζυγαριάς, και έπειτα τοποθετήθηκε το κάθε ένα από αυτά σε δοχείο υπό κενό αέρα. Τα δοκίμια διαβράχθηκαν με νερό και παρέμειναν σε κενό αέρα για 24 ώρες (**Εικόνα 15**). Έπειτα, ζυγίστηκαν εκτός και εντός νερού.



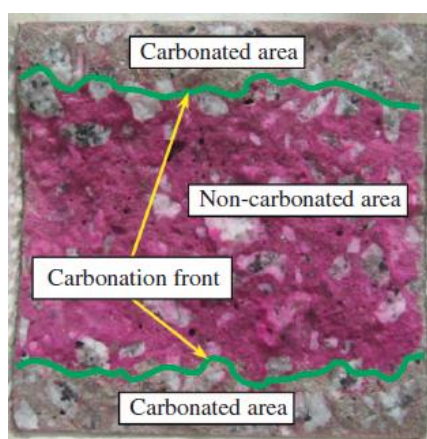
Εικόνα 15. Διαδικασία προσδιορισμού πορώδους υπό κενό αέρα

3.5.3 Δοκιμή ενανθράκωσης

Η ενανθράκωση είναι ένα φυσικό φαινόμενο που προέρχεται από την επίθεση αερίου CO_2 που μετατρέπει το ασβέστιο σε ανθρακικό ασβέστιο παρουσία νερού, επιφέροντας ως αποτέλεσμα την διάβρωση του οπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, η ενανθράκωση είναι το αποτέλεσμα της διάλυσης του CO_2 στους πόρους του κονιάματος, το οποίο αντιδράει με το ασβέστιο του υδροξειδίου του ασβεστίου και του ένυδρου πυριτικού ασβεστίου, ώστε να δημιουργηθεί ασβεστίτης (CaCO_3). Για τη διεξαγωγή του carbonation test (δοκιμή ενανθράκωσης), χρησιμοποιήθηκαν δύο κατηγορίες δοκιμίων: (α) δοκίμια που αφέθηκαν να ωριμάσουν για 28 μέρες, και (β) δοκίμια με ρωγμές τα οποία είχαν υποστεί, ήδη την δοκιμή θλιπτικής αντοχής. Όλα τα δοκίμια καλύφθηκαν εξωτερικά με εποξική ρητίνη στις πέντε από τις έξι πλευρές και αφέθηκαν να στεγνώσουν για 1 ημέρα σε συνθήκες δωματίου. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε τεχνητό περιβάλλον γήρανσης (κατάλληλη

πλαστική σακούλα) με 10 % CO₂, θερμοκρασία 25°C και 65 ± 5 % υγρασία, για χρονικό διάστημα 1 μήνα (Morandeu et al., 2014).

Έπειτα, τα δοκίμια κόπηκαν σε ύψος περίπου 1 cm με τη χρήση δίσκου υγρής κοπής και ψεκάστηκαν με διάλυμα 1 % φαινολοφθαλείνης. Για να εκτιμηθεί το βάθος της ενανθράκωσης από την επιφάνεια του κονιάματος, η φαινολοφθαλείνη χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης pH. Συγκεκριμένα, η ανθρακούχος περιοχή είναι άχρωμη (pH <8), η μη ανθρακούχος περιοχή είναι κόκκινη-πορφυρή ή ματζέντα (pH > 9.5) και η μεσαία ανθρακούχος περιοχή είναι ροζ (8 < pH < 9.5) (Εικόνα 16). Το βάθος διείσδυσης της ενανθράκωσης προσδιορίστηκε ως ο αριθμητικός μέσος όρος των μετρήσεων από έξι διαφορετικά σημεία ανά πλευρά των κύβων στην άχρωμη περιοχή, όπως συνιστά η βιβλιογραφία. Ένα πλήρως ενανθρακωμένο δομικό στοιχείο έχει pH περίπου 7.



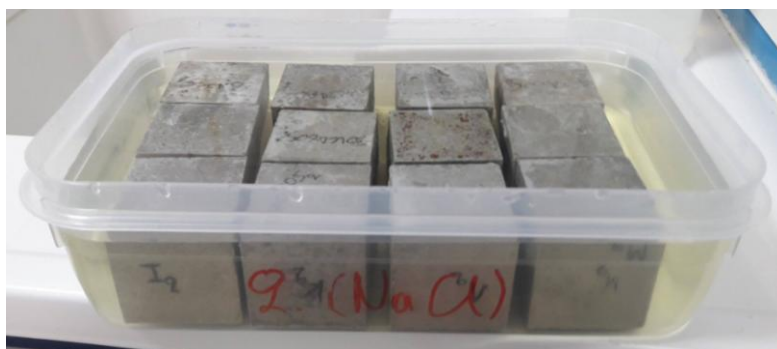
Εικόνα 16. Βάθος ενανθράκωσης (Jiang et al., 2017)

Σύμφωνα με μελέτη που αφορά σκυρόδεμα, το υλικό που έχει υποστεί κάποιου είδους φθορά είναι πιο επιρρεπές στη διείσδυση του CO₂, γεγονός που οφείλεται στην αλλαγή της κατανομής των πόρων αφήνοντας εκτεθειμένο μεγαλύτερο αριθμό πόρων από τους οποίους μπορεί να εισέρθει το αέριο (Jiang et al., 2017).

3.5.4 Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων

Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια ωρίμανσης 28 ημερών, στα οποία μετρήθηκαν οι διαστάσεις και η μάζα τους. Στη συνέχεια, εμποτίστηκαν με εποξική ρητίνη σε πέντε από τις έξι πλευρές, και αφέθηκαν να στεγνώσουν για 1 περίπου μέρα σε συνθήκες δωματίου. Έπειτα,

βυθίστηκαν σε διάλυμα 5 % NaCl σε θερμοκρασία 20 ± 2 °C. Τα δοκίμια παρέμειναν στο διάλυμα για 3 μήνες, ενώ κάθε μήνα ανανεωνόταν το διάλυμα **(Εικόνα 17)**.



Εικόνα 17. Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων σε διάλυμα 5% NaCl

Μετά το πέρας των 3 μηνών, τα δοκίμια κόπηκαν σε ύψος περίπου 1 cm με τη χρήση δίσκου υγρής κοπής και ψεκάστηκαν με διάλυμα νιτρικού αργύρου, AgNO_3 , συγκέντρωσης 0.1 N. Το βάθος διείσδυσης των ιόντων χλωρίου προσδιορίστηκε ως ο αριθμητικός μέσος όρος των μετρήσεων από τρία διαφορετικά σημεία ανά πλευρά των κύβων στην άχρωμη περιοχή **(Εικόνα 18) (Higashiyama et al., 2012)**.



Εικόνα 18 .Βάθος διείσδυσης χλωριόντων (Higashiyama et al., 2012)

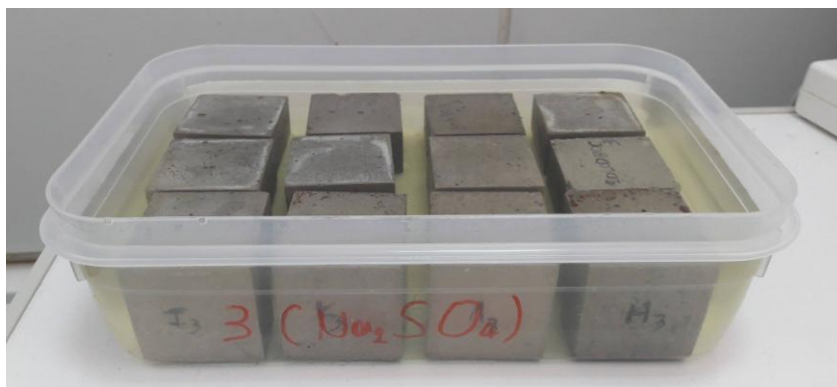
Η διείσδυση ιόντων χλωρίου (Chloride Ion Penetration) επιφέρει διάβρωση στην περίπτωση χαλύβδινου οπλισμού, καθώς συμβάλει στην μείωση της αντοχής και της λειτουργικότητας των κατασκευών. Τέτοιου είδους προβλήματα από ιόντα χλωρίου εμφανίζονται κυρίως σε κατασκευές που έρχονται σε επαφή με θαλασσινό νερό, όπως οι γέφυρες. Οι πιθανοί μηχανισμοί διείσδυσης είναι η απορρόφηση από τους πόρους του κονιάματος/σκυροδέματος ή διάχυση μέσα στο υλικό **(Stanish et al, University of Toronto)**. Σύμφωνα με τον **Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος**, το πάχος επικάλυψης του οπλισμού κυμαίνεται από 3 έως 5 cm, ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο είναι

εκτεθειμένο το υλικό (παραθαλάσσιες περιοχές, υποθαλάσσιο περιβάλλον ή εκτεθειμένο σε χημικές προσβολές).

3.5.5 Δοκιμή σε περιβάλλον θεικών ιόντων

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η δοκιμή επίδρασης θεικών ιόντων, Sulfate attack, κατασκευάστηκαν δύο σειρές δοκιμών με ίδιες αναλογίες υλικών, στα οποία μετά από γήρανση 28 ημερών μετρήθηκαν οι διαστάσεις και η μάζα τους. Η πρώτη σειρά δοκιμών εμποτίστηκε με εποξική ρητίνη σε πέντε από τις έξι πλευρές, και αφέθηκε να στεγνώσει για 1 περίπου μέρα σε συνθήκες δωματίου. Έπειτα, τα δοκίμια βυθίστηκαν σε διάλυμα 5% Na_2SO_4 σε θερμοκρασία $20 \pm 2^\circ\text{C}$ και παρέμειναν σε αυτές τις συνθήκες για 3μήνες, ενώ κάθε μήνα ανανεωνόταν το διάλυμα τους(**Εικόνα 19**). Τα δοκίμια της δεύτερης σειράς αφέθηκαν σε φυσική γήρανση σε συνθήκες δωματίου για το ίδιο χρονικό διάστημα. Έπειτα από 3 μήνες, μετρήθηκαν ξανά οι διαστάσεις και το βάρος των δοκιμών και υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλιπτικής αντοχής προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο σειρών και να εκτιμηθούν οι αλλαγές στο βάρος, στις διαστάσεις και στην αντοχή των δοκιμών λόγω της επαφής με τα θειικά ιόντα.

Η επαφή θεικών ιόντων με την επιφάνεια του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα χημικές αντιδράσεις, οι οποίες οδηγούν σε εκτεταμένες ρωγμές, διαστολή και απώλεια αντοχής του κονιάματος. Η εισχώρηση των θεικών ιόντων γίνεται συνήθως μέσω θαλασσινών ή υπόγειων υδάτων, μέσω δομικών υλικών, όπως τα τούβλα, που μετά από χρόνια χρήση απελευθερώνουν θείο ή ακόμα και από τη δραστηριότητα αναερόβιων μικροοργανισμών (Tian and Cohen, 2000; «Sulfate attack in concrete and mortar», 2015).



Εικόνα 19. Δοκιμή Sulfate attack σε διάλυμα 5% Na_2SO_4

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Χαρακτηριστικά νωπού κονιάματος

Για την απλούστερη διαχείριση των αποτελεσμάτων, τα δείγματα κωδικοποιήθηκαν βάσει του αποβλήτου (τέφρα: A, πυρηνόξυλο: OS, LCD γυαλί: G, πλαστικό: P), του υλικού που αντικαθίσταται (άμμος: S, τσιμέντο: C) και του ποσοστού αντικατάστασης (πχ. 10% αντικατάσταση της άμμου από τέφρα: 10A90S). Οι κωδικοί των δειγμάτων παρατίθενται στον **πίνακα 4**:

Πίνακας 4. Κωδικοποίηση δοκιμών

Υλικό	Κωδικοποίηση
Τέφρα	<p>10A90S: 10% αντικατάσταση της άμμου από τέφρα</p> <p>20A80S: 20% αντικατάσταση της άμμου από τέφρα</p> <p>30A70S: 30% αντικατάσταση της άμμου από τέφρα</p> <p>40A60S: 40% αντικατάσταση της άμμου από τέφρα</p> <p>10A90C: 10% αντικατάσταση του τσιμέντου από τέφρα</p> <p>20A80C: 20% αντικατάσταση του τσιμέντου από τέφρα</p> <p>30A70C: 30% αντικατάσταση του τσιμέντου από τέφρα</p> <p>40A60C: 40% αντικατάσταση του τσιμέντου από τέφρα</p> <p>V30A70S: 30% αντικατάσταση της άμμου από τέφρα, 9.5% βερμικουλίτης, 0.5% ίνες προπυλενίου</p> <p>V40A60S: 40% αντικατάσταση της άμμου από τέφρα, 9.5% βερμικουλίτης, 0.5% ίνες προπυλενίου</p> <p>V30A70C: 30% αντικατάσταση του τσιμέντου από τέφρα, 9.5% βερμικουλίτης, 0.5% ίνες προπυλενίου</p> <p>V40A60C: 40% αντικατάσταση του τσιμέντου από τέφρα, 9.5% βερμικουλίτης, 0.5% ίνες προπυλενίου</p> <p>Leiva_{et al., 2015}: 60% αντικατάσταση της άμμου από τέφρα, 9.5% βερμικουλίτης, 0.5% ίνες προπυλενίου</p>
Πυρηνόξυλο (με διάμετρο κόκκων <0.25 mm)	<p><u>Δοκίμια μετά από 10 ημέρες ωρίμανσης σε θερμοκρασία 25 °C</u></p> <p>20OS_{<0.25}80S_{10days 25 °C}: 20% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>40OS_{<0.25}60S_{10days 25 °C}: 40% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>70OS_{<0.25}30S_{10days 25 °C}: 70% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p><u>Δοκίμια μετά από 10 ημέρες ωρίμανσης σε θερμοκρασία 25 °C και</u></p>

	<p><u>Θέρμανση για 5 ώρες στους 60 °C</u></p> <p>20OS_{<0.25}80S_{10days} 60 °C: 20% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>40OS_{<0.25}60S_{10days} 60 °C: 40% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>70OS_{<0.25}30S_{10days} 60 °C: 70% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p><u>Δοκίμια μετά από 10 ημέρες ωρίμανσης σε θερμοκρασία 25 °C και</u></p> <p><u>θήρμανση για 5 ώρες στους 100 °C</u></p> <p>20OS_{<0.25}80S_{10days} 100 °C: 20% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>40OS_{<0.25}60S_{10days} 100 °C: 40% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>70OS_{<0.25}30S_{10days} 100 °C: 70% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p><u>Δοκίμια μετά από 28 ημέρες ωρίμανσης σε νερό</u></p> <p>20OS_{<0.25}80S_{28days}: 20% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>40OS_{<0.25}60S_{28days}: 40% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>70OS_{<0.25}30S_{28days}: 70% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p>
Πυρηνόξυλο (με διάμετρο κόκκων >0.25 mm)	<p><u>Δοκίμια μετά από 10 ημέρες ωρίμανσης σε θερμοκρασία 25 °C και</u></p> <p><u>θήρμανση για 5 ώρες στους 60 °C</u></p> <p>20OS_{>0.25}80S_{10days} 60 °C: 20% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>40OS_{>0.25}60S_{10days} 60 °C: 40% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>70OS_{>0.25}30S_{10days} 60 °C: 70% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p><u>Δοκίμια μετά από 10 ημέρες ωρίμανσης σε θερμοκρασία 25 °C και</u></p> <p><u>θήρμανση για 5 ώρες στους 100 °C</u></p> <p>20OS_{>0.25}80S_{10days} 100 °C: 20% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>40OS_{>0.25}60S_{10days} 100 °C: 40% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>70OS_{>0.25}30S_{10days} 100 °C: 70% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p><u>Δοκίμια μετά από 28 ημέρες ωρίμανσης σε νερό</u></p> <p>5OS_{>0.25}95S_{28days}: 5% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>20OS_{>0.25}80S_{28days}: 20% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p> <p>40OS_{>0.25}60S_{28days}: 40% αντικατάσταση της άμμου από πυρηνόξυλο</p>
LCD γυαλί (με μέγεθος κομματιών διαστάσεως <4 cm)	<p>10G_{<4}90S: 10% αντικατάσταση της άμμου από γυαλί</p> <p>20G_{<4}80S: 20% αντικατάσταση της άμμου από γυαλί</p> <p>10G_{<4}90C: 10% αντικατάσταση του τσιμέντου από γυαλί</p> <p>20G_{<4}80C: 20% αντικατάσταση του τσιμέντου από γυαλί</p>
LCD γυαλί (με διάμετρο	<p>10G_{<0.5}90S: 10% αντικατάσταση της άμμου από γυαλί</p>

κόκκων <0.5 mm)	20G_{<0.5}80S : 20% αντικατάσταση της άμμου από γυαλί 10G_{<0.5}90C : 10% αντικατάσταση του τσιμέντου από γυαλί 20G_{<0.5}80C : 20% αντικατάσταση του τσιμέντου από γυαλί
Πλαστικό PVC (με μέγεθος κομματιών διαστάσεων 3 x 3 mm)	5P_{PVC}95S : 5% αντικατάσταση της άμμου από πλαστικό 10P_{PVC}90S : 10% αντικατάσταση της άμμου από πλαστικό
Πλαστικό ABS-FR40 (με μέγεθος κομματιών διαστάσεων 1 x 3 mm)	5P_{ABS-FR40}95S : 5% αντικατάσταση της άμμου από πλαστικό 10P_{ABS-FR40}90S : 10% αντικατάσταση της άμμου από πλαστικό

Τα αποτελέσματα που αφορούν την εργασιμότητα και τον περιεχόμενο αέρα των κονιαμάτων παρουσιάζονται στον **πίνακα 5**.

Πίνακας 5.Αποτελέσματα ιδιοτήτων νωπού κονιάματος

Ονομασία		Εξάπλωση (cm)	Εξάπλωση (%)	N/T	Αερισμός (g κονιάματος σε 400 mL)	Αερισμός (%)
Δείγμα αναφοράς		12.30	137	0.484	904.18	18.12
A	10A90S	13.27	147	0.673	764.23	30.74
	20A80S	12.65	140	0.811	767.66	30.38
	30A70S	14.92	166	0.904	692.40	37.18
	40A60S	14.35	159	0.964	700.50	36.43
	10A90C	12.77	142	0.604	791.53	28.28
	20A80C	12.80	140	0.604	797.53	27.74
	30A70C	13.40	149	0.634	980.55	11.15
	40A60C	12.32	137	0.664	785.94	28.77
	V30A70S	13.15	146	1.170	634.50	42.36
	V40A60S	12.17	135	1.054	631.71	42.64
	V30A70C	10.52	117	1.068	794.23	27.88
	V40A60C	13.12	146	1.446	680.34	38.12
	Leiva ^{et al., 2015}	13.82	145	2.030	540.30	50.72
OS_{<0.25}	20OS _{<0.25} 80S _{10days 25 °C}	10.65	118	1.310	658.09	40.18
	40OS _{<0.25} 60S _{10days 25 °C}	10.22	114	2.368	522.88	52.24
	70OS _{<0.25} 30S _{10days 25 °C}	8.32	92	2.120	645.37	41.11
	20OS _{<0.25} 80S _{10days 60 °C}	10.65	118	1.310	658.09	40.18
	40OS _{<0.25} 60S _{10days 60 °C}	10.22	113	2.368	522.88	52.24
	70OS _{<0.25} 30S _{10days 60 °C}	8.32	92	2.120	645.37	41.11
	20OS _{<0.25} 80S _{10days 100 °C}	10.65	118	1.310	658.09	40.18
	40OS _{<0.25} 60S _{10days 100 °C}	10.22	113	2.368	522.88	52.24
	70OS _{<0.25} 30S _{10days 100 °C}	8.32	92	2.120	645.37	41.11
	20OS _{<0.25} 80S _{28days}	10.65	118	1.310	658.09	40.18
	40OS _{<0.25} 60S _{28days}	10.22	114	2.368	522.88	52.24
	70OS _{<0.25} 30S _{28days}	8.32	92	2.120	645.37	41.11
OS_{>0.25}	20OS _{>0.25} 80S _{10days 60 °C}	12.80	142	0.484	680.00	38.42

	40OS _{>0.25} 60S _{10days 60 °C}	9.05	101	0.664	574.47	47.94
	70OS _{>0.25} 30S _{10days 60 °C}	7.95	88	0.724	440.41	60.07
	20OS _{>0.25} 80S _{10days 100 °C}	12.80	142	0.484	680.00	38.42
	40OS _{>0.25} 60S _{10days 100 °C}	9.05	101	0.664	574.47	47.94
	70OS _{>0.25} 30S _{10days 100 °C}	7.95	88	0.724	440.41	60.07
	20OS _{>0.25} 80S _{28days}	12.80	142	0.484	680.00	38.42
	40OS _{>0.25} 60S _{28days}	9.05	101	0.664	574.47	47.94
	70OS _{>0.25} 30S _{28days}	7.95	88	0.724	440.41	60.07
G_{<4}	10G _{<4} 90S	9.95	111	0.484	890.21	19.39
	20G _{<4} 80S	11.07	123	0.484	728.46	34.04
	10G _{<4} 90C	12.52	139	0.627	816.05	26.06
	20G _{<4} 80C	11.10	123	0.705	854.57	22.54
G_{0.5}	10G _{<0.5} 90S	11.57	129	0.604	809.11	26.69
	20G _{<0.5} 80S	14.05	156	0.484	805.57	27.05
	10G _{<0.5} 90C	13.45	149	0.635	790.59	28.36
	20G _{<0.5} 80C	13.27	147	0.740	795.21	27.91
P_{PVC}	5P _{PVC} 95S	12.52	139	0.574	769.03	30.33
	10P _{PVC} 90S	11.50	126	0.564	737.50	33.19
P_{ABS-FR40}	5P _{ABS-FR40} 95S	10.10	112	0.674	823.07	25.40
	10P _{ABS-FR40} 90S	9.03	100	0.661	804.71	26.83

Σύμφωνα με τα δεδομένα του **πίνακα 6** και βάσει της βιβλιογραφίας, έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

(α) αναλογία N/T

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του κάθε αποβλήτου και πιο συγκεκριμένα το είδος και η κοκκομετρία του επέδρασαν σημαντικά στη διαμόρφωση του λόγου N/T κατά τη σύνθεση του κονιάματος. Υλικά όπως η τέφρα, το πυρηνόξυλο και το πλαστικό διαπιστώθηκε ότι έχουν αυξημένες απαιτήσεις νερού υπό περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, καθώς η άμμος είναι πιο χοντρόκοκκη από την ιπτάμενη τέφρα ($d_{50}=25 \mu\text{m}$) και σύμφωνα με τις κοκκομετρικές αναλύσεις των υλικών, προκύπτει ότι η συνολική επιφάνειά της είναι μεγαλύτερη. Επίσης, η επιφάνεια των σωματιδίων της είναι εξαιρετικά πορώδης, αλλά και υδρόφιλη, με αποτέλεσμα να αυξάνει τις απαιτήσεις νερού προκειμένου το κονίαμα να είναι εργάσιμο (**Adamidou et al., 2005**). Η αύξηση της απαίτησης νερού, και επομένως της αναλογίας N/T, είναι εμφανής όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης της άμμου από τέφρα, και παράλληλα επιβεβαιώνεται από εργασίες που έχουν ως αντικείμενο την αξιοποίηση της τέφρας σε κονίαμα και σκυρόδεμα (**Shafigh et al., 2016; Bilir et al., 2015**). Η τάση αυτή δεν παρατηρείται στις περιπτώσεις αντικατάστασης του τσιμέντου από τέφρα και αυτό εκτιμάται ότι σχετίζεται με τη μικρότερη συνεισφορά του τσιμέντου (% κατά βάρος) στο

κονίαμα (τσιμέντο: άμμος = 1:2.5). Επίσης, η κοκκομετρία κατέχει σημαντικό ρόλο όταν προστίθεται στο κονίαμα πλαστικό. Μικρότερη κοκκομετρία πλαστικού συνεπάγεται αντίστοιχα αύξηση της προσθήκης νερού για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ροή. Αντιθέτως, στην περίπτωση του πυρηνόξυλου, όταν προστίθεται το απόβλητο σε μεγαλύτερη κοκκομετρία (διάμετρος >0.25mm), παρόλο που μειώνεται η επιφάνεια του αποβλήτου, η εργασιμότητα του νωπού κονιάματος δυσχεραίνεται, διότι μειώνεται η συνεκτικότητα του μίγματος.

(β) περιεχόμενος αέρας

Συγκρίνοντας τις τιμές αερισμού των δοκιμών με το δοκίμιο αναφοράς, παρατηρείται ότι οι τιμές υπερβαίνουν το 18%, το οποίο αναφέρεται και βιβλιογραφικά για τυπικό κονίαμα. Οι λόγοι για τους οποίους ο όγκος των φυσαλίδων αέρα είναι μεγαλύτερος οφείλονται κυρίως στη συμπίκνωση του κονιάματος. Παρόλο που εφαρμόστηκε ο απαιτούμενος αριθμός χτυπημάτων σε κάθε διάστρηση του υλικού στη μήτρα, εκτιμάται ότι η χρήση δονητή θα μπορούσε να περιορίσει την εισχώρηση αέρα στο εσωτερικού του υλικού πετυχαίνοντας καλύτερη συμπίκνωση.

Τόσο η αναλογία N/T, όσο και ο περιεχόμενος αέρας είναι παράμετροι που αναμένεται να επηρεάσουν τις φυσικές, και ακολούθως τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών.

(γ) εξάπλωση

Τα ποσοστά εξάπλωσης που παρουσιάζονται στον **πίνακα 6** βρίσκονται εντός των ορίων που αναφέρουν προγενέστερες μελέτες (**Prusty et al., 2016; Bilir et al., 2015**). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εξάπλωση δεν επηρεάζεται κατά το πλείστον από τον λόγο N/T. Αυτό ενδεχομένως σχετίζεται με την πυκνότητα του υλικού (είδος αποβλήτου που προστίθεται). Υλικά με χαμηλή πυκνότητα όπως το πυρηνόξυλο και το πλαστικό, παρόλο που χρειάζονται μεγάλη αναλογία N/T, η ροή τους είναι περιορισμένη και αυτό αποδίδεται στη φύση των δύο υλικών, καθώς χαρακτηρίζονται ως ελαφρά υλικά συγκριτικά με το γυαλί και την τέφρα.

4.2 TCLP Ανάλυση

Τα τοξικά μέταλλα που εξετάστηκαν στα δοκίμια που περιείχαν τέφρα είναι το Αρσενικό (As), το Βάριο (Ba), το Κάδμιο (Cd), ο Μόλυβδος (Pb), ο Υδράργυρος (Hg), το Σελήνιο (Se), ο Άργυρος (Ag) και το Στρόντιο (Sr). Οι συγκεντρώσεις των στοιχείων στο έκπλυμα παρουσιάζονται στον **πίνακα 6**.

Πίνακας 6.Αποτελέσματα ανάλυσης TCLP σε δοκίμια με λιγνιτική τέφρα

Στοιχεία	Συγκεντρώσεις (mg/L)										
	Δείγμα αναφοράς	10A90C	10A90S	20A80C	20A80S	30A70C	30A70S	40A60C	40A60S	Τέφρα	Όρια
As	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0
Ba	0.3349	0.2196	0.2882	0.2415	0.2055	0.1676	0.4380	0.1790	0.8560	1.2441	100.0
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
Se	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0
Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0
Sr	1.1941	1.5101	1.8449	1.4905	1.6722	1.4650	1.9802	1.4261	2.1591	6.0064	-

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα περισσότερα στοιχεία που εξετάστηκαν είτε δεν ανιχνευτήκαν (As, Cd, Pb, Hg, Se, Ag), είτε οι συγκεντρώσεις τους βρίσκονται κάτω από το όριο ανίχνευσης του οργάνου. Επομένως, τα νομοθετημένα όρια της TCLP που αφορούν τα As, Cd, Pb, Hg, Se, Ag πληρούνται.

Βάριο και στρόντιο ανιχνευτήκαν σε όλα τα δείγματα. Η συγκέντρωση του βαρίου στην τέφρα δεν υπερβαίνει το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο (100 mg/L). Ωστόσο, παρατηρείται ότι η αξιοποίησή της σε τσιμεντοκονίαμα περιορίζει την εκπλυσιμότητα του βαρίου. Αναφορικά με το στρόντιο, η συγκέντρωσή του στο έκπλυμα του κονιάματος είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στο έκπλυμα της τέφρας. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα με την προσθήκη της τέφρας σε δομικά υλικά, όπως το τσιμεντοκονίαμα, μπορεί να επιτευχθεί μερική ακινητοποίηση τοξικών στοιχείων με αποτέλεσμα την απελευθέρωση μικρότερων συγκεντρώσεων στο περιβάλλον σε περίπτωση εναπόθεσής τους σε χώρο υγειονομικής ταφής.

4.3 Μηχανικές ιδιότητες

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμών. Οι πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν περιέχουν πληροφορίες για τη θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμών για χρόνο γήρανσης 7 και 28 ημέρες, συναρτήσει των ποσοστών αντικατάστασης της άμμου ή του τσιμέντου από τα απόβλητα. Οι τιμές αναπαριστούν τον αριθμητικό μέσο όρο τριών επαναλήψεων.

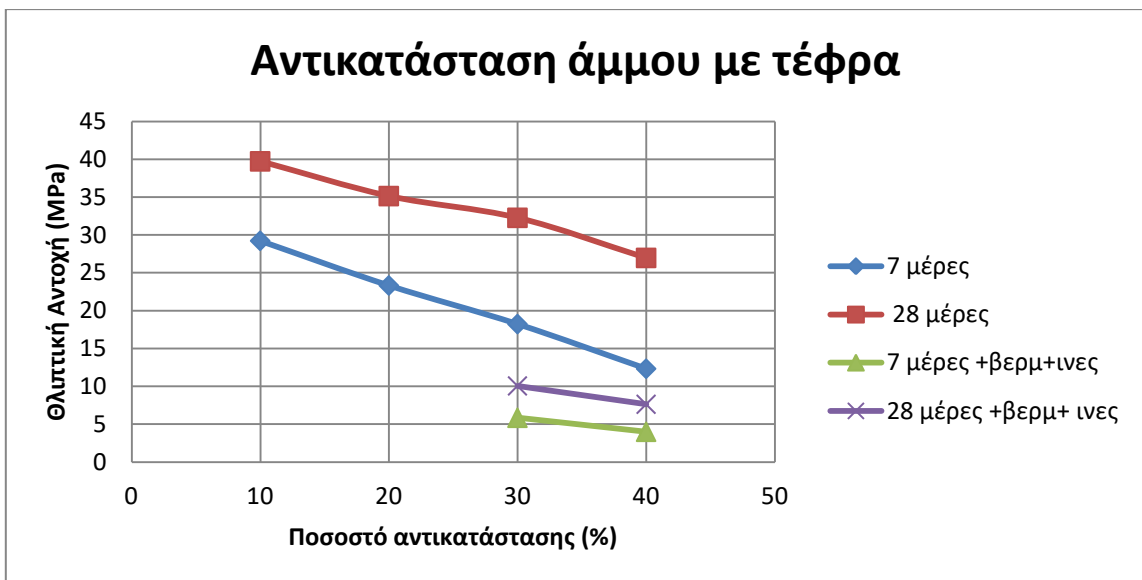
- Αντικατάσταση άμμου και τσιμέντου με τέφρα

Πίνακας 7.Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμών τέφρας

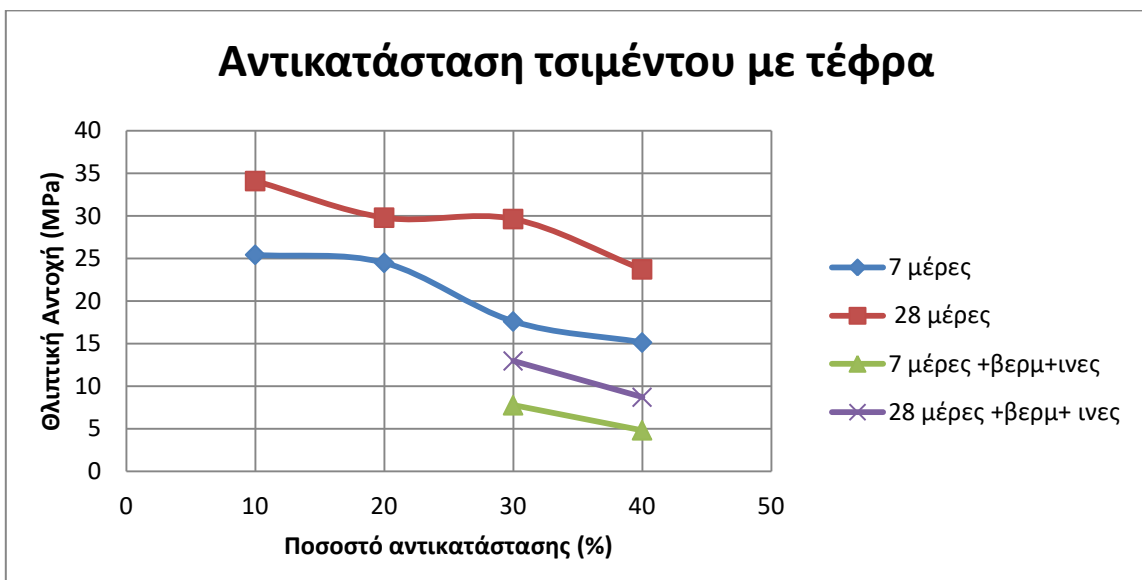
Ονομασία	Θλιπτική Αντοχή		Μέτρο Ελαστικότητας	
	7 ημέρες (MPa)	28 ημέρες (MPa)	7 ημέρες (MPa)	28 ημέρες (MPa)
Δείγμα αναφοράς	39.08	42.57	945.09	1255.35
10A90S	29.22	39.72	797.03	948.6
20A80S	23.32	35.13	549.18	797.75
30A70S	18.22	32.26	506.56	816.32
40A60S	12.32	26.96	367.77	668.78
10A90C	25.42	34.08	469.25	741.77
20A80C	24.48	29.78	428.83	563.78
30A70C	17.59	29.62	317.95	822.68
40A60C	15.12	23.71	389.40	606.96
V30A70S	5.84	10.05	150.69	202.00
V40A60S	3.99	7.62	94.21	145.66

V30A70C	7.75	12.95	251.73	304.18
V40A60C	4.81	8.69	102.98	223.79
Leiva ^{et al., 2015}	2.22	5.45	54.76	168.43

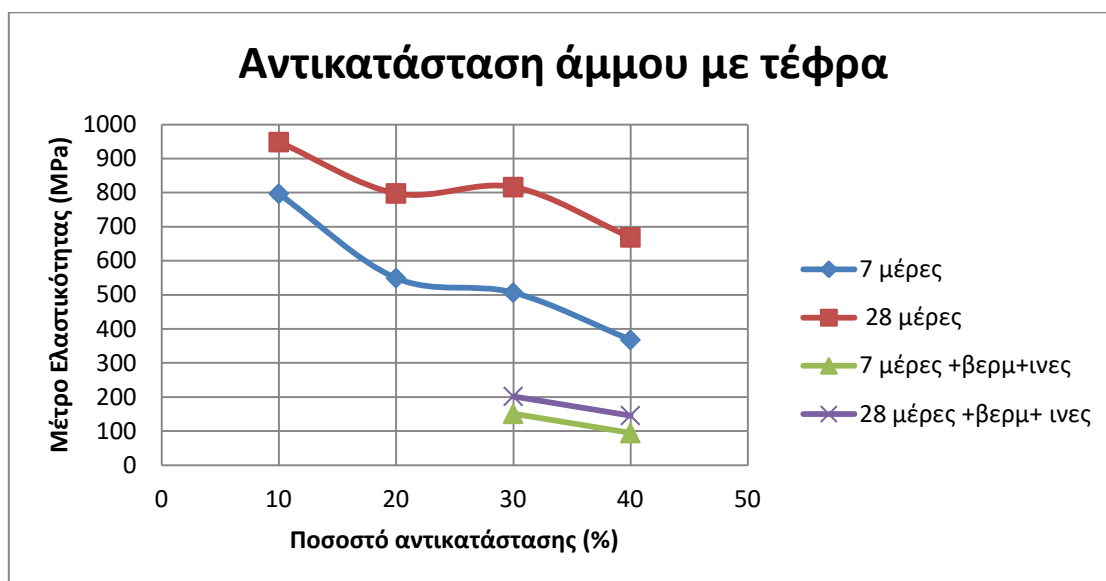
Διάγραμμα 4.Θλιπτική αντοχή συναρτήσει της περιεχόμενης τέφρας (%) ως αδρανές υλικό



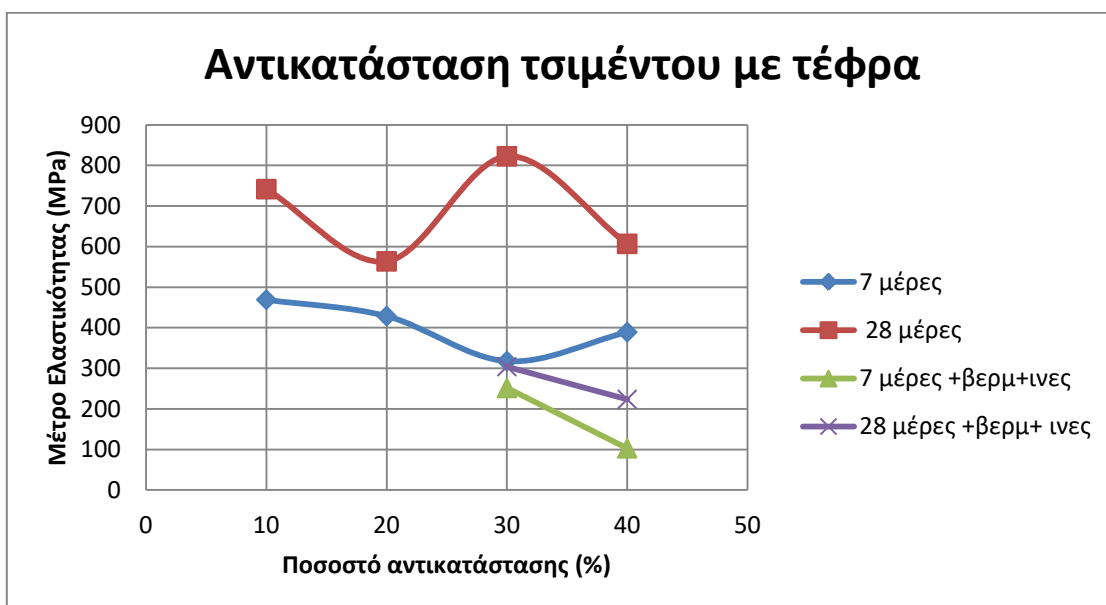
Διάγραμμα 5. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει της περιεχόμενης τέφρας (%) ως συνδετικό υλικό



Διάγραμμα 6. Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της περιεχόμενης τέφρας (%) ως αδρανές υλικό



Διάγραμμα 7. Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της περιεχόμενης τέφρας (%) ως συνδετικό υλικό



Η προσθήκη ιπτάμενης λιγνιτικής τέφρας στο τσιμεντοκονίαμα, επέφερε μείωση της θλιπτικής αντοχής. Η μείωση της αντοχής είναι μεγαλύτερη όταν αντικαθίσταται το τσιμέντο με τέφρα, ενώ στις περιπτώσεις αντικατάστασης της άμμου η μείωση της αντοχής είναι μικρότερη. Πιο συγκεκριμένα, 40 % αντικατάσταση της άμμου είχε ως αποτέλεσμα μείωση της αντοχής κατά 37 %, ενώ 40 % αντικατάσταση τσιμέντου επέφερε μείωση 44 %. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρόλο που τα αδρανή συνιστούν το κύριο υλικό στη

σύνθεση του κονιάματος με αναλογία τσιμέντου: άμμο = 1:2.5, η μείωση του συνδετικού υλικού είναι κρίσιμη, καθώς το τσιμέντο προσδίδει αντοχή στο κονίαμα. Βέλτιστες τιμές αντοχής παρουσίασαν τα δοκίμια που περιείχαν 10 % τέφρα αντί άμμου, με τιμή 39.79 MPa σε 28 μέρες ωρίμανσης. Αντίστοιχα, αναφορικά με τα δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο με τέφρα, η υψηλότερη αντοχή είναι 34.08 MPa για ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου ίσο με 10 %. Η μείωση της επιβεβαιώνεται από αντίστοιχες παλαιότερες μελέτες, σύμφωνα με τις οποίες προκύπτει: 70 % μείωση για 100 % αντικατάσταση της άμμου από τέφρα (**Bilir et al., 2015**), και 33 % μείωση για 50 % αντικατάσταση τσιμέντου από τέφρα (**Shafigh et al., 2016**).

Αναφορικά με το μέτρο ελαστικότητας, όσο υψηλότερη είναι η τιμή του τόσο πιο ελαστικό στην παραμόρφωση, άρα και ανθεκτικό σε καταπόνηση φορτίου, είναι το δομικό στοιχείο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η προσθήκη τέφρας για αντικατάσταση των αδρανών μειώνει την ελαστικότητα του κονιάματος. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις αντικατάστασης τσιμέντου, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζουν διακυμάνσεις. Σύμφωνα με τους **Bilir et al., (2015)**, το μέτρο ελαστικότητας είναι στενά συνδεδεμένο με το περιεχόμενο των αδρανών και την ακαμψία που παρουσιάζουν. Συν τοις άλλοις, οι μηχανικές ιδιότητες σχετίζονται με τη συμπύκνωση του νωπού κονιάματος στη μήτρα και με τα χαρακτηριστικά του νωπού κονιάματος. Επομένως, λόγω της μικρής εργασιμότητας του νωπού κονιάματος όσο αυξάνεται το περιεχόμενο της τέφρας και όσο αυξάνεται ο λόγος N/T, αναλόγως μειώνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Σημαντικό ρόλο κατέχει επίσης ο αερισμός, καθώς όσες περισσότερες είναι οι φυσαλίδες του αέρα, τόσο περισσότερα κενά αέρα θα έχει το δοκίμιο, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής και της ελαστικότητας. Υψηλοί λόγοι N/T και μεγάλες τιμές αερισμού παρατηρούνται στα δοκίμια με υψηλό περιεχόμενο σε τέφρα και κυρίως στις περιπτώσεις αντικατάστασης άμμου, γεγονός που εξηγεί τη μείωση της αντοχής. Ακόμα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ηλικία του δοκιμίου, αυξάνεται η αντοχή και η ελαστικότητα του (**Shafigh et al., 2016**).

Τα δοκίμια **Leiva et al., 2015**, που κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις προτεινόμενες αναλογίες ανάμιξης από τη μελέτη **Leiva et al., (2016)**, παρουσίασαν μεγαλύτερες τιμές θλιπτικής αντοχής από εκείνες της βιβλιογραφίας (0.8 ± 0.1 MPa). Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας επιτεύχθηκαν με την προσθήκη βερμικουλίτη σε

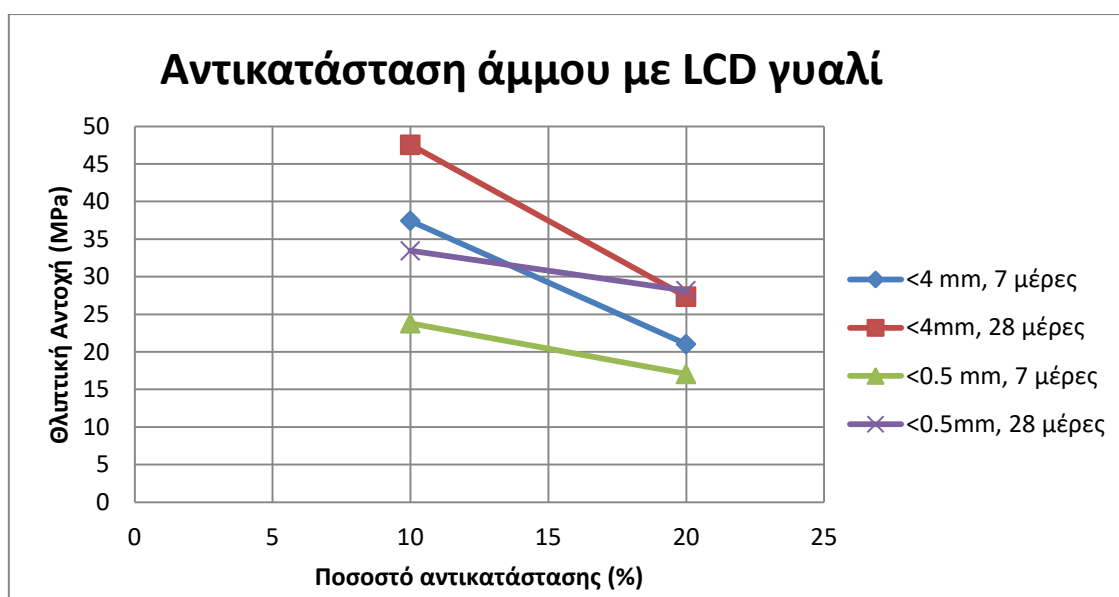
αναλογίες αντικατάστασης 30 και 40 % τσιμέντου και άμμου, έναντι 60 % που συστήνει η μελέτη. Ωστόσο, η απόκλιση στην αντοχή ενδέχεται να οφείλεται στο διαφορετικό συνδετικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε (γύψος στη μία περίπτωση-τσιμέντο στην παρούσα εργασία). Ακόμα διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη των ινών προπυλενίου δε συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της αντοχής με το πέρας των 28 ημερών, αλλά συμβάλει στην αύξηση την αντοχής μετά από γήρανση 7 ημερών (Cao et al., 2017).

➤ Αντικατάσταση άμμου και τσιμέντου με γυαλί LCD

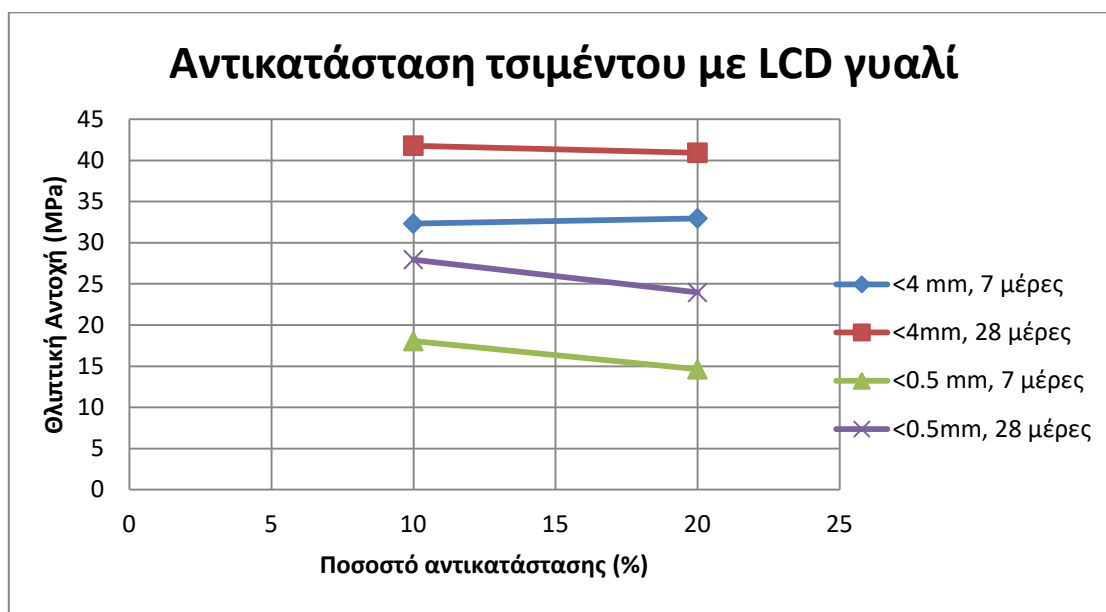
Πίνακας 8.Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμών LCD γυαλιού

Ονομασία	Θλιπτική Αντοχή		Μέτρο Ελαστικότητας	
	7 ημέρες (MPa)	28 ημέρες (MPa)	7 ημέρες (MPa)	28 ημέρες (MPa)
Δείγμα αναφοράς	39.08	42.57	945.09	1255.35
10G _{<4} 90S	37.44	47.54	970.41	1199.30
20G _{<4} 80S	21.02	27.34	283.59	717.62
10G _{<4} 90C	32.32	41.79	860.12	1184.28
20G _{<4} 80C	32.96	40.93	799.03	1297.41
10G _{<0.5} 90S	23.81	33.44	611.59	796.67
20G _{<0.5} 80S	17.06	28.15	503.47	606.11
10G _{<0.5} 90C	18.06	27.95	431.17	776.87
20G _{<0.5} 80C	14.63	23.95	617.58	651.71

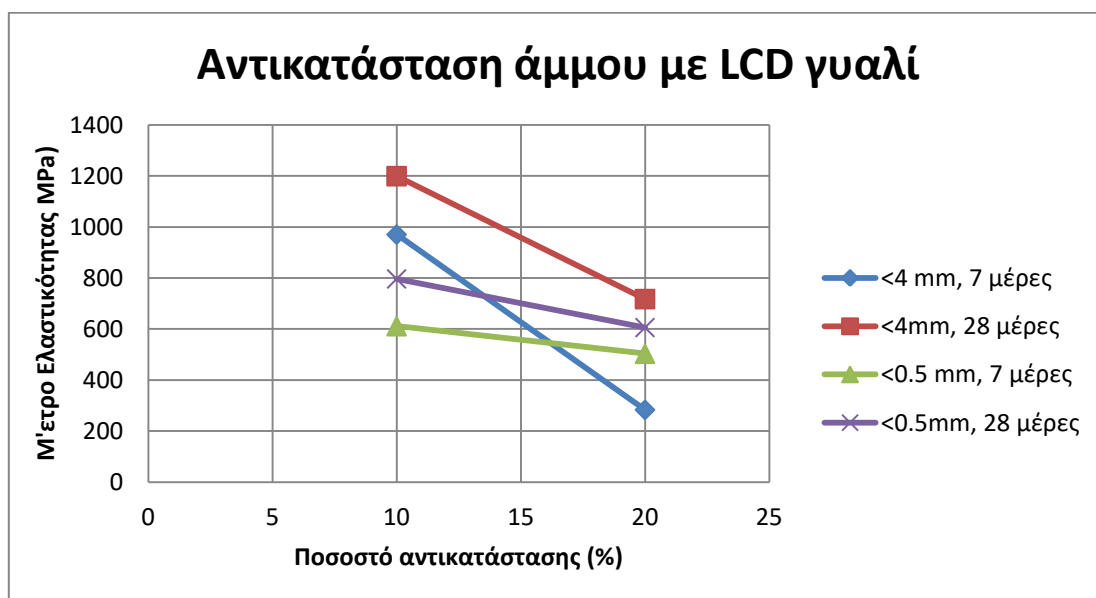
Διάγραμμα 8. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει του περιεχόμενου γυαλιού LCD (%) ως αδρανές υλικό



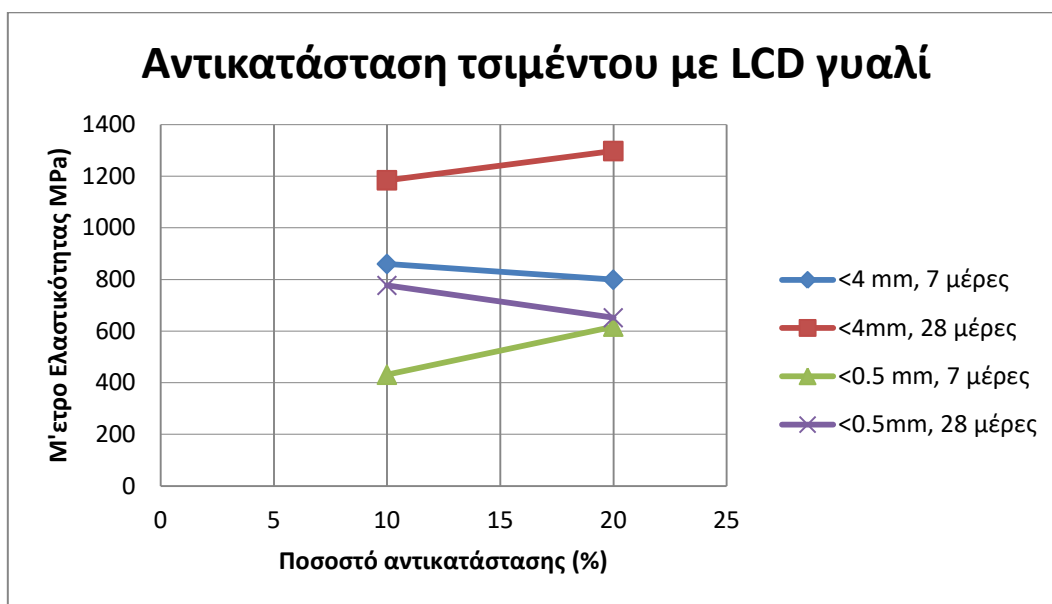
Διάγραμμα 9.Θλιπτική αντοχή συναρτήσει του περιεχόμενου γυαλιού LCD (%) ως συνδετικό υλικό



Διάγραμμα 10. Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει του περιεχόμενου γυαλιού LCD (%) ως αδρανές υλικό



Διάγραμμα 11. Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει του περιεχόμενου γυαλιού LCD (%) ως συνδετικό υλικό



Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη LCD γυαλιού κοκκομετρίας μικρότερης των 4 mm στο τσιμεντοκονίαμα σε ποσοστό 10 % σε αντικατάσταση άμμου, είχε ως αποτέλεσμα 10 % αύξηση της θλιπτικής αντοχής, ενώ η αντοχή των δοκιμών με 10% αντικατάσταση τσιμέντου είναι συγκρίσιμη με το δείγμα αναφοράς. Επίσης, προκύπτει ότι όταν αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης είτε της άμμου, είτε του τσιμέντου σε 20 %, μειώνεται η αντοχή των κονιαμάτων έως και 40 %. Τα δοκίμια που παρουσιάζουν μεγαλύτερη μείωση της αντοχής είναι αυτά στα οποία έγινε αντικατάσταση τσιμέντου καθώς το τσιμέντο λειτουργεί ως συνδετικό υλικό και η μείωση της περιεκτικότητάς του είναι κρίσιμη σε ότι αφορά τη μηχανική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η κοκκομετρία του υλικού επηρεάζει την αντοχή, καθώς η προσθήκη θραυσμάτων γυαλιού μεγέθους μικρότερων των 4 mm αντί για την μορφή σκόνης (<0.5 mm) προσδίδει υψηλότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας στο κονίαμα. Συγκεκριμένα, η βέλτιστη αντοχή σε θλίψη εντοπίζεται σε ποσοστό 10 % αντικατάστασης της άμμου με τιμή 47.54 MPa σε 28 μέρες ωρίμανσης και λόγο N/T να ισούται με 0.484 (σε πλήρη συμφωνία με την πρότυπη μέθοδο ASTM), ενώ για το τσιμέντο η αντίστοιχη τιμή είναι 41.79 MPa σε αναλογία αντικατάστασης 10 % και λόγο N/T ίσο με 0.627 με το γυαλί να βρίσκεται σε μορφή θραυσμάτων και στις δύο περιπτώσεις αντικατάστασης.

Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, σχεδόν όλες οι τιμές, που αφορούν τα δοκίμια με περιεχόμενο γυαλί LCD σε μορφή θραυσμάτων < 4 mm, είναι συγκρίσιμες με αυτές του

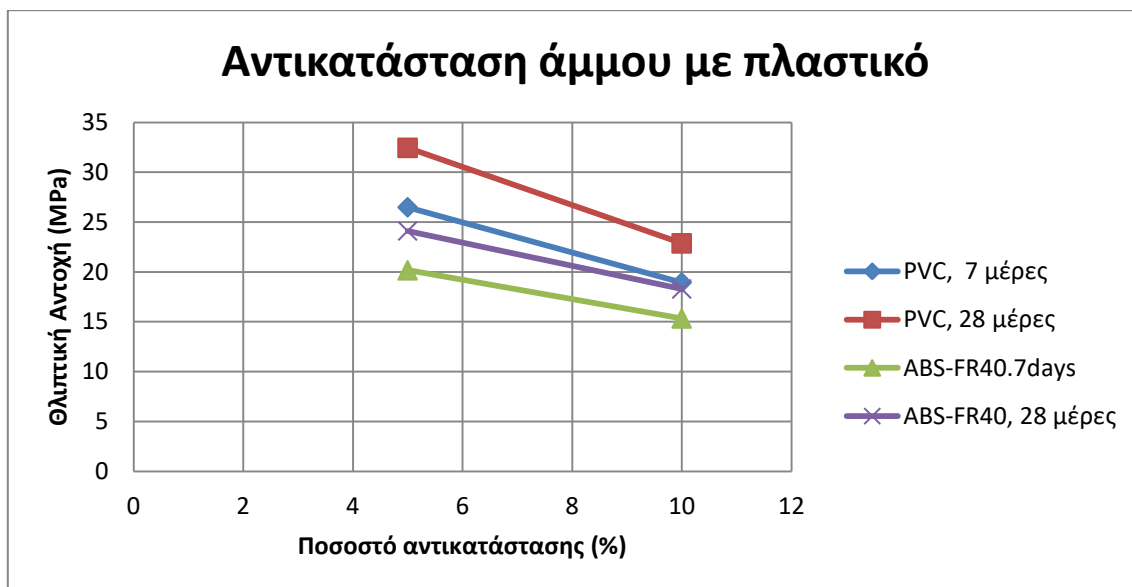
δείγματος αναφοράς. Επομένως, η ελαστικότητα των δοκιμών δεν επηρεάστηκε από την παρουσία του γυαλιού στο κονίαμα. Τα δοκίμια στα οποία προστέθηκε γυαλί σε σκόνη (διάμετρος < 0.5 mm) παρουσιάζουν μικρότερη ελαστικότητα είτε στην περίπτωση που το γυαλί αντικαθιστά την άμμο, είτε στην περίπτωση που το γυαλί αντικαθιστά το τσιμέντο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καλή μηχανική συμπεριφορά που εμφάνισαν τα δοκίμια με γυαλί LCD σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του νωπού κονιάματος, τα οποία είναι καθοριστικά για τα επίπεδα αντοχής. Λόγω της φύσης του υλικού, εφόσον το γυαλί είναι μη διαπερατό, το μείγμα σύνθεσης για τα εν λόγω δοκίμια απαιτεί περιορισμένη ποσότητα νερού για να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα, με αποτέλεσμα οι τιμές του λόγου N/T να συγκρίνονται με εκείνες που προτείνει η μέθοδος ASTM. Τέλος, από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται ότι όσο αυξάνεται η ηλικία του δοκιμίου που περιέχει γυαλί LCD, αυξάνεται η αντοχή και η ελαστικότητα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν αναφορικά με την επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης άμμου με γυαλί LCD επιβεβαιώνονται και από βιβλιογραφικές πηγές. Σε αντίστοιχη μελέτη στην οποία εξετάστηκαν δοκίμια με περιεκτικότητα γυαλιού 20, 40, 60 και 80 % ως αδρανή, εκτιμήθηκε ότι η μικρότερη περιεκτικότητα αποβλήτου γυαλιού επιφέρει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στο δομικό στοιχείο (Wang, 2009), ενώ στα πειράματα των Wang and Huang, (2010), προτείνεται βέλτιστη περιεκτικότητα γυαλιού ποσοστό 20 % του συνόλου των αδρανών. Επίσης, σύμφωνα με τους Aliabdo et al., (2016) διαπιστώνεται (α) 9 % αύξηση της θλιπτικής αντοχής όταν εφαρμόζεται 10 % κατά βάρος αντικατάσταση τσιμέντου με γυαλί, και (β) μείωση της αντοχής όταν προστίθεται ποσοστό γυαλιού μεγαλύτερο από 15 % κατά βάρος.

➤ Αντικατάσταση άμμου με πλαστικό

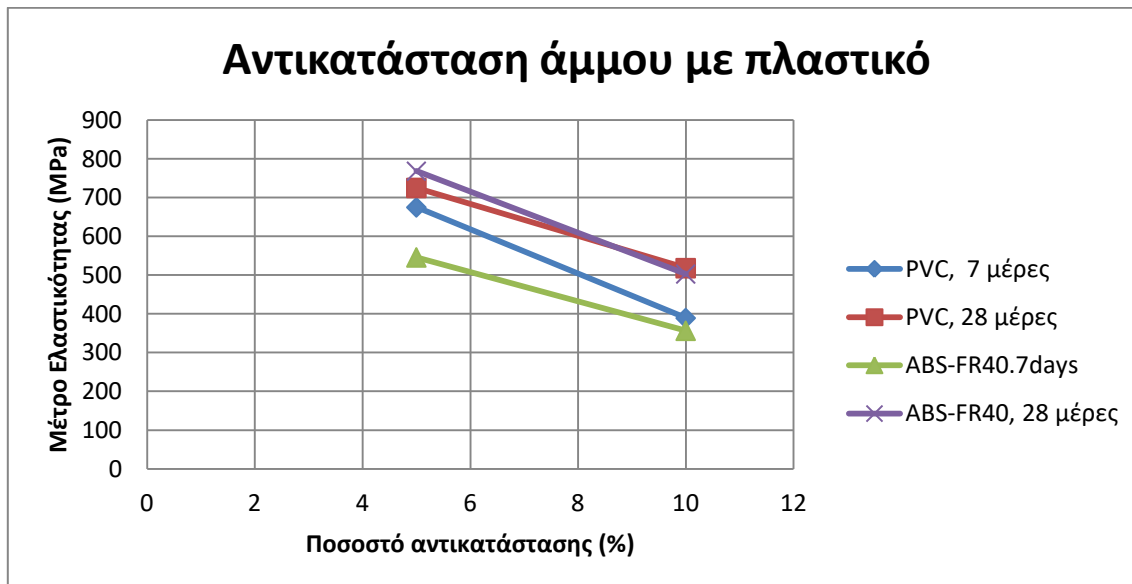
Πίνακας 9. Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμών με πλαστικό

Ονομασία	Θλιπτική Αντοχή		Μέτρο Ελαστικότητας	
	7 ημέρες (MPa)	28 ημέρες (MPa)	7 ημέρες (MPa)	28 ημέρες (MPa)
Δείγμα αναφοράς	39.08	42.57	945.09	1255.35
5P _{PVC} 95S	26.49	32.45	674.75	724.84
10P _{PVC} 90S	18.945	22.87	389.12	517.82
5P _{ABS-FR40} 95S	20.17	24.11	545.65	768.05
10P _{ABS-FR40} 90S	15.34	18.29	356.42	502.76

Διάγραμμα 12. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει του περιεχόμενου πλαστικού (%) ως αδρανές



Διάγραμμα 13. Μέτρο ελαστικότητας- συναρτήσει του περιεχόμενου πλαστικού (%) ως αδρανές



Η αυξανόμενη προσθήκη πλαστικού λειτουργεί αρνητικά στις μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας, όπως αναφέρεται και στη μελέτη των **Ruiz-Herrero et al., (2016)**. Οι βέλτιστες τιμές αντοχής εντοπίζονται όταν αντικαθίσταται 5 % των αδρανών με πλαστικό επιφέροντας καλύτερη

μηχανική συμπεριφορά σε θλίψη έναντι του 10% πλαστικού ως αδρανές για τα δύο είδη πολυμερών που εξετάστηκαν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην χαμηλή ικανότητα σύνδεσης της τσιμεντόπαστας με την επιφάνεια του πλαστικού (**Manjunath Ashwini, 2016**). Η προσθήκη PVC υλικού με διαστάσεις 3 x 3 mm στο μίγμα σύνθεσης είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερη αντοχή στα αντίστοιχα δοκίμια που παρήχθησαν συγκριτικά με την αντοχή αυτών που περιείχαν πλαστικό από ABS-FR40 πολυμερές, με διαστάσεις υλικού 1 x 3 mm. Συγκεκριμένα, το PVC εμφανίζει 24 % μείωση αντοχής και το ABS-FR40 43 % σε σύγκριση με το δείγμα αναφοράς. Λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες των δύο πολυμερών και συγκρίνοντας τα δεδομένα για την θλιπτική αντοχή των πολυμερών (<http://www.matweb.com/reference/compressivestrength.aspx>) εκτιμήθηκε ότι το είδος του πολυμερούς δεν επηρέασε την αντοχή σε θλίψη, και ως εκ τούτου, η κοκκομετρία είναι η παράμετρος που οδήγησε στην απόκλιση των τιμών αντοχής μεταξύ των δύο παρτίδων (PVC και ABS-FR40).

Η μείωση της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας μπορεί να αποδοθεί στις αυξημένες τιμές περιεχόμενου αέρα. Επίσης, συγκρίνοντας τα δύο πολυμερή, το ABS-FR40 απαιτεί περισσότερο νερό από το PVC για να βελτιωθεί η εργασιμότητά του. Αυτό εκτιμήθηκε ότι οφείλεται στην κοκκομετρία, καθώς η μικρότερη κοκκομετρία συνεπάγεται ακολούθως μεγαλύτερη επιφάνεια πλαστικού που θα πρέπει να ομογενοποιηθεί στη τσιμεντόπαστα.

Συγκριτικά με την βιβλιογραφία, η μείωση της θλιπτικής αντοχής σε συνάρτηση με την αύξηση της ποσότητας του πλαστικού στο κονίαμα επιβεβαιώνεται με δοκιμές που αφορούν αντικατάσταση από 5 έως 50 % σε ποικίλες κοκκομετρίες υλικού (0.01-20 mm) (**Ismail and Al-Hashmi, 2008; Saikia and Brito, 2012; Iucolano et al., 2013**). Ακόμη, αναφέρεται ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας δεν είναι τόσο μεγάλη όταν πρόκειται για μικρά ποσοστά αντικατάστασης των αδρανών, ενώ σε περίπτωση που αντικαθίσταται 50% των αδρανών, παρατηρείται έως και 50% μείωση του μέτρου Ελαστικότητας (**Marzouk et al., 2007**).

➤ Αντικατάσταση με πυρηνόξυλο

Πίνακας 10.Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας δοκιμίων με πυρηνόξυλο

Ονομασία		Θλιπτική Αντοχή		Μέτρο Ελαστικότητας	
		10 ημέρες (MPa)	28 ημέρες (MPa)	10 ημέρες (MPa)	28 ημέρες (MPa)
Δείγμα αναφοράς		39.08	42.57	945.09	1255.35
OS<0.25	20OS<0.25 80S _{10days 25 ° c}	0.36		πλαστικό	
	40OS<0.25 60S _{10days 25 ° c}	0.32		πλαστικό	
	70OS<0.25 30S _{10days 25 ° c}	0.29		πλαστικό	
	20OS<0.25 80S _{10days 60 ° c}	0.43		πλαστικό	
	40OS<0.25 60S _{10days 60 ° c}	0.25		πλαστικό	
	70OS<0.25 30S _{10days 60 ° c}	0.30		πλαστικό	
	20OS<0.25 80S _{10days 100 ° c}	0.32		πλαστικό	
	40OS<0.25 60S _{10days 100 ° c}	0.21		πλαστικό	
	70OS<0.25 30S _{10days 100 ° c}	0.20		πλαστικό	
	20OS<0.25 80S _{28days}		0.29		πλαστικό
	40OS<0.25 60S _{28days}		0.23		πλαστικό
	70OS<0.25 30S _{28days}		0.18		πλαστικό
OS>0.25	20OS>0.25 80S _{10days 60 ° c}	2.55		πλαστικό	
	40OS>0.25 60S _{10days 60 ° c}	0.46		πλαστικό	
	70OS>0.25 30S _{10days 60 ° c}	0.15		πλαστικό	
	20OS>0.25 80S _{10days 100 ° c}	0.91		πλαστικό	
	40OS>0.25 60S _{10days 100 ° c}	0.11		πλαστικό	
	70OS>0.25 30S _{10days 100 ° c}	Αστοχία		Αστοχία	
	5OS>0.25 95S _{28days}		30.77		876.99
	20OS>0.25 80S _{28days}		4.93		91.39
	40OS>0.25 60S _{28days}		Αστοχία		Αστοχία
	70OS>0.25 30S _{28days}		Αστοχία		Αστοχία

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, το πυρηνόξυλο καταδείχθηκε ως υλικό που δεν προσδίδει καλές μηχανικές ιδιότητες στο κονίαμα, καθώς παρουσιάζει χαμηλή αντοχή και ανελαστικότητα. Για το λόγο αυτό άλλωστε στις περισσότερες μελέτες αναφέρεται ως υλικό που προσφέρει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, και επομένως, υψηλή θερμομόνωση (Alami, 2010; Barreca and Fichera, 2013; Aouba et al., 2016). Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος ωρίμανσης στο νερό για 28 ημέρες ήταν περισσότερο αποτελεσματική, συγκριτικά με τη μέθοδο ωρίμανσης σε ξηρό περιβάλλον η οποία βασίστηκε στη μελέτη Alami, (2010). Επίσης, είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ξήρανσης, σημειώνεται αρνητική επίδραση στην αντοχή των δοκιμίων. Αναφορικά με την κοκκομετρία του υλικού, για τα

δοκίμια που περιείχαν χονδρόκοκκο υλικό (διάμετρος κόκκων >0.25 μm) σημειώθηκαν υψηλότερες τιμές αντοχής. Τέλος, σχετικά με το ποσοστό αντικατάστασης της άμμου από πυρηνόξυλο, όπως αναμενόταν, η μικρότερη προσθήκη πυρηνόξυλου (5 και 20 % κατά βάρος) είχε ως συνέπεια υψηλότερη αντοχή.

Συνοψίζοντας, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που αφορούν στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι τα επίπεδα αντοχής εξαρτώνται (α) από το απόβλητο που προστίθεται, (β) από το ποσοστό κατά βάρος του αποβλήτου, (γ) από την κοκκομετρία του. Ωστόσο, μεγάλη βαρύτητα πρέπει να δίνεται στα χαρακτηριστικά του νωπού κονιάματος και ιδιαίτερα στο λόγο N/T και τον περιεχόμενο αέρα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι βέλτιστες τιμές θλιπτικής αντοχής που παρουσίασε το κάθε απόβλητο (**Πίνακας 11**).

Πίνακας 11. Βέλτιστες τιμές θλιπτικής αντοχής

Ονομασία		Θλιπτική Αντοχή 28 ημέρες (MPa)
Δείγμα αναφοράς		42.57
Ιπτάμενη Λιγνιτική Τέφρα	10A90S	39.72
	20A80C	34.08
LCD Γυαλί	10G _{<4} 90S	47.54
	10G _{<4} 90C	41.79
	10G _{<0.5} 90S	33.44
	10G _{<0.5} 90C	27.95
Πυρηνόξυλο	50S _{<0.25} 95S	30.77
Πλαστικό	5P _{PVC} 95S	32.45
	5P _{ABS-FR40} 95S	24.11

4.3 Φυσικές ιδιότητες

Αναφορικά με τις φυσικές ιδιότητες που μελετήθηκαν, οι τιμές του πορώδους, της πυκνότητας και της απορρόφησης νερού παρουσιάζονται στον **Πίνακα 12**, που ακολουθεί.

Πίνακας 12. Αποτελέσματα φυσικών ιδιοτήτων

Ονομασία		Πορώδες (%)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Απορρόφηση Νερού (%)
Δείγμα αναφοράς		10.90	2.25	4.83
A	10A90S	13.10	2.06	6.32
	20A80S	24.43	2.18	11.18

	30A70S	22.06	1.83	11.98
	40A60S	26.91	1.67	16.08
	10A90C	13.59	2.28	5.94
	20A80C	14.43	2.33	6.16
	30A70C	15.42	2.12	7.24
	40A60C	18.15	2.04	8.88
	V30A70S	26.52	1.56	16.95
	V40A60S	29.05	1.42	20.37
	V30A70C	22.31	1.91	11.61
	V40A60C	21.74	1.89	11.47
	LEIVA_{et al., 2015}	21.69	1.25	17.33
OS_{<0.25}	20OS_{<0.25} 80S_{10days 25 °C}	32.34	1.56	20.70
	40OS_{<0.25} 60S_{10days 25 °C}	48.80	0.84	57.82
	70OS_{<0.25} 30S_{10days 25 °C}	-	-	-
	20OS_{<0.25} 80S_{10days 60 °C}	16.32	1.69	9.61
	40OS_{<0.25} 60S_{10days 60 °C}	43.95	1.12	39.21
	70OS_{<0.25} 30S_{10days 60 °C}	42.83	0.91	46.62
	20OS_{<0.25} 80S_{10days 100 °C}	30.51	1.61	18.91
	40OS_{<0.25} 60S_{10days 100 °C}	30.62	1.63	19.01
	70OS_{<0.25} 30S_{10days 100 °C}	44.78	0.88	50.79
	20OS_{<0.25} 80S_{28days}	21.98	1.66	13.18
	40OS_{<0.25} 60S_{28days}	23.10	1.35	17.11
	70OS_{<0.25} 30S_{28days}	44.94	0.87	51.24
OS_{>0.25}	20OS_{>0.25} 80S_{10days 60 °C}	38.22	2.30	16.56
	40OS_{>0.25} 60S_{10days 60 °C}	16.71	1.54	10.79
	70OS_{>0.25} 30S_{10days 60 °C}	-	-	-
	20OS_{>0.25} 80S_{10days 100 °C}	13.81	1.84	7.47
	40OS_{>0.25} 60S_{10days 100 °C}	10.19	1.57	6.47
	70OS_{>0.25} 30S_{10days 100 °C}	-	-	-
	20OS_{>0.25} 80S_{28days}	18.13	1.75	10.34
	40OS_{>0.25} 60S_{28days}	13.54	1.57	8.61
	70OS_{>0.25} 30S_{28days}	4.92	1.17	4.21
G_{<4}	10G_{<4} 90S	8.70	2.20	3.94
	20G_{<4} 80S	12.32	2.13	5.76
	10G_{<4} 90C	10.46	2.13	4.90
	20G_{<4} 80C	11.09	2.18	5.06
G_{0.5}	10G_{<0.5} 90S	9.40	2.15	4.36
	20G_{<0.5} 80S	10.55	2.12	4.95
	10G_{<0.5} 90C	12.11	2.11	5.73
	20G_{<0.5} 80C	13.17	2.05	6.41
P_{PVC}	5P_{PVC} 95S	13.71	2.08	6.55
	10P_{PVC} 90S	9.81	2.08	4.69
P_{ABS-FR40}	5P_{ABS-FR40} 95S	13.50	1.94	6.92
	10P_{ABS-FR40} 90S	8.56	1.87	4.43

Αναφορικά με τις φυσικές ιδιότητες που εμφανίζουν τα δοκίμια που περιέχουν τέφρα, διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται η κατά βάρος ποσότητα της τέφρας στο δομικό στοιχείο, η πυκνότητα μειώνεται, το υλικό είναι πιο πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα αυξάνεται. Τέτοιου είδους αποτελέσματα αναφορικά με τις φυσικές ιδιότητες εμφανίζουν και προγενέστερες μελέτες (**Shafigh et al., 2016**) που έχουν αντικείμενο τη χρήση τέφρας σε κονίαμα ή σκυρόδεμα. Πιο συγκεκριμένα, στα δοκίμια που συνιστώνται από 30 και 40 % τέφρα (αντί άμμου), η μικρή πυκνότητα που παρουσιάζουν οφείλεται στα χαρακτηριστικά του νωπού κονιάματος, καθώς για τη σύνθεση του κονιάματος χρειάστηκε μεγάλη ποσότητα νερού για τη σωστή ενυδάτωση της τσιμεντόπαστας και παράλληλα μετρήθηκε υψηλή περιεκτικότητα αέρα. Ως εκ τούτου, διαπιστώνεται ότι το νωπό κονίαμα επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες και κατ' επέκταση τις μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου, αφού όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα του δοκιμίου, τόσο μικρότερη είναι και η αντοχή που παρουσιάζει. Όσον αφορά την σειρά δοκιμών **Leiva et al., 2015**, οι φυσικές ιδιότητες διαφέρουν από τα στοιχεία που παρέχει η βιβλιογραφία, καθώς στην παρούσα εργασία τα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα, μικρότερη απορρόφηση νερού και μικρότερο πορώδες (**Leiva et al., 2015**). Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, το συνδετικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία ήταν το τσιμέντο, ενώ στη συγκρινόμενη μελέτη χρησιμοποιήθηκε γύψος. Επομένως, οι διαφορές, που παρουσιάζονται αναφορικά με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, κρίνονται λογικές. Η προσθήκη βερμικουλίτη και ινών προπυλενίου επιφέρει μείωση της πυκνότητας και αύξηση της υδατοαπορροφητικότητας σε συνάρτηση με την αύξηση του περιεχομένου σε τέφρα, όπως αναφέρουν και οι **Schackow et al. (2014)** σε παρόμοια πειράματα. Η προσθήκη βερμικουλίτη και ινών προπυλενίου επιφέρει επίσης αύξηση του πορώδους. Αυτή η αύξηση οφείλεται στις ιδιότητες του βερμικουλίτη και με βάση πειραματικά αποτελέσματα υπολογίζεται σε 5-15 % για χρόνο ωρίμανσης δοκιμών τις 28 μέρες (**Rashad, 2016**). Επίσης, παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασαν τα δοκίμια των **Palomar and Barluenga, 2017**, στα οποία περιεχόταν βερμικουλίτης και ίνες προπυλενίου.

Αναφορικά με το πλαστικό, διαπιστώνεται μείωση της πυκνότητας των κονιαμάτων αυξάνοντας το ποσοστό (κατά βάρος) του πλαστικού στο μίγμα. Ως εκ τούτου, το πορώδες και η απορροφητικότητα μειώνονται. Αυτό συμβαίνει γιατί το πλαστικό έχει μικρή πυκνότητα, καθώς και μικρό πορώδες και υδατοαπορροφητικότητα συγκριτικά με την

άμμο. Το γεγονός ότι όσο αυξάνεται η προσθήκη πλαστικού, μειώνεται η πυκνότητα του δοκιμίου, έχει παρατηρηθεί και από τους **Ruiz-Herrero et al., (2016)**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ελαφρύτερου κονιάματος, ανθεκτικού στη διείσδυση νερού (**Manjunath Ashwini,2016**). Όσον αφορά το είδος του πολυμερούς, αυτό δε φαίνεται να επηρεάζει καθοριστικά τις φυσικές ιδιότητες.

Τα δοκίμια που περιέχουν LCD γυαλί, όπως ήταν αναμενόμενο παρουσίασαν χαμηλή υδατοαπορροφητικότητα λόγω της παρουσίας του γυαλιού, το οποίο είναι μη διαπερατό, ανεξάρτητα από την μορφή του, σκόνη ή θραύσματα. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να αποδειχθεί ευνοϊκή σε περιπτώσεις φαινομένων χημικής διάβρωσης, εάν το υλικό προορίζεται για χρήση σε εξωτερικούς χώρους. Οι τιμές της πυκνότητας και του πορώδους δεν παρουσίασαν μεγάλη διακύμανση συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές του δείγματος αναφοράς.

Η προσθήκη πυρηνόξυλου στο μίγμα σύνθεσης για τις δύο κοκκομετρίες που μελετήθηκαν, επιφέρει μείωση της πυκνότητας και αύξηση του πορώδους του δομικού στοιχείου, όσο η ποσοστιαία περιεκτικότητα του πυρηνόξυλου αυξάνεται. Όμοια συμπεριφορά αναφέρεται βιβλιογραφικά καθώς σε περιπτώσεις αντικατάστασης της άμμου με ελαφρύτερα αδρανή η τιμή της πυκνότητας ενδέχεται να φτάσει έως 1.5 g/cm^3 . Η μείωση της πυκνότητας και η αύξηση της υδατοαπορροφητικότητας επιβεβαιώνονται και από τα αποτελέσματα των **Aouba et al.(2016)**, αν και τα ποσοστά αντικατάστασης της άμμου με πυρηνόξυλο διέφεραν πολύ από αυτά της παρούσας εργασίας (2, 4, 5, 8 %) με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή μια ασφαλής σύγκριση. Στη συνέχεια, στον **Πίνακα 13** γίνεται σύγκριση της πυκνότητας και της υδατοαπορροφητικότητας του χονδρόκοκκου πυρηνόξυλου με αντίστοιχες βιβλιογραφικές πηγές.

Πίνακας 13. Σύγκριση φυσικών ιδιοτήτων πυρηνόξυλου με βιβλιογραφικές πηγές

Πηγή	Φυσικές Ιδιότητες	Αναλογίες Αντικατάστασης με Πυρηνόξυλο (κοκκομετρία <1000μm)		
		20%	40%	70%
Barreca and Fichera (2013)	Πυκνότητα (g/cm^3)	1.65	1.38	1.15
	Υδατοαπορροφητικότητα (%)	23.69	25.13	31.57
Παρούσα Εργασία	Πυκνότητα (g/cm^3)	1.75	1.57	1.17
	Υδατοαπορροφητικότητα (%)	10.34	13.57	4.21

Μελετώντας τον **Πίνακα 13**, παρατηρείται ότι οι τιμές στην πυκνότητα εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις ενώ στην υδατοαπορροφητικότητα διαφέρουν αρκετά. Η απόκλιση ενδέχεται να οφείλεται στη προσθήκη άσβεστου που χρησιμοποιήθηκε στα συγκεκριμένα πειράματα.

4.4 Δοκιμή ενανθράκωσης

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε περιβάλλον επιταχυνόμενης-τεχνητής γήρανσης στους 20 °C, 65 % σχετική υγρασία και 10 % CO₂, κόπηκαν σε ύψος περίπου 1 cm και έπειτα από 32 ημέρες ψεκάστηκαν με διάλυμα φαινολοφθαλείνης. Παρατηρήθηκε ότι η ποσότητα CO₂ που διείσδυσε στα δοκίμια, δεν ήταν αρκετή ώστε να παρατηρηθεί ενανθράκωση. Εφόσον τα δοκίμια καλύφθηκαν με εποξική ρητίνη, προκειμένου να υπάρχει αξονική διείσδυση του CO₂, η ενανθράκωση θεωρητικά θα έπρεπε να επέλθει από την ακάλυπτη πλευρά, και επομένως να προσδιοριστεί το βάθος της. Ωστόσο, στη μελέτη **Pham, (2013)** το πείραμα έλαβε χώρα σε περιβάλλον με συγκέντρωση 20 % CO₂ και αναφέρεται ότι η εποξική ρητίνη δεν εμπόδισε σημαντικά την εισχώρηση CO₂ με αποτέλεσμα η ενανθράκωση να είναι εμφανής σε όλες τις πλευρές του κονιάματος. Ως εκ τούτου, εκτιμήθηκε ότι το ποσοστό συγκέντρωσης του CO₂ ενδεχομένως να ευθύνεται για το αποτέλεσμα τη δοκιμής. Πάρα ταύτα, οι **Morandeu et al., 2014** εκτιμούν ότι 10 % CO₂ είναι ιδανική συγκέντρωση, ώστε να επιταχυνθεί η ενανθράκωση σε λογικό χρονικό διάστημα χωρίς να οδηγήσει σε αλλαγή της μικροδομής του υλικού που αφορά το πορώδες. Επίσης, οι **Lawrence, (2006)** αναφέρουν ότι μεταξύ των παραγόντων που εμπλέκονται στην ενανθράκωση του κονιάματος είναι ο χρόνος, το πορώδες, το είδος της διάχυσης, το γεωμετρικό σχήμα της επιφάνειας που εκτίθεται στον αέρα και η παρουσία ρωγμών.

Τα ήδη σπασμένα δοκίμια εμφάνισαν διαφορετικά αποτελέσματα, (**Πίνακας 14**) λόγω των ρωγμών που είχαν, επιτρέποντας στο αέριο να διεισδύσει πιο εύκολα στους πόρους του υλικού. Μεγαλύτερη διείσδυση του CO₂ παρατηρείται στα δοκίμια με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα. Μεγαλύτερο βάθος ενανθράκωσης σημειώθηκε στα δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε η άμμος με τέφρα. Αντίθετα, τα δοκίμια με περιεχόμενο LCD γυαλιού σε θραύσματα δεν εμφάνισαν ενανθράκωση. Τα παραπάνω ευρήματα μπορούν να εξηγηθούν ανατρέχοντας στις τιμές του πορώδους, δεδομένου ότι οι συγκεκριμένες αναλογίες αντικατάστασης τέφρας παρουσίασαν αρκετά μεγάλο πορώδες

(18.15% για τα δοκίμια 40A60C και 26.91 % για τα δοκίμια 40A60S), ενώ τα δοκίμια με LCD γυαλί χαρακτηρίζονται από τιμές πορώδους πολύ κοντά σε αυτές του πρότυπου. Ακόμα, ο βαθμός ενανθράκωσης που προσδιορίστηκε στα δοκίμια με τέφρα σχετίζεται με τους αυξημένους λόγους N/T (0.904 για την αναλογία 30A70S και 0.964 για την αναλογία 40A60S), καθώς αυξημένος λόγος N/T συνεπάγεται μεγαλύτερο ποσοστό ενανθράκωσης (Lee et al., 2012).

Πίνακας 14. Τιμές ενανθράκωσης σπασμένων δοκιμίων

Αναλογίες	Βάθος Ενανθράκωσης Σπασμένων Δοκιμίων (mm)			
	Πλευρά S ₁	Πλευρά S ₂	Πλευρά S ₃	Πλευρά S ₄
30A70C	2.17	2.43	0.00	0.00
40A60C	2.18	2.90	0.00	0.00
30A70S	1.30	0.00	0.00	0.00
40A60S	5.40	5.23	4.57	3.00
10G_{<4} 90S	0.00	0.00	0.00	0.00
20G_{<4} 80S	0.00	0.00	0.00	0.00
10G_{<4} 90C	0.00	0.00	0.00	0.00
20G_{<4} 80C	0.00	0.00	0.00	0.00

4.5 Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στη δοκιμή διείσδυσης ιόντων χλωρίου, βυθίστηκαν σε διάλυμα 5 % NaCl σε θερμοκρασία 20 °C, και μετά 91 ημέρες, κόπηκαν σε ύψος περίπου 1 cm και ψεκάστηκαν με διάλυμα AgNO₃ συγκέντρωσης 0.1N. Μελετώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής (**Πίνακας 15**), παρατηρείται ότι τα ιόντα δεν κατάφεραν να διεισδύσουν σε όλες τις πλευρές των δοκιμίων, γεγονός που οφείλεται στην επάλειψή τους με εποξική ρητίνη πριν την βύθιση στο διάλυμα με NaCl, καθώς στόχος της μελέτης ήταν να εξεταστεί η μονοαξονική διείσδυση των χλωριόντων.

Αναφορικά με την προσθήκη λιγνιτικής τέφρας αντικαθιστώντας την άμμο, όσο αυξάνεται η ποσότητά της στα δοκίμια, τόσο αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης. Αντίθετα, στα δοκίμια που έγινε αντικατάσταση τσιμέντου, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ποσότητα της τέφρας, τόσο μειώνεται η διείσδυση των ιόντων. Το αποτέλεσμα αυτό

μπορεί να εξηγηθεί ανατρέχοντας στις τιμές της υδατοαπορροφητικότητας. Οι αναλογίες αντικατάστασης άμμου παρουσίασαν μεγάλη απορρόφηση νερού, περίπου 4 φορές μεγαλύτερη από αυτή του δείγματος αναφοράς, ενώ τα δοκίμια με αντικατάσταση τσιμέντου χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές υδατοαπορροφητικότητας, επιτρέποντας αναλόγως μικρότερη διείσδυση υδατικού διαλύματος NaCl στο εσωτερικό του.

Όσον αφορά τα δοκίμια στα οποία έγινε προσθήκη γυαλιού LCD, το βάθος της διείσδυσης μειώνεται, όσο αυξάνεται η κατά βάρος ποσότητα του γυαλιού (**Wang, 2009**). Η αντίσταση που προσδίδει το γυαλί στα δοκίμια στη διείσδυση των χλωριόντων σχετίζεται άμεσα με τις χαμηλές τιμές απορρόφησης νερού και πορώδους. Καθώς ο αριθμός των διαθέσιμων πόρων μειώνεται, μειώνεται και η διείσδυση νερού ή υδατικών διαλυμάτων που μπορεί να περιέχουν διαβρωτικές ή χημικές ουσίες. Σύμφωνα με την μελέτη των **Zuo et al., 2017**, συγκρίνοντας την επίδραση του διαλύματος 5 % NaCl σε δοκίμια με ποσοστό γυαλιού 5, 10, 15 και 20 % με ποικίλες κοκκομετρίες (0.250-0.038 mm), τα δοκίμια παρουσίασαν την υψηλότερη αντίσταση στη διείσδυση ιόντων χλωρίου ήταν αυτή με 10 % γυαλί με διάμετρο σωματιδίων ίση με 0.125 mm. Όπως επισημαίνουν στην παραπάνω μελέτη, η κοκκομετρία του υλικού είναι σημαντική παράμετρος και επηρεάζει τη διείσδυση ιόντων χλωρίου (**Zuo et al., 2017**).

Πίνακας 15. Βάθος διείσδυσης ιόντων χλωρίου

Αναλογίες	Βάθος Διείσδυσης Ιόντων Χλωρίου (mm)			
	Πλευρά S ₁	Πλευρά S ₂	Πλευρά S ₃	Πλευρά S ₄
30A70C	4.61	2.72	0.00	1.56
40A60C	0.00	0.00	0.00	0.00
30A70S	0.00	0.00	4.42	1.75
40A60S	2.22	0.00	4.33	1.48
10G_{<4} 90S	1.44	0.00	0.00	1.11
20G_{<4} 80S	0.00	0.00	0.00	3.29
10G_{<4} 90C	2.70	0.00	0.00	1.12
20G_{<4} 80C	00.00	0.00	0.00	0.00

4.6 Δοκιμή σε περιβάλλον θεικών ιόντων

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στη δοκιμή sulfate attack, βυθίστηκαν σε διάλυμα 5% Na_2SO_4 σε θερμοκρασία 20 °C, και μετά από 91 ημέρες, κόπηκαν σε ύψος περίπου 1 cm και μετρήθηκαν ξανά οι διαστάσεις τους και η αντοχή τους σε θλίψη. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής παρουσιάζονται στον **Πίνακα 16**. Η επαφή του κονιάματος με τα ιόντα θείου έχει ως αποτέλεσμα μείωση της θλιπτικής αντοχής και διαστολή στις διαστάσεις του. Τέτοια φαινόμενα λαμβάνουν χώρα λόγω των προϊόντων που σχηματίζονται από την αντίδραση των θεικών ιόντων και του ένυδρου αργιλικού ασβεστίου και του υδροξειδίου του ασβεστίου που υπάρχει στο τσιμέντο. Τα προϊόντα αυτά είναι εττριγκίτης και γύψος, και προκαλούν επιμήκυνση-διαστολή και ρωγμές στο σκυρόδεμα ή κονίαμα, που στη συνέχεια προκαλεί την αδυναμία της επιφάνειας, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την προστασία του σκυροδέματος ή του κονιάματος από τις επιζήμιες επιδράσεις των θεικών επιθέσεων είναι η μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος ή του κονιάματος ή η χρήση διαφόρων προσθέτων ορυκτών για τη μείωση της ποσότητας υδροξειδίου του ασβεστίου, που σχηματίζεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου (**Arel and Thomas, 2017**). Σύμφωνα με τους **Ataham and Arslan, (2016)**, η απώλεια αντοχής παρατηρείται αφού το δοκίμιο έχει ήδη διασταλεί κατά 0.1 %.

Με βάση τα δεδομένα του **πίνακα 16**, διαστολή των δοκιμών παρατηρήθηκε μόνο στο ύψος τους και όχι στις άλλες τους διαστάσεις, γεγονός που αποδεικνύει ότι η εποξική ρητίνη προστάτεψε αποτελεσματικά τα δοκίμια από το θείο ώστε να είναι εφικτή η μονοαξονική εισροή θεικών και να εξαχθούν ορθά συμπεράσματα. Αναφορικά με τα δοκίμια που περιέχουν λιγνιτική τέφρα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ποσότητα του αποβλήτου, τόσο εμποδίζεται η διάβρωση από το θείο. Η αντικατάσταση της άμμου καθίσταται πιο αποτελεσματική στη διάβρωση του θείου συγκριτικά με την αντικατάσταση του τσιμέντου. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση αντικατάστασης άμμου σε ποσοστό 40 %, το δοκίμιο δεν επιμηκύνθηκε καθόλου και η θλιπτική του αντοχή αυξήθηκε σε συμφωνία με τους **Torii et al., (2015)**. Στη μελέτη των **Torii et al., 1995**, δοκίμια με προσθήκη τέφρας για 50 % αντικατάσταση τσιμέντου, μετά την παραμονή του σε διάλυμα 10 % Na_2SO_4 για 2 χρόνια, παρουσίασαν βελτίωση της αντοχής σε θλίψη και μάλιστα δεν ανιχνεύτηκε καμία αλλοίωση που θα μπορούσε να αποδοθεί στην επίδραση του θεικού άλατος. Η επιφάνειά τους ήταν σε εξαιρετική κατάσταση σε σύγκριση με αυτή των

δοκιμίων χωρίς τέφρα, τα οποία είχαν υποστεί εκτεταμένη διαστολή και διάβρωση. Η ικανότητα της τέφρας να προστατεύει το κονίαμα από το θείο σχετίζεται με τις ποζολανικές ιδιότητες του υλικού που μειώνουν την παραγωγή του υδροξειδίου του ασβεστίου και αυξάνουν την παραγωγή του ένυδρου πυριτικού ασβεστίου **(Merida and Kharchi, 2015)**. Στη βιβλιογραφία έχει επίσης αναφερθεί, σε αντίθεση με τα παραπάνω, ότι η εμφάνιση των δειγμάτων σε θειικό διάλυμα αρχικά προκαλεί μικρή αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος ή του κονιάματος, παρόλο που η διαστολή στα δείγματα αυξάνεται συνεχώς. Πρόκειται για “παραπλανητική” αύξηση αντοχής η οποία αποδίδεται στη διαδικασία ενυδάτωσης και την καθίζηση του θειικού άλατος, ωστόσο τα δείγματα στη συνέχεια χάνουν την αντοχή σε σύντομο χρονικό διάστημα **(Ataham and Arslan, 2016)**.

Στα δοκίμια που προστέθηκε το LCD γυαλί για να αντικαταστήσει τα αδρανή ή το συνδετικό υλικό, παρατηρήθηκε η μείωση της θλιπτικής αντοχής, καθώς και διαστολή των δοκιμίων λόγω της επαφής τους με το θείο. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η ποσότητα του γυαλιού, τόσο αυξάνεται και η αντίσταση του δοκιμίου στο θείο λόγω της ιδιότητας του γυαλιού να αντιστέκεται σε όξινο και αλκαλικό περιβάλλον **(Wang and Huang, 2010)**.

Πίνακας 16. Αποτελέσματα της δοκιμής σε περιβάλλον θεικών ιόντων

Ονομασία	Θλιπτική Αντοχή		Διαστολή (%)
	Sulfate attack	Φυσική Γήρανση	
30A70C	29.77	37.96	1.20
40A60C	30.69	31.85	0.34
30A70S	39.85	41.40	0.50
40A60S	39.17	31.93	-
10G _{<4} 90S	41.43	47.66	0.55
20G _{<4} 80S	39.63	44.37	0.49
10G _{<4} 90C	50.28	56.22	1.00
20G _{<4} 80C	35.16	39.38	0.49

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η δυνατότητα χρήσης στερεών αποβλήτων (ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα, γυαλί LCD, πλαστικό, πυρηνόξυλο) ως αδρανή ή ως συνδετικά υλικά στην παραγωγή τσιμεντοκονιάματος. Η εξέταση της δυνατότητας αξιοποίησης πραγματοποιήθηκε μελετώντας:

- (α) διαφορετικές περιεκτικότητες του αποβλήτου στο μίγμα σύνθεσης,
- (β) την επίδραση της αντικατάστασης είτε των αδρανών είτε του συνδετικού υλικού με το υπό εξέταση απόβλητο,
- (γ) την επίδραση της κοκκομετρίας του αποβλήτου.

Επίσης, έμφαση δίνεται στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, καθώς και στη συμπεριφορά των δομικών στοιχείων σε συνήθη περιβάλλοντα διάβρωσης, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση της προσθήκης στερεών αποβλήτων στην ποιότητα του τσιμεντοκονιάματος. Βάσει των αποτελεσμάτων της εργασίας είναι δυνατό να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ✓ Η προτεινόμενη μέθοδος δύναται να συμβάλλει στην ορθότερη διαχείριση και αξιοποίηση βιομηχανικών, ηλεκτρονικών και γεωργικών αποβλήτων, καθώς και στην δημιουργία δομικών υλικών φιλικότερων προς το περιβάλλον. Η αξιοποίηση στερεών αποβλήτων μπορεί να επιλύσει περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται από τη συσσώρευσή τους, καθώς επίσης να επιφέρει οικονομικά οφέλη.
- ✓ Αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες διαπιστώθηκε ότι τόσο το γυαλί, όσο και η λιγνιτική τέφρα εμφανίζουν υψηλά επίπεδα αντοχής σε θλίψη ιδίως όταν η περιεκτικότητά τους κατά βάρος είναι 10 και 20 % αντίστοιχα. Για το πυρηνόξυλο και το πλαστικό, η υψηλότερη απόδοση μηχανικής αντοχής σημειώθηκε στα δοκίμια με 5 % περιεχόμενο αποβλήτου.

Το είδος του φυσικού υλικού που αντικαθίσταται επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του δομικού στοιχείου. Στις περιπτώσεις που αντικαταστάθηκε το συνδετικό υλικό, τσιμέντο, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μείωση της αντοχής σε θλίψη. Αυτό οφείλεται στην κρίσιμη παρουσία του τσιμέντου στο μίγμα σύνθεσης

προκειμένου να συνδεθεί ικανοποιητικά η τσιμεντόπαστα με τα αδρανή και το απόβλητο και να είναι εργάσιμο το μίγμα. Αντίθετα, η αντικατάσταση των αδρανών, επιτρέπει την αξιοποίηση μεγαλύτερης ποσότητας αποβλήτου λόγω της τυπικής περιεκτικότητας των αδρανών στο μίγμα (τσιμέντο: αδρανή=1:2.75), και περιορισμένη μείωση της αντοχής σε θλίψη.

Παρατηρήθηκε επίσης μεγάλη διασπορά του μέτρου ελαστικότητας και αυτό οφείλεται στην ανομοιογένεια και ανισοτροπία δομικών στοιχείων, όπως το κονίαμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μείωση του μέτρου ελαστικότητας ήταν αποτέλεσμα είτε αύξησης του συνδετικού υλικού, είτε μείωσης των αδρανών των οποίων η ακαμψία είναι κρίσιμη για τη μηχανική συμπεριφορά του κονιάματος (Bilir et al., 2015).

- ✓ Οι φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων επηρεάστηκαν από το είδος του αποβλήτου που χρησιμοποιήθηκε. Η παρουσία λιγνιτικής τέφρας ή γυαλιού έχει ως αποτέλεσμα υψηλής πυκνότητας κονίαμα σε αντίθεση με το πυρηνόξυλο και το πλαστικό. Το πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα επηρεάστηκαν από το είδος, την κοκκομετρία και το κατά βάρος ποσοστό του αποβλήτου στο δομικό στοιχείο. Αξίζει να σημειωθεί, μεταξύ άλλων (ηλικία ωρίμανσης, κα.), ότι τα χαρακτηριστικά του νωπού κονιάματος είναι πολύ σημαντικά και καθοριστικά για τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος.
- ✓ Οι φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά που επέδειξαν στις δοκιμές ανθεκτικότητας.
- ✓ Από τα ευρήματα της εργασίας μπορεί να διαπιστωθεί ότι η χρήση θραυσμάτων γυαλιού LCD ως αδρανή σε κονίαμα κρίνεται πολλά υποσχόμενη, καθώς συμβάλει στην παραγωγή ενός χημικά σταθερού, πυκνού και σκληρού υλικού το οποίο είναι σε θέση να εμποδίσει την εισροή ιόντων χλωριδίου, παρεμποδίζοντας και προσθέτοντας θωράκιση στο δομικό στοιχείο. Επίσης, το LCD γυαλί είναι το μοναδικό απόβλητο που εμφάνισε μηχανικές και φυσικές ιδιότητες καλύτερες από το δείγμα αναφοράς, καθώς διαπιστώθηκε ότι προσδίδει στο κονίαμα αυξημένη θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας. Ακόμα εκτιμάται ότι λόγω της χαμηλής του υδατοαπορροφητικότητας, αλλά και της αντίστασης στη διείσδυση CO₂ και ιόντων χλωρίου, το υλικό θα μπορούσε να καταστεί κατάλληλο για εφαρμογές σε εξωτερικούς χώρους, όπου παρατηρούνται φαινόμενα χημικής διάβρωσης.

Ωστόσο, τέτοιου είδους συμπεράσματα χρήζουν περαιτέρω μελέτης. Τέλος, η έκθεση των δοκιμών που περιέχουν γυαλί σε περιβάλλον θεικών ευνοείται εξίσου χάρη στα χαρακτηριστικά του γυαλιού. Λόγω των ιδιοτήτων όξινης και αλκαλικής αντοχής του γυαλιού, η αντίσταση στη θεική διάβρωση του σκυροδέματος ή του κονιάματος μπορεί να βελτιωθεί όταν προστίθεται απόβλητο LCD γυαλί (**Wang and Huang, 2010; Wang, 2009**), καθώς είναι σε θέση να περιορίσει τη διάβρωση από εισροή θεικών και να ενισχύσει την ανθεκτικότητα του κονιάματος.

- ✓ Το πυρηνόξυλο κρίνεται κατάλληλο για δομική χρήση σε ποσοστό 5% ως υποκατάστατο των αδρανών, με κοκκομετρία σωματιδίων μεγαλύτερη από 0.25 mm. Διαφορετικά, ως υλικό υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες στο κονίαμα παρουσιάζοντας χαμηλή αντοχή και ανελαστικότητα. Για το λόγο αυτό, με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, προτείνεται η εφαρμογή του ως μονωτικό υλικό που προσφέρει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, και επομένως, υψηλή θερμομόνωση (**Alami, 2010; Barreca and Fichera, 2013; Aouba et al., 2016**).
- ✓ Το πλαστικό, χάρη στη χαμηλή του πυκνότητα και τη μειωμένη υδατοαπορροφητικότητα, κρίνεται ιδανικό για τη δημιουργία ελαφρύτερου κονιάματος, ανθεκτικού στη διείσδυση νερού.
- ✓ Η τέφρα είναι το υλικό που παρουσιάζει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες μετά το γυαλί, καθώς τα δύο αυτά απόβλητα εμφανίζουν παρόμοια μηχανική συμπεριφορά. Με την προσθήκη της τέφρας στο τσιμεντοκονίαμα μπορεί να επιτευχθεί μερική ακινητοποίηση των τοξικών στοιχείων που περιέχει, με αποτέλεσμα απελευθέρωση μικρότερων συγκεντρώσεων στο περιβάλλον σε περίπτωση εναπόθεσής τους σε χώρο υγειονομικής ταφής. Επίσης, στα δοκίμια που περιέχουν λιγνιτική τέφρα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ποσότητα του αποβλήτου, εμποδίζεται η διάβρωση από το θείο. Ως εκ τούτου, τα δοκίμια δεν παρουσιάζουν επιμήκυνση, ρωγμές ή αλλοίωση, ενώ αντιθέτως η θλιπτική αντοχή αυξάνεται.

6.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σε πειραματικό επίπεδο:

- ❖ Προτείνεται η χρήση και η μελέτη άλλων προσθετικών υλικών, όπως απόβλητο γυαλί από φωτοβολταϊκά πάνελ, καθώς τα αποτελέσματα που βρέθηκαν στην παρούσα μελέτη για την αξιοποίηση LCD γυαλιού σε κονίαμα κρίθηκαν ενθαρρυντικά. Εκτιμάται ότι η φύση και τα χαρακτηριστικά του γυαλιού από φωτοβολταϊκά πάνελ θα ευνοήσουν τα χαρακτηριστικά του κονιάματος.
- ❖ Λόγω των μη αποδοτικών μηχανικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων με πυρηνόξυλο, προτείνεται μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων, προκειμένου να ελεγχθεί αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μονωτικό υλικό λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που προσφέρει, όπως τεκμηριώνεται από την αντίστοιχη βιβλιογραφία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Adamidou K., Georgakopoulou A., Amanatidou E., Tsikritzis L., 2005. Mineral and morphological study of fly ash samples from the power stations of the western macedonian lignite center - CONFERENCE OF THE COMMITTEE OF ECONOMIC GEOLOGY, MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY, 1-8.
- Akyildiz A., Kose T.E., Yildiz A., 2017. Compressive strength and heavy metal leaching of concrete containing medical waste incineration ash – Construction and Building Materials. 138, 326-332.
- Alami, A. H. 2010. Experiments on olive husk-addition to masonry clay bricks on their mechanical properties, and their application and manufacturability as an insulating material. In Advanced Materials Research (Vol. 83, pp. 874-880). Trans Tech Publications.
- Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. E. M. A., Aboshama, A. Y. 2016. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. Construction and Building Materials. 124, 866-877.
- Aouba L., Bories C., Coutand M., Perrin B., Lemerrier H., 2016. Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stine Flour and Wheat Straw residues – Construction and Building Materials, 7-13.
- Arel, H. Ş., Thomas, B. S. (2017). The effects of nano-and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks. Results in Physics, 7, 843-851.
- Arezoumandi M., Volz J.S., 2013. Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high-volume fly ash concrete beams – Journal of Cleaner Production. 59, 120-130.
- Atahan H.N., Arslan K.M., 2016. Improved durability of cement mortar exposed to external sulfate attack: The role of nano & micro additives – Sustainable Cities and Society. 22, 40-48.
- Awal A.S.M., Mohammadhosseini H., 2016. Green concrete production incorporating waste carpet fiber and palm oil fuel ash – Journal of Cleaner Production. 137, 157-166.

- Barbieri L., Lancellotti I., Manfredini T., Queralto I., Rincon J., Romero M., 1999. Design, obtaining and properties of glass and glass-ceramics from coal fly ash – Fuel. 78, 271-276.
- Barreca F., Fichera C.R., 2013. Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation – Energy and Buildings. 65, 507-513.
- Bartocci P., D'Amico M., Moriconi N., Bidini G., Fantozzi F., 2015. Pyrolysis of olive stone for energy purposes – Energy Procedia. 82, 374-380.
- Bilir T., Gencel O., Topcu I.B., 2015. Properties of mortar with fly ash as fine aggregate – Construction and Building Materials. 93, 782-789.
- Bio A.L., Xanthos M., 1995. How to manage plastic wastes: Technology and market opportunities. Hanser. New York.
- Cao Q., Cheng Y., Cao M., Gao Q., 2017. Workability, Strength and shrinkage of fiber reinforced expansive self-consolidation concrete - Construction and Building Materials. 131, 178-185.
- Chancellor P., Rotter S., 2009. Recycling-oriented characterization of small waste electric and electronic equipment – Waste Management. 29, 2336-2352.
- Chousidis N., Rakanta E., Ioannou I., Batis G., 2015. Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash – Construction and Building Material. 101, 810-817.
- Chul -Tae Lee, 2015. Preparation of spherical foamed body with function of media for waste water treatment by using LCD glass – Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 20, 3089-3095.
- Coor M., Pheeraphan T., 2016. Effect of sand, fly ash and limestone powder on preplaced aggregate concrete mechanical properties and reinforced beam shear capacity – Construction and Building Materials. 120, 581-592.
- Crow M., Elser A., Gopfert B., Mertins L., Meyer T., Schmid J., Spillner A., Strobel R., 2003. Waste from electrical and electronic equipment (WEEE)-quantities, dangerous substances and treatment methods. European Environmental Agency.
- Damiola O.M., 2013. Syntheses, characterization and binding strength of geopolymers: a review -International Journal Mater Science Applied. 2 (6), 185-195.

- Diamond S.,” Aspects of concrete porosity revisited “, Purdue University, School of Civil Engineering, 1999.
- Dimitrakakis E., Janz A., Bilitewski B., Gidarakos E., 2009. Determination of heavy metals and halogens in plastic from electric and electronic waste – Waste Management.29, 2700-2706.
- Dimitrakakis E., Janz A., Bilitewski B., Gidarakos E., 2009. Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics – Journal of Hazardous Materials. 161, 913-919.
- Dinakar P., Reddy M.K, Sharma M., 2013. Behavior of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of coal fly ash – Materials and Design. 46.606-619.
- Dong Y., Feng Xyuong., Feng Xuefei., Ding Y., Liu X., Meng G., 2008. Preparation of low –cost mullite ceramics from natural bauxite and industrial waste fly ash – Journal of Alloys and Compounds. 460,599-606.
- Gingos G.S., Sutan Mohamed N., 2011. Effect of PFA on Strength and Water Absorption of Mortar – UNIMAS e-Journal of Civil Engineering. Vol 2 (1).
- Higashiyama H., Sappakittipankorn M., Sano M., Yagishita F., 2012. Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate – Construction and Building Materials. 33,48-54.
- Hodaifa G., Driss Alami S.B., Ochando-Pulido J.M., Victor-Ortega M.D., 2014. Iron removal from liquid effluents by olive stone on adsorption column: breakthrough curves – Ecological Engineering. 73, 270-275.
- Hoyle W., Kasra D.R., 1997, Chemical Aspects of Plastics Recycling. Amer Chemical Society.
- Hui K., Chao C., 2006. Pure, single phase, high crystalline, chamfered-edge zeolite 4A synthesized from coal fly ash for use as a builder in detergents – Journal of Hazardous Material. 137,401-409.
- Huisman J, Magalini F., Kuehr R., Maurer C., Oqilvie S., Poll J. et al., 2008. Review of Directive 2002/96 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Final report. Bonn, Germany: United Nations University.

- Ismail Z.Z., Al-Hashmi E.A. 2008. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement - *Waste Manage.* 28, 2041-2047.
- Iucolano F., Liguori B., Caputo D., Cioffi R., 2013. Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties – *Materials & Design.* 52, 916-922.
- Jamraloedluk J., Lertsatitthanakorn C., 2014. Characterization and Utilization of Char Derived from Fast Pyrolysis of Plastic Wastes – *Procedia Engineering.* 69,1437-1442.
- Jiang C., Huang Q., Gu Xi, Zhang W., 2017. Experimental investigation on carbonation in fatigue-damaged concrete – *Cement and Concrete Research.* 99, 38-52.
- Karakas C., Ozcimen D., Inan B., 2017. Potential use of olive stone biochar as a hydroponic growing medium - *Journal of Analytic and Applied Pyrolysis.* 125, 17-23.
- Karamberi A., Moutsatsou A., 2006. Vitrification of lignite fly ash and metal slags for the production of glass and glass ceramics- *China Particuology.* 5, 250-253.
- Kidong K., Kicheol K., Jonghee H., 2016. Characterisation of ceramic tiles containing LCD waste glass – *Ceramics International.* 42, 7626-7631.
- Kwan W.H., Ramli M., Kam K.J., Sulieman M.Z., 2012. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties - *Construction and Building Materials.* 26(1).565-573.
- Lawrence, R. 2006. A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars (Doctoral dissertation, University of Bath).
- Lee, H. J., Kim, D. G., Lee, J. H., Cho, M. S. 2012. A study for carbonation degree on Concrete using a phenolphthalein indicator and fourier-transform infrared spectroscopy. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 34(62), 184-190.
- Leiva, C., Arenas, C., Vilches, L. F., Alonso-Fariñas, B., Rodriguez-Galán, M. 2015. Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties. *Waste Management*, 46, 298-303.
- Leiva, C., Vilches, L. F., Vale, J., & Fernández-Pereira, C. (2009). Fire resistance of biomass ash panels used for internal partitions in buildings. *Fire safety Journal*, 44(4), 622-628.

- Manjunath Ashwini B.T., 2016. Partial replacement of E-plastic Waste as Coarse-aggregate in Concrete – *Procedia Environmental Science*. 35, 731-739.
- Marie I., Quiasrawi H., 2012. Closed -looped recycling of recycled concrete aggregates. Original Research Article. *Journal of. Cleaner. Production*. 37,243-248.
- Marzouk O.Y., Dheilly R.M., Queneudec M., 2007. Valorization of post-consumer plastic waste in cementations concrete composites - *Waste Manage*. 27, 310-318.
- Menad N., Kanari N., Menard Y., Villeneuve J., 2016. Process simulator and environmental assessment of the innovative WEEE treatment process – *International Journal of Mineral Procesing*. 148, 92-99.
- Merida A., Kharchi F., 2015. Pozzolanic concrete durability on sulphate attack – *Procedia Engineering*. 114, 832-837.
- Meyer C., 2009. The greening of the concrete industry- *Cement and Concrete Composites*. 31 (8), 601-605.
- Morandea A., Thiery M, Dangla P., 2014. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties – *Cement and Concrete Research*. 56,153-170.
- Morf L.S., Tremp J., Gloor R., Schuppisser F., Stengele M., Taverna R., 2007. Metals, non-metals and PCB in electric and electronic waste- actual levels in Switzerland – *Waste Management*. 27, 1306-1316.
- Namias J., 2013. The future of electronic wastes recycling in the United States; Obstacles and Domestic Solutions, Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University.
- Nnorom I.C., Osibanjo O., 2009. Toxicity characterization of waste mobile phone plastics – *Journal of Hazardous Materials*. 161, 183-188.
- Palomar I., Barluenga G., 2017. Assessment of lime-cement mortar microstructure and properties by P-and –S ultrasonic waves – *Construction and Building Materials*. 139,334-341.
- Panda A.K., Singh R.K., Mishra D.K.,2010.Thermolysis of waste plastic to liquid fuel A suitable method foe plastic waste management and manufacture of value added products-a world prospective – *Renewable Sustainable Energy Reviews*. 14,233-248.

- Pham, S. T. 2013. Modifications on Microporosity and Physical Properties of Cement Mortar Caused by Carbonation: Comparison of Experimental Methods. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Prusty J.K., Patro S.K., Basarkar S.S., 2016. Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment –A review – *International Journal of Sustainable Built Environment*. 5, 312-333.
- Ram L.C., Masto R.E., 2014. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments – *Earth-Science Reviews*. 128,52-74.
- Ram L.C., Srivastava N.K., Sangeet K.J., Sinha A.K., Masto R.E., Selvi V.A.,2007. Management of lignite fly ash for improving soil fertility and crop productivity – *Environmental Management*. 40, 438-452.
- Rashad A.M., 2016.Vermiculite as a construction material-A short guide for Civil Engineer – *Construction and Building Materials*. 126, 53-62.
- Rodriguez F., Pimenetl F., Oliveira M., 2014. Olive by-product: Challenge application in cosmetic industry - *INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS*, 116-124.
- Ruiz-Herrero, J. L., Nieto, D. V., López-Gil, A., Arranz, A., Fernández, A., Lorenzana, A., & Rodríguez-Pérez, M. Á. 2016. Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Construction and Building Materials*. 104, 298-310.
- Saikia N., J. de Brito.2012. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review – *Construction and Building Materials*. 34, 385-401.
- Savvilotidou V., Hahladakis J., Gidarakos E., 2014. Determination of toxic metals in discarded Liquid Crystal Displays (LCDs) - *Resources, Conservation and Recycling*. 92, 108-115.
- Savvilotidou V., Hahladakis J., Gidarakos E., 2015. Leaching capacity of metals-metalloids and recovery of valuable materials from waste LCDs – *Waste Management*. 45, 314-324.
- Schackow A., Effting C., Folgueras M. V., Güths S., G. Mendes A.G.,2014. Mechanical and Thermal Properties of lightweight concrete with vermiculite and EPSs using air-entraining agent - *Construction and Building Materials*. 57, 190-197.

- Schluep M., Hagelucken C., et al., 2009. Market potential of innovative e-waste recycling technologies in developing countries. In: Proceeding in R'09 world congress.
- Shafigh P., Nomeli M.A., Alengaram U.J., Mahmud H.B., Jumaat M.Z., 2016. Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash – Journal of Cleaner Production. 135, 148-157.
- Sommerville R., Blissett R., Rowson N., Blackburn S., 2013. Producing a synthetic zeolite from improved fly ash residue – International Journal of Mineral Processing. 124, 20-25.
- Sua-iam G., Makul N., 2014. Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk in self-consolidating concrete – Journal of Cleaner Production. 78, 184-194.
- Tian B., Cohen M., 2000. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? – Cement and Concrete Research. 30, 117-123.
- Torii K., Taniguchi K., Kawamura M., 1995. Sulfate resistance of high fly ash content concrete – Cement and Concrete Research. 25, 759-768.
- Tsimas S., Moutsatsou-Tsima A., 2005. High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives – Cement & Concrete Composites. 27, 231-237.
- Ventola G., Vendrell M., Giraldez P., Merino L., 2011. Traditional organic additives improve lime mortar for restoration and building natural stone fabrics - Construction and Building Materials. 25, 3313-3318.
- Wallah S.E., Hardjito D., 2015. Assessing the shrinkage and creep of alkali-activated concrete binder – Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, 265-290.
- Wang, H. Y. 2009. A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete. Waste Management. 29(1), 335-341.
- Wang, H. Y., Huang W.L., 2010. Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass – Construction and Building Materials. 24, 1008-1013.
- Yang J., Retegan T., Ekberg C., 2013. Indium recovery from discarded LCD panel glass by solvent- Hydrometallurgy. 137, 68-77.

- Zuo J., Li H., Dong B., Luo C., Chen D.,2017.Mechanical properties and resistance to chloride ion permeability of epoxy emulsion cement mortar reinforced by glass flake - Construction and Building Materials. 155,137-144.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Διεύθυνση Περιβάλλοντος & Χωρικού Σχεδιασμού Περιφέρεια Ιονίων Νήσων,2013. Διαχείριση υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείων.
- Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος, 2000.
- Θεοφυλάκτου Κ., «Σύνθεση, χαρακτηρισμός και φωτοκαταλυτική δράση νανοσύνθετων ιπτάμενης τέφρας- TiO_2 », Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας,2015.
- Σαββιλωτίδου, «Εκτίμηση εκπλυσιμότητας και ανάκτησης μετάλλων και πολύτιμων υλικών από απόβλητες οθόνες LCD», Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2014.
- Σαββιλωτίδου, «Ποσοτική εκτίμηση τοξικών μετάλλων και επικινδύνων ουσιών σε οθόνες LCD-TFT απόβλητου ηλεκτρονικού εξοπλισμού», Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2013.
- Σισιάκης, «Αξιοποίηση οργανικών και ανόργανων αποβλήτων και παραπροϊόντων, πυρηνόξυλο και ιπτάμενη λιγνιτική τέφρα, ως προσροφητές για την αποκατάσταση πετρελαιοκηλίδας», Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2016.
- Σπηλιώτης , «Κονιάματα» Παραδόσεις Μαθήματος, ΤΕΙ Θεσσαλίας.

Διαδίκτυο

- “ Evaluating Fly Ash for Mortar” ,University of Kentucky, Center for Applied Energy Research, 1995-2017,
<http://www.caer.uky.edu/kyasheducation/testing-mortar.shtml>
- “ARGOENERGY” , argoenergy.gr, 2005, <https://www.agroenergy.gr>

- “Compressive Strength Testing of Plastics”,
<http://www.matweb.com/reference/compressivestrength.aspx>
- «Επίδραση των βαρέων μετάλλων και τοξικών στοιχείων Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cu και Hg απαντώνται στην ιπτάμενη τέφρα των λιγνιτικών των Α.ΗΣ. Αγίου Δημητρίου στα καλλιεργούμενα εδάφη της περιοχής». Τύπου, 1999,
<http://artemis.library.tuc.gr/DT2008-0190/DT2008-0190.pdf>
- EHSO, 2016, The EPA :Toxicity Characteristic Leaching of Procedure and Characteristic Waste, <http://www.ehso.com/cssepa/TCLP.htm>
- European Environmental Agency, <https://www.eea.europa.eu/publications/92-826-5409-5/page036new.html>
- Mikolajczak C., Availability of Indium and Gallium, September 2009,
http://www.commodityintelligence.co.uk/images/2010/jan/11%20jan/availability_o_f_indium_and_galliumwhite_papermikolajczak_sept09.pdf
- Stanish K.D., Hooton R.D., Thomas M.D.A., “Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review “, Department of Civil Engineering University of Toronto,
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/chlconcrete.pdf>
- The Concrete Countertop Institute, <http://www.concretecountertopinstitute.com/the-importance-of-watercement-ratio>
- Sulfate attack in concrete and mortar,2015,
<https://www.masterbuilder.co.in/sulphate-attack-in-concrete-mortar>
- Βασίλειος Δ.,2009. «Αξιοποίηση του Ελαιοπυρηνόξυλου για την παραγωγή βιοκαύσιμου με την διαδικασία της βιοχημικής μετατροπής». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, <http://www.chemeng.ntua.gr/courses/bpy/files/dimos.pdf>
- Γκόκα Β., «Εργαστηριακές Δοκιμές Καταλληλότητας Γεωυλικών για τη Χρήση τους σαν Αδρανή - Διερεύνηση Μαγνητικών Πετρωμάτων Β», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, 2013,
http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/7848/3/Nimertis_Gkoka%28geo%29.pdf

- Δουρουντάκης Ι, «Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Μονάδας Θερμικής Επεξεργασίας Βιομάζας», 2012,
<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/hle/2012/Dourountakisloannis/attached-document-1374480794-707576-4911/Dourountakisloannis2012.pdf>
- Πυρηνόξυλο, Στροφύλας Αριστείδης Μηχανολόγος-Ηλεκτρολόγος, 02/03/2016,
<https://sites.google.com/site/pyrhnoxylo/>
- Στεφανάκος Ι.Π., Τσικνάκου Π.Ι., «Τεχνικές οικονομικές και περιβαλλοντικές εμπειρίες και συμπεράσματα, από τη χρήση επεξεργασμένης ιπτάμενης λιγνιτικής τέφρας για την κατασκευή του φράγματος Πλατανόβρυσης στον ποταμό Νέστο», Πρώτο Πανελλήνιο Συνέδριο για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στην Δόμηση, 24-26 Νοεμβρίου 2005,
http://www.evipar.org/innet/files/1oEVIPAR_full_text_43_Stefanakos.pdf
- Στιβανάκης, 2003, Έρευνα και ανάπτυξη νέων δοκιμών υλικών από στερεά παραπροϊόντα λιγνιτικής καύσης ενεργειακού κέντρου Μεγαλόπολης, 03/03/2016,
<http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/289/1/48.pdf>