



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ
«ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΤΗ ΔΟΜΗΣΗ»

7 – 8 Οκτωβρίου 2019

Κέντρο Διάδοσης Ερευνητικών Αποτελεσμάτων
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Περιεχόμενα

Η συμβολή των βιομηχανικών παραπροϊόντων στην αιεφόρο ανάπτυξη. Το παράδειγμα στον χώρο τσιμέντου και σκυροδέματος	3
Μεθοδολογία σχεδιασμού συνθέσεων για παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης με χρήση λατομικής παπάλης	11
Ανάπτυξη ελαφροσκυροδέματος με χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων.....	25
Συν-αξιοποίηση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) και μεταλλουργικής σκωρίας για την παραγωγή ανόργανων πολυμερών	35
Διερεύνηση της παραγωγής τερνεσιτικών τσιμέντων από ελληνικά βιομηχανικά παραπροϊόντα.....	47
Μελέτη της πορείας ενυδάτωσης και της αντίστασης σε περιβάλλον θειικών, τσιμέντων με ασβεστόχο ιπτάμενη τέφρα	59
Επίδραση αργιλοπυριτικών υλικών στις ιδιότητες αλκαλικώς ενεργοποιημένων κονιαμάτων με βάση την ιπτάμενη τέφρα.....	70
Αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των αλκαλικώς ενεργοποιημένων κονιαμάτων με βάση την ιπτάμενη τέφρα.....	77
Διερεύνηση των χαρακτηριστικών της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και της σκωρίας μεταλλακτών σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος	87
Μελέτη αντοχής και ανθεκτικότητας σκυροδεμάτων με χρήση σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και σκωρίας κάδου ως αδρανή υλικά	98
Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα με τη χρήση σκωρίας κάδου.....	109
Εφαρμογή της μεθόδου SWeRF για την εκτίμηση του εσπνεύσιμου κλάσματος δομικών κονιών	116
Παραγωγή δομικών στοιχείων χαμηλού αποτυπώματος CO ₂ με χρήση ανακυκλωμένου σκυροδέματος από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ)	124
Χρήση ανακτημένου ασφαλτικού σκυροδέματος για την παραγωγή ασφαλτομίγματος υψηλής επιτελεσματικότητας.....	134
Πειραματική διερεύνηση εισαγωγής αδρανών από ανακύκλωση πλαστικών υλικών σε βάσεις οδοστρώματων	144
Διερεύνηση της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών σε εύκαμπτα οδοστρώματα μέσω της αξιολόγησης του κύκλου ζωής.....	154
Χρήση της απορριφθείσας παπάλης ασφαλτικών συγκροτημάτων ως πληρωτικό υλικό – εφαρμογή σε τσιμεντένιο κεραμίδι.....	169
Έλεγχος δραστηριότητας με ιπτάμενη τέφρα και αλκαλική ενεργοποίηση λούμης.....	175

Η συμβολή των βιομηχανικών παραπροϊόντων στην αειφόρο ανάπτυξη. Το παράδειγμα στον χώρο τσιμέντου και σκυροδέματος

Σ. Τσίμας,

Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ, αντιπρόεδρος EBIPAP

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η αειφόρος ανάπτυξη ή βιώσιμη ανάπτυξη αναφέρεται στην οικονομική ανάπτυξη που σχεδιάζεται και υλοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιωσιμότητα. Γνώμονας της αειφορίας είναι η μέγιστη δυνατή απολαβή αγαθών από το περιβάλλον, χωρίς όμως να διακόπτεται η φυσική παραγωγή αυτών των προϊόντων σε ικανοποιητική ποσότητα και στο μέλλον. Η βιώσιμη ανάπτυξη προϋποθέτει ανάπτυξη των παραγωγικών δομών της οικονομίας παράλληλα με τη δημιουργία υποδομών για μία ευαίσθητη στάση απέναντι στο φυσικό περιβάλλον και στα οικολογικά προβλήματα. Η βιωσιμότητα υπονοεί ότι οι φυσικοί πόροι υφίστανται εκμετάλλευση με ρυθμό μικρότερο από αυτόν με τον οποίο ανανεώνονται, διαφορετικά λαμβάνει χώρα περιβαλλοντική υποβάθμιση. Θεωρητικά, το μακρο-πρόθεσμο αποτέλεσμα της περιβαλλοντικής υποβάθμισης είναι η ανικανότητα του γήινου οικοσυστήματος να υποστηρίξει την ανθρώπινη ζωή (οικολογική κρίση).

Η μέγιστη επομένως αξιοποίηση των παραπροϊόντων μιας βιομηχανικής δραστηριότητας ως πρώτων υλών σε μία άλλη, όπως είναι τα δομικά υλικά, είναι καίριο εργαλείο της αειφόρου ανάπτυξης. Ο χώρος των δομικών υλικών έχει ποικίλες και “αλληλοδιαπλεκόμενες” εκφάνσεις στην αειφορία. Οι κυριότερες από αυτές, που αναφέρονται περιληπτικά στο πλαίσιο της εισήγησης, είναι: i) η ενσωμάτωση βιομηχανικών παραπροϊόντων (κυρίως προϊόντων καύσης άνθρακα) σε μία μεγάλη γκάμα παραδοσιακών κυρίως δομικών υλικών, ii) η ανάγκη μείωσης του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα από τις μονάδες παραγωγής των σημαντικότερων δομικών υλικών όπως είναι το τσιμέντο και ο ασβέστης, iii) η αντιμετώπιση του δημιουργούμενου προβλήματος από τα προϊόντα κατεδάφισης παλαιών κτισμάτων που είναι γνωστά ως οικοδομικά απόβλητα κλπ. Επίσης, iv) η ανάπτυξη νέων φιλικών προς το περιβάλλον δομικών υλικών, όπως είναι τα βελιτικά τσιμέντα και το διαπερατό σκυρόδεμα καθώς και v) η μείωση και κατά το δυνατόν εξάλειψη των περιβαλλοντικών προβλημάτων που δημιουργούνται από το επιστρεφόμενο σκυρόδεμα στις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος, αποτελούν δράσεις οι οποίες συνδέονται κυρίως με την αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι όροι «αειφορία» και «αειφόρος ανάπτυξη» χρησιμοποιούνται συχνά στην αρθρογραφία του έντυπου και ηλεκτρονικού τύπου, σε ανακοινώσεις επιστημονικών ενώσεων, περιβαλλοντικών οργανώσεων, πολιτικών κομμάτων, επιχειρήσεων κ.ά. Ο όρος της αειφορίας εμφανίστηκε για πρώτη φορά στη γερμανόφωνη δασική βιβλιογραφία στις αρχές του 18ου αιώνα [1,2] και καθιερώθηκε έναν αιώνα αργότερα σχετιζόμενος με τη διαχείριση των δασών. Στην Ελλάδα, η διάδοση του όρου αειφορία άρχισε στη δεκαετία του '70, οπότε άρχισε η ανάπτυξη της Οικολογίας και της Προστασίας του Περιβάλλοντος ως διακριτών ενοτήτων στα πανεπιστήμια, ταυτόχρονα με την ανάπτυξη ενδιαφέροντος από διάφορες κοινωνικές ομάδες σχετικά με την περιβαλλοντική υποβάθμιση. Γνώμονας και βασική επιδίωξη της αειφορίας είναι η μέγιστη δυνατή απολαβή αγαθών από το περιβάλλον, χωρίς όμως να διακόπτεται η φυσική παραγωγή αυτών των προϊόντων σε ικανοποιητική ποσότητα και στο μέλλον. Παράλληλα, η βιωσιμότητα είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος όρος που υπονοεί ότι οι φυσικοί πόροι υφίστανται εκμετάλλευση με ρυθμό μικρότερο από αυτόν με τον οποίο ανανεώνονται, διαφορετικά λαμβάνει χώρα περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Βασικό εργαλείο για την αειφόρο ανάπτυξη και συνεπώς τη βιωσιμότητα είναι η μέγιστη αξιοποίηση των παραπροϊόντων μιας βιομηχανικής δραστηριότητας (ΒΠ) ως πρώτων υλών σε μία άλλη. Από τα μεγαλύτερα σε όγκο και ποσότητες είναι τα παραπροϊόντα που προέρχονται από τις βιομηχανικές δραστηριότητες παραγωγής ενέργειας, (τα γνωστά CCP's – CoalCombustionProducts). Παράλληλα (και χωρίς να παραγνωρίζεται σειρά άλλων παραπροϊόντων), αντίστοιχης σπουδαιότητας είναι τα παραπροϊόντα μεταλλουργικών διεργασιών (γνωστά με τον γενικό όρο σκωρίες) καθώς και τα οικοδομικά απόβλητα από κατεδαφίσεις κτιρίων (ΑΕΚΚ - Απόβλητα Εκσκαφών Κατασκευών και Κατεδαφίσεων).

Η χρήση των ΒΠ σε διάφορες εφαρμογές προσφέρει προφανή περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, όπως η υποκατάσταση και η διατήρηση των φυσικών πρωτογενών πόρων, η εξοικονόμηση ενέργειας οι μειώσεις των εκπομπών CO₂, καθώς και η εξοικονόμηση χώρων υγειονομικής ταφής. Πρόκειται για ένα πολύ καλό παράδειγμα βιώσιμης ανάπτυξης και κυκλικής οικονομίας, δεδομένου ότι πληροί απόλυτα τους στόχους που ιεραρχούνται στο άρθρο 4 της οδηγίας πλαισίου για τα απόβλητα 2008/98 [3], όπου η πρόληψη των αποβλήτων αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα έναντι της επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης, ανάκτησης και διάθεσης. Αρκετές μελέτες, καθώς και η πρακτική εμπειρία από τη μακροχρόνια χρήση ΒΠ σε διάφορες δραστηριότητες, έδειξαν ότι δεν επέρχονται δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον ή στην υγεία του ανθρώπου από τη χρήση των υλικών αυτών.

Όταν οι ποσότητες ΒΠ δεν χρησιμοποιούνται, τυπικά απορρίπτονται ως απόβλητα. Ωστόσο, όταν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες δραστηριότητες, είτε απευθείας από την βιομηχανία αρχικής «παραγωγής» τους (παραγωγή ενέργειας, μεταλλουργική διεργασία κλπ), ή μετά από σύντομες περιόδους αποθήκευσης, χωρίς άλλη επεξεργασία πέραν της συνήθους βιομηχανικής πρακτικής και πληρούν παράλληλα τις, απαιτήσεις υγείας και προστασίας του περιβάλλοντος, τότε δεν απορρίπτονται και θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως -προϊόντα, όπως ορίζονται στο άρθρο 5 της οδηγίας πλαίσιο για τα απόβλητα. Δεδομένου ότι τα υποπροϊόντα διατίθενται στην αγορά, εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής του κανονισμού REACH1907/2006 / ΕΚ και της σχετικής καταχώρισης [4]. Στο πλαίσιο αυτό, πολυάριθμοι φορείς (παραγωγοί, εισαγωγείς, έμποροι) έχουν ήδη δημιουργήσει για πληθώρα παρόμοιων υλικών, φάκελους καταχώρισης του REACH που περιέχουν λεπτομερή χαρακτηρισμό των καταχωρισμένων ουσιών και περιγράφουν τις χρήσεις τους.

2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ. ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΑ...

Χωρίς τα παραβλέπονται οι άλλες μεγάλες κατηγορίες δομικών υλικών, η βιομηχανία τσιμέντου καθώς και οι μονάδες ετοιμού σκυροδέματος, ίσως και λόγω του μεγέθους των, αποτελούν τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα ενσωμάτωσης στα τελικά τους προϊόντα (τσιμέντο και σκυρόδεμα), μεγάλης γκάμας εναλλακτικών βιομηχανικών παραπροϊόντων.

Είναι γνωστό ότι η βιομηχανία τσιμέντου έχει σημαντική συμμετοχή στις εκπομπές CO₂ αντιπροσωπεύοντας περίπου το 5-6% της παγκόσμιας ανθρωπογενούς παραγωγής CO₂, παράλληλα όμως έχει πολλαπλή και ουσιαστική συμβολή στις αναληφθείσες, εδώ και 25 χρόνια, προσπάθειες μείωσης του. Επιπροσθέτως, τα συμβατικά κτίρια από σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της ζωής τους είναι υπεύθυνα για το 18% της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως και, μένοντας στην Ευρώπη, το ποσοστό αυτό μπορεί να φθάσει και το 35%. [5]. Και στον τομέα όμως αυτό, με τις προσπάθειες που έχουν την τελευταία 15ετία αναληφθεί για έξυπνα σχεδιασμένο σύγχρονο σκυρόδεμα, τα κτίρια στο σύνολό τους μπορούν να χρησιμοποιήσουν κατά 75% λιγότερη ενέργεια. Ειδικά για το σκυρόδεμα, ενδιαφέρον έχει η διαπίστωση ότι παγκοσμίως παράγονται ανά έτος 3τόνοι /άτομο, ποσότητα που είναι διπλάσια από όλα τα άλλα γνωστά δομικά υλικά μαζί [6].

2.1. Η χρήση των ΒΠ και η μείωση των εκπομπών CO₂.

Δεν απαιτείται ιδιαίτερη εμβάθυνση στα θέματα της βιομηχανίας τσιμέντου για να γίνει αντιληπτό ότι η περιβαλλοντική επιβάρυνση (και συνεπώς οι προσπάθειες για αποφυγή τους στο πλαίσιο μιας αειφόρου αντιμετώπισης) από αυτήν εστιάζεται: i) στις εκπομπές CO₂, ii) στην απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγική διαδικασία και iii) στην μεγάλη κατανάλωση φυσικών πόρων που αποτελούν τις πρώτες ύλες για την παραγωγή. Οι τρεις αυτές συνιστώσες είναι αλληλένδετες έχοντας όμως ως συνισταμένη τη μείωση των εκπομπών. Συνεπώς τα μέτρα που θα ληφθούν είτε για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας είτε για υποκατάσταση των φυσικών πόρων ή βελτίωση των υφισταμένων, θα μειώσουν εκ των πραγμάτων τις εκπομπές CO₂ και, κατά συνέπεια δικαιολογείται η εστίαση σε αυτές [7].

Στην Ευρώπη, για τη μείωση των εκπομπών CO₂ από 720 σε 650 kg/t τσιμέντου τα τελευταία 25 χρόνια, δεν υπήρχε μία λύση και δεν ακολουθήθηκε κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία, αλλά αντιθέτως αυτή υπήρξε συνδυασμός εφαρμογής πολλών επιμέρους μεθοδολογιών στις οποίες πρωτεύοντα ρόλο είχε η χρησιμοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων καθώς και, γενικότερα, η χρήση αποβλήτων και βιομάζας. Έτσι, μεταξύ άλλων τεχνικών, συνέβαλαν καθοριστικά: i) η αντικατάσταση μέρους του κλίνκερ με υλικά με ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες όπως αλεσμένες φυσικές ποζολάνες [8], δραστικά βιομηχανικά παραπροϊόντα (πχ ιπτάμενες τέφρες) [9, 10], λεπτώς αλεσμένο ασβεστολιθικό υλικό [11, 12] και άλλα, ii) η χρήση μεγαλύτερων ποσοτήτων εναλλακτικών καυσίμων (επταπλάσια αύξηση από το 1990), που συνίσταται στη χρήση είτε αποβλήτων είτε βιομάζας και iii) χρήση ευρείας γκάμας απορριμμάτων και αποβλήτων αντί του ασβεστόλιθου αλλά και άλλων φυσικών υλικών που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες, φορείς CaO στην παρασκευή κλίνκερ.

2.2. Από τη διαχείριση των πόρων στη διαχείριση των ΒΠ και των αποβλήτων

Από τα ήδη εκτεθέντα φάνηκε ότι κλειδί για την εξοικονόμηση ενέργειας και πρώτων υλών παράλληλα με τη μείωση των εκπομπών CO₂ είναι η χρησιμοποίηση επιλεγμένων ποσοτήτων αποβλήτων σε διάφορες φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου που μπορεί να αποδοθεί με τον όρο συνεπεξεργασία (co-processing). Φαίνεται επομένως ότι, οι βιομηχανίες τσιμέντου αλλά και σκυροδέματος, προσβλέποντας σε μία αειφόρο ανάπτυξη και εξασφαλίζοντας και στο μέλλον (2050) επαρκές και ποιοτικό τσιμέντο, μεταθέτουν το προβληματισμό τους της διαχείρισης των πόρων σε αυτόν της διαχείρισης των αποβλήτων. Είναι προφανές ότι παρά την κοινή βάση, κάθε χώρα ανάλογα με τα απόβλητά της αλλά και τις δυνατότητες της αγοράς της, προσεγγίζει το πρόβλημα από διαφορετική οπτική.

Γενικά η **συνεπεξεργασία** είναι η χρήση Β.Π. ή αποβλήτων ως πρώτης ύλης ή ως πηγής ενέργειας για την αντικατάσταση τόσο των φυσικών ορυκτών πόρων όσο και των ορυκτών καυσίμων. Η συνεπεξεργασία των αποβλήτων στη βιομηχανία τσιμέντου παρέχει μέγιστη αντικατάσταση μη ανανεώσιμων υλικών καθόσον καλύπτει υλικά στα οποία η ανακύκλωση δεν είναι πάντα οικονομικά και οικολογικά βιώσιμη επιλογή, ενώ, όπως εξηγείται στο 3,1, έχει το μοναδικό πλεονέκτημα της καταστροφής πληθώρας επικίνδυνων υλικών που υπάρχουν στα απόβλητα. Με δεδομένο ότι η συνεπεξεργασία αποβλήτων αποδεικνύεται κομβικής σημασίας για την αειφόρο ανάπτυξη της βιομηχανίας τσιμέντου, προβάλλει επιτακτικό το θέμα της σωστής διαχείρισης τους, διαχείριση που θα είναι διαφορετική σε κάθε χώρα ανάλογα με τις διατιθέμενες ροές τους. Με γνώμονα την εξασφάλιση ομοιογένειας και σταθερής τροφοδοσίας στη ροή αποβλήτων που θα χρησιμοποιηθεί από τη βιομηχανία τσιμέντου, απαιτείται προ επεξεργασία (κατά το δυνατό με μικρότερο κόστος) που θα ομαλοποιήσει τη ροή εξασφαλίζοντας σταθερή ποιοτική παροχή χωρίς περιοδικές αυξομειώσεις σε κάποια μεταβλητή [13]. Επιμέρους ενδεικτικές τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση [14] είναι η ξήρανση, η άλεση (εκλεκτική ή μη), η

ομογενοποίηση καθώς και η προεπιλογή (preselection), τεχνική που έχει μελετηθεί διεξοδικά στο εργαστήριο AAX και έχει εφαρμοστεί στην IT Πτολεμαΐδας [15].

Η ορθολογική διαχείριση των διατιθέμενων αποβλήτων συντέτεινε ώστε η εξοικονόμηση ενέργειας από τη χρήση αποβλήτων από 3% που ήταν το 1990, να φθάσει το 37%, το 2014 με αντίστοιχη μείωση των εκπομπών CO₂ και των αποβλήτων που αποτίθενται στο περιβάλλον.

3.ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΜΠΡΟΣΤΑ ΣΤΟ 2050. Ο ΑΝΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΤΟΣ ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ Β.Π.

Για τα επόμενα τριάντα χρόνια και με στόχο πάντοτε την αειφορία, δεν αναμένονται νέες επαναστατικές λύσεις αλλά εντατικοποίηση της έρευνας σε τεχνικές και μεθοδολογίες που ήδη περιεγράφηκαν. Αν επιχειρηθεί να ομαδοποιηθούν οι εναλλακτικές μεθοδολογίες σε ένα οδικό χάρτη, διακρίνονται δέσμες παράλληλων δράσεων για το τσιμέντο και το σκυρόδεμα οι οποίες χωριστά αλλά και συνδυαστικά μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών από την παραγωγή τόσο τσιμέντου, όσο και σκυροδέματος. Άμεσα συνδεδεμένος είναι και ο κατασκευαστικός τομέας, πού, όπως αναφέρθηκε, θα επωμισθεί το βάρος δημιουργίας μεγάλου όγκου κατασκευών που θα καλύψουν τις αυξημένες κοινωνικές ανάγκες. Στη συνέχεια με προοπτική το 2050 αναπτύσσονται διεξοδικότερα οι περισσότερες από αυτές τις δράσεις.

3.1 Τα εναλλακτικά καύσιμα

Αυτά, στα οποία περιλαμβάνεται υψηλό ποσοστό αποβλήτων, βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή και αντιπροσωπεύουν πλέον το ένα τρίτο όλων των καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία της ΕΕ. Η ευρωπαϊκή τσιμεντοβιομηχανία αύξησε σταθερά τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων (7πλάσια αύξηση από το 1990) και πλέον το 2010 χρησιμοποιούνται πάνω από 7 εκατ. τόνοι. Παράλληλα εκτιμάται ότι μέχρι το 2050, η απαιτούμενη ενέργεια θα καλύπτεται κατά 40% από παραδοσιακές πηγές (άνθρακας (30%) και petcoke (10%) ενώ το 60% της ενέργειας της καμίνου θα προέρχεται από εναλλακτικά καύσιμα από τα οποία το 40% θα μπορούσε να είναι βιομάζα. Αυτό το μείγμα καυσίμων θα οδηγούσε σε συνολική μείωση κατά 27% στις εκπομπές CO₂. Οι κάμινοι παραγωγής κλίνκερ είναι ιδανικές για χρήση διάφορων υλικών όπως ελαστικά, χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια, λάσπες από μονάδες βιολογικών καθαρισμών, πριονίδια και γενικότερα βιομάζα με βασικό επακόλουθο, εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας, την ενσωμάτωση στις φάσεις του κλίνκερ των προσκοπτουσών τεφρών από τα υλικά αυτά. Με προοπτική το 2050 και προκειμένου να αυξηθεί η χρήση εναλλακτικών καυσίμων, θα πρέπει επίσης να αυξηθούν η πρόσβαση σε διάφορα απόβλητα (όπως οι λάσπες) και σε βιομάζα. Παράλληλα θα πρέπει να προωθηθούν και να γίνουν ευρέως κατανοητά τα οφέλη της συνεπεξεργασίας και να εισαχθεί νομοθεσία που να αντιμετωπίζει την συνεπεξεργασία και να ορίζει τα κατάλληλα υλικά αποβλήτων.[5,6,16]

3.2.Η υποκατάσταση πρώτων υλών με φορείς CaO.

Η υποκατάσταση πρώτων υλών με διάφορα υλικά φορείς CaO, συμβάλει επίσης καθοριστικά τόσο στη μείωση των εκπομπών CO₂ (καθόσον το 60% τους αποδίδεται στη διάσπαση των ανθρακικών αλάτων) όσο και στη μείωση της εκμετάλλευσης των λατομείων εξοικονομώντας με τον τρόπο αυτό πρώτες ύλες για τις επερχόμενες γενιές. Ο ασβεστόλιθος μπορεί επιτυχώς μερικώς να αντικατασταθεί (και αυτό σε κάποιον ποσοστό ήδη γίνεται) από μεγάλη γκάμα υλικών όπως είναι επιλεγμένα απόβλητα και βιομηχανικά παραπροϊόντα, ενώ πολλά από αυτά τα υλικά, όπως διάφορες λάσπες, έχουν και επιπροσθέτως και θερμογόνο δύναμη. Στα απόβλητα περιλαμβάνονται και τα απόβλητα από κατεδαφίσεις κτιρίων από τα οποία σημαντικό μέρος είναι σκυρόδεμα. Έχει αποδειχθεί ότι τα υλικά αυτά μετά από θρυμματισμό τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντικαθιστώντας τον ασβεστόλιθο, παράλληλα με την πιο

διαδεδομένη χρήση τους ως αδρανή σε νέα σκυροδέματα. Η χρήση και η έρευνα για παρόμοια υλικά μπορεί να ενταθεί εν όψει του 2050, υπόκειται όμως σε αρκετούς περιορισμούς τόσο οικονομικής φύσεως (θα πρέπει η πηγή των υλικών αυτών να είναι σε κοντινή απόσταση από το εργοστάσιο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος μεταφοράς) αλλά και ποιοτικούς (θα πρέπει να μην υπάρχουν στοιχεία στη μάζα των αποβλήτων τα οποία θα υποβαθμίσουν την ποιότητα του τσιμέντου). Στην υποκατάσταση των πρώτων υλών περιλαμβάνεται και η υποκατάσταση της φυσικής γύψου με φορείς θειικού ασβεστίου όπως είναι το προϊόν της αποθείωσης των ενεργειακών μονάδων τόσο με ασβεστόλιθο (FGDGypsum) [17], όσο και με CaO ή Ca(OH)₂ (SDAP) [18]. Η ομοιογένεια στη σύσταση των διατιθέμενων υλικών είναι πάντοτε ζητούμενο στη βιομηχανία τσιμέντου και το κόστος πιθανών διατάξεων ομογενοποίησης και γενικότερα προ επεξεργασίας των υλικών θα πρέπει να προσμετράται. Τέλος για τη προσθήκη παρόμοιας φύσης υλικών θα πρέπει να υπάρχει και σχετική νομοθεσία.

3.3. Η μερική υποκατάσταση του κλίνκερ

Η δράση αυτή είναι χρονικά η πιο διαδεδομένη καθόσον η συνάλεση κλίνκερ με ποζολάνες αλλά και άλλα παρόμοιας φύσης υλικά προβλεπόταν ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '70. Η υποκατάσταση αυτή του κλίνκερ και η συνεπαγόμενη μείωση του λόγου κλίνκερ/τσιμέντο (K/T) συγκεντρώνει το σύνολο σχεδόν των εκφάνσεων αιφορίας καθόσον: i) εξοικονομείται ενέργεια ii) εξοικονομούνται πρώτες ύλες iii) μειώνονται οι εκπομπές CO₂ και iv) αξιοποιούνται παραπροϊόντα που διαφορετικά θα αποτίθεντο στο περιβάλλον. Η χρήση των υλικών αυτών γίνεται πάντα στο πλαίσιο της συμμόρφωσής τους με τα ισχύοντα πρότυπα (για την Ευρώπη το εναρμονισμένο EN 197-1) στα οποία και προβλέπονται πολλοί τύποι τσιμέντων η επιλογή των οποίων συναρτάται με τα επιθυμητά πεδία εφαρμογής του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Έτσι οι διαφορετικοί τύποι τσιμέντου με διαφορετικό λόγο K/T, έχουν διαφορετικές ιδιότητες στις οποίες μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται ο χρόνος ανάπτυξης αρχικών και τελικών αντοχών, η αντίσταση σε διαφορετικά περιβάλλοντα, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ενυδάτωσης καθώς και η εργασιμότητα του τσιμεντοπολτού. Ο διαφορετικός λόγος K/T βεβαίως συνεπάγεται διαφορετικά πεδία εφαρμογής όλα όμως στο πνεύμα της ανάπτυξης ανθεκτικών για 50 τουλάχιστον χρόνια σκυροδεμάτων που είναι και το κλειδί για την αιφορία των κατασκευών. Κάθε χώρα προσαρμόζει τα υπάρχοντα δυναμικά χρησιμοποιήσιμα υλικά της και το ποσοστό που τελικά θα χρησιμοποιηθεί από καθένα εξαρτάται και από τη συμμόρφωση με διάφορα ποιοτικά κριτήρια. Με διακύμανση από το 95% (στα παλαιότερα OPC ή στα CEM I με βάση το EN 197-1) στο 5% (σε ένα τύπο του EN), ο λόγος K/T στην Ευρώπη ήταν προ 10ετίας στο 78% και το 2014 κινείτο στα 73.7%. Για το μέλλον εκτιμάται ότι θα κινηθεί περί το 70% γεγονός που συνεπάγεται περαιτέρω μείωση των εκπομπών κατά 4%. Δύσκολα όμως θα μειωθεί περισσότερο καθόσον οι τοπικές αγορές στρέφονται προς κατασκευές που απαιτούν ταχύτερους ρυθμούς ανάπτυξης αντοχών.

3.4 Η μελέτη νέων τσιμέντων

Η δράση αυτή, σε αντίθεση με την προηγούμενη είναι χρονικά νεότερη και αυτή την περίοδο είναι το αντικείμενο των προσπαθειών μεγάλων Ευρωπαϊκών ερευνητικών κέντρων που ασχολούνται με το τσιμέντο. Σχετίζεται με τα ΒΠ καθόσον αυτά χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για παραγωγή τσιμέντων με χαμηλές ή πολύ χαμηλές εκπομπές CO₂ που συνεπάγονται και αντίστοιχες μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις. Μεταξύ άλλων αντιμετωπίζεται η δημιουργία και μελέτη ιδιοτήτων κονιών όπως οι θειοαλουμινικές βελτιτικές, γεωπολυμερή και άλλες [19,20,21]. Χαρακτηριστικό των νέων αυτών τσιμέντων είναι ότι δεν έχουν ακόμα διεξοδικά διερευνηθεί ούτε για τη συμπεριφορά τους σε βάθος χρόνου ούτε ακόμα για την οικονομική βιωσιμότητα τους (τα αποθέματα πρώτων υλών είναι αβέβαια και εκτιμώνται μικρά για τα μεγέθη μιας τσιμεντοβιομηχανίας). Παρά τις διαφαινόμενες προοπτικές τους

ειδικά στο θέμα της συμβολής στην αειφορία, οι προοπτικές χρήσης τους στο άμεσο μέλλον περιορίζονται σε μη δομικές εξειδικευμένες εφαρμογές και ένα μερίδιο 5% της συνολικής παραγωγής τσιμέντου δηλαδή 11 εκατομμύρια τόνοι αναμένεται να καλυφθεί από παρόμοιας φύσης νέα τσιμέντα. Εν όψει του 2050 θα πρέπει να ενταθεί η έρευνα όσον αφορά την ανθεκτικότητα τους, να πεισθεί η αγορά για τα πεδία εφαρμογής τους και να πεισθεί και ο δομικός τομέας να τα ενσωματώσει στα προϊόντα του.

3.5. Σκυρόδεμα και βιομηχανικά παραπροϊόντα. Τρεις δράσεις...

Η ανακύκλωση του σκυροδέματος συζητιέται πάρα πολύ τα τελευταία 15 χρόνια και ήδη στην Ευρώπη περίπου 200 εκ. τόνοι από απόβλητα κατεδαφίσεων (C&DW) δημιουργούνται κάθε χρόνο. Ο στόχος της μηδενικής επιβάρυνσης του περιβάλλοντος εκτιμάται ότι το 2050 θα είναι ρεαλιστικός και σε αυτό βεβαίως θα συμβάλει και η προσεκτική σχεδίαση του αρχικού σκυροδέματος για να γίνει ανακυκλώσιμο (recyclable) [22]. Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα από C&DW μπορεί με προσεκτική θραύση να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές τόσο για το οδικό δίκτυο, όσο και σε νέες σκυροδετήσεις αδρανών, ενώ οι ενυδατωμένες και σκληρυμένες πάστες τσιμέντου (CSH) εφόσον διαχωριστούν επιτυχώς από τα αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορέας CaO αντί του ασβεστόλιθου στην παραγωγή κλίνκερ [23].

Η αξιοποίηση του επιστρεφόμενου σκυροδέματος κινείται σε δύο άξονες (αξιοποίηση του νερού έκπλυσης και αξιοποίηση της λούμης) που αμφότεροι έχουν θετική επίπτωση στο περιβάλλον. Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρησιμοποίηση ως έχει του νερού έκπλυσης των οχημάτων μεταφοράς ετοιμού σκυροδέματος αλλά και η αξιοποίηση της λούμης ως ασβεστολιθικό φίλλερ, συμβάλλουν στη μείωση της εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων, στη μείωση των βλαβερών επιπτώσεων από την απόθεση στο περιβάλλον του επιβαρυσμένου νερού [24].

Το **διαπερατό σκυρόδεμα** συνίσταται από τσιμέντο Πόρτλαντ, χονδρόκοκκα αδρανή, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα αδρανή, πρόσμικτα και νερό. Παράλληλα έχουν μελετηθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα, συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος με σκωρίες καθώς και ΑΕΚΚ. Το σκυρόδεμα αυτό που μπορεί να πετύχει θλιπτικές αντοχές της τάξης των 28 MPa, έχει την ιδιαιτερότητα, λόγω του μεγάλου πορώδους του (18 - 35%) να επιτρέπει στο νερό της βροχής να διέρχεται μέσα από τη μάζα του, συντελώντας έτσι στη σωστή διαχείριση των όμβριων υδάτων, στην αποφυγή των πλημμυρών και στον εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων [25].

4. ΤΟ ΤΡΙΠΛΟ ΟΦΕΛΟΣ (ΜΟΝΤΕΛΟ WIN/WIN/WIN)

Με βάση μια βιώσιμη ανάπτυξη θα πρέπει ισότιμα να αντιμετωπίζονται και να κερδίζουν τρεις βασικοί πυλώνες όπως είναι η Κοινωνία, η Οικολογία και η Βιομηχανία. Στη βιομηχανία τσιμέντου το μοντέλο Win/win/win, με τη χρήση αποβλήτων και παραπροϊόντων, συνεχώς κερδίζει έδαφος στο πλαίσιο μιας **ολιστικής** αντιμετώπισης. Ο τομέας τσιμέντου βοηθά άλλες βιομηχανίες ή δήμους να διαθέσουν τα απόβλητά τους και, με τη σειρά του αποκτά πρόσβαση σε οικονομικά αποδοτικές πηγές καυσίμων ή σε πρώτες ύλες. Επιπλέον, η συν-επεξεργασία μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, μειώνει την υπερλατόμευση και εμποδίζει τα απόβλητα να καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Επίσης έχει άμεσο αντίκτυπο στη μείωση των εκπομπών CO₂, καθώς μειώνει την ποσότητα των φυσικών πρώτων υλών, υλικών που απαιτούνται για την παραγωγή κλίνκερ. Παράμετρο σε όλα αυτά για την τελική απόφαση αποτελεί το πιθανό κόστος μεταφοράς, στοιχείο που πολλές φορές αποτρέπει την υλοποίηση μιας, κατά τα άλλα, ιδιαίτερα έξυπνης ιδέας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εισήγηση επικεντρώθηκε σε μία επιγραμματική αναφορά των πολλαπλών εφαρμογών που βρίσκουν, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, τα βιομηχανικά παραπροϊόντα στο χώρο του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Τονίστηκαν τα σημεία όπου οι μέχρι τώρα προσπάθειες που στοχεύουν στην αειφορία, έχοντας αποδώσει σημαντικά, έχουν φθάσει σε ένα οριακό επίπεδο και επισημάνθηκαν και τα σημεία όπου με στόχο την αειφόρο ανάπτυξη στο 2050, υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω ενεργειών και ανάληψης συγκεκριμένων δράσεων. Εκτιμήθηκε ότι ο στόχος για τη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 80%, αλλά και του τριπλού οφέλους, θα πρέπει να προσεγγιστεί μέσα από πολλές και εναλλακτικές δράσεις. Ενέργειες όπως η χρησιμοποίηση επιλεγμένων αποβλήτων τόσο στην παραγωγή τσιμέντου με την διαδικασία της συμπαραγωγής όσο και στη παραγωγή σκυροδέματος με υποκατάσταση αδρανών με υλικά κατεδάφισης παλαιών κτιρίων, καθώς και η εντατικοποίηση στη μελέτη νέων τσιμέντων θα πρέπει συγκεντρώσει παγκοσμίως στο άμεσο μέλλον πολλές ερευνητικές προσπάθειες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Φωτιάδης Μ., Αειφορία και αειφόρος ανάπτυξη : μια ακόμα κριτική θεώρηση. Για την περιβαλλοντική εκπαίδευση Τεύχος 13 (58)
2. Ντάφης, Σ. (1994). Αειφορία και αειφορική ανάπτυξη. Αμφίβιον. τ. 7.
3. Οδηγία Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου 2008/98/EK
4. Κανονισμός REACH 1907/2006 / EK
5. Cembureau, "The role of cement in the 2050 low carbon economy", (2014)
6. Cembureau "Cement concrete and the circular economy", (2016)
7. Gartner, E., Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements, Cement and Concrete Research, 2004, 34, (2004), 1489-1498
8. Φτίκος, Χ. "Μελέτη της δράσεως της θηραϊκής γης κατά την ενυδάτωση τσιμέντων μετ' αυτής". Διδ. Διατριβή ΕΜΠ, Αθήνα (1977)
9. Papayianni, J. "An investigation of the pozzolanicity and hydraulic reactivity of a high-lime fly ash", Magazine of Concrete Research, London, Vol. 39, No 138. (1987)
10. Mehta, P.K. "Role of pozzolanic and cementitious materials in sustainable development of the concrete industry", 6th CANMET/ACI, Malhotra V.M. (ed), I, (1998), 1-20
11. Tennis, P.D., Thomas, MDA., Weiss W.J. "State-of-the-art report on use of limestone in cements at levels of up to 15%, PCA R7D SN3148, (2011)
12. Tsvivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis G., Theodossis, D., "Properties and behavior of limestone cement, concrete and mortar", Cem. Concr. Res, Vol.30, 10 (2000) 1679-1683
13. Antiohos S., Tsimas S. "Investigating the Role of Reactive Silica in the Hydration Mechanisms of High-Calcium Fly Ash/Cement Systems", Cement and Concrete Composites 27, (2005), 171-181
14. Lewandowski, W., H-J Feuerborn, "Processing plants for fly ash in Europe" Proc. of International Scientific and Practical Workshop ASHES ON TPPS, Moscow (2007), 60-63
15. Tsimas, S., Vardaka G., Zervaki, M., "The preselection of high calcium fly ashes as the first step for their further evaluation" 1st EuroCoalAsh Conference Warsaw (2008), 249-256
16. Σ. Τσίμας, «Εκφάνσεις αειφορίας σε κονίες και σκυροδέματα», 18^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αθήνα, (2018).
17. Tzouvalas G., Rantis G., Tsimas S., Alternative calcium sulfate bearing materials as cement retarders. Part II: FGD Gypsum, Cement and Concrete Research, 34, (2004), 2119-2125

18. Antiohos S. K., Gioka E., Zervaki M., Fragoulis D. Tsimas S. "Cements incorporating Semi Dry Absorption (SDA) product; Opportunities and bottlenecks". 4th International Conference EuroCoalAsh 2014, Munich Germany, (2014), 57-69
19. Dienemann W., Schmitt D., Bullerjahn F., Ben Haha M., "Belite-Calciumsulfate aluminat-Ternesite (BCT) – A new low-carbon clinker technology", Cement International vol. 11, (2013)
20. Gartner E., "What are BYF cements, and how do they differ from CSA cements?", The Future of Cement, 200 years after Louis Vicat, (2017), UNESCO, Paris
21. Ν. Σταυρουλάκης, Α. Παπαδημητρίου, Α. Χαρίτου, Σ. Αντίοχος, Α. Στρατάκης, Ι. Καρατάσιος, Ε. Παυλάτου, Σ. Τσίμας "Παραγωγή τερνεσιτικώνκλίνκερ από βιομηχανικά παραπροϊόντα. Η επίδραση των παραμέτρων κλινκεροποίησης" 12^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Αθήνα, (2019)
22. Schepper de Mieke, "Completely Recyclable Concrete for a more Environment Friendly Construction", Ph.D. Thesis, University of Gent. (2014)
23. Galbenis C-T, Tsimas S., "Use of construction and demolition wastes as new materials in cement clinker production" China Particology 4, 1-2, (2006), 83-85
24. Zervaki, M., Leptokaridis, C., Tsimas, S., "Reuse of By-Products from Ready-Mixed Concrete Plants for the Production of Cement Mortars", J. of Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems Vol. 1. No 2, (2013) 152-162
25. Vardaka G., Thomaidis K., Leptokaridis C, Tsimas S., "Use of steel slag as coarse aggregate for the production of pervious concrete", J. of Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems, Vol. 2, Issue 1, (2014) 30-40

Μεθοδολογία σχεδιασμού συνθέσεων για παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης με χρήση λατομικής παιπάλης

A. Σουλτανά, Μ. Γαλετάκης

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100 Χανιά

Λέξεις κλειδιά: λατομική παιπάλη, κυψελωτό σκυρόδεμα φυσικής σκλήρυνσης, παραγοντικός σχεδιασμός πειραμάτων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η συσσώρευση της λατομικής παιπάλης, που παράγεται ως παραπροϊόν κατά την παραγωγή αδρανών υλικών, αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα τόσο για τη βιομηχανία των αδρανών υλικών, όσο και για το περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης της λατομικής παιπάλης για την παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης. Η σύνθεση των μιγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού Box-Behnken σε συνδυασμό με τη μεθοδολογία των επιφανειών απόκρισης για τη βελτιστοποίηση των συνθέσεων. Μετρήθηκε η αντοχή σε θλίψη, η πυκνότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των παραγόμενων δοκιμίων. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών φάνηκε ότι είναι δυνατή η αξιοποίηση της λατομικής παιπάλης για την παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης με ικανοποιητικές μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητες και αυξημένη προστιθέμενη αξία σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά από σκυρόδεμα.

Mixture design methodology for the production of non-autoclaved aerated concrete using quarry dust

A. Soutana, M. Galetakis

School of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, 73100 Chania

Keywords: quarry dust, non-autoclaved aerated concrete, factorial design of experiments

ABSTRACT: Quarrying operations produce large quantities of fine by-products known as quarry dust, which constitute a major environmental problem. This study investigates the valorization potential of quarry dust for the production of non-autoclaved aerated concrete. The proposed mixture design methodology was mainly based on Box-Behnken fractional factorial design of experiments in combination with the response surface methodology to determine optimal composition. Laboratory testing of hardened specimens included the measurement of compressive strength, density and thermal insulation coefficient. Results indicated that the proposed mixture design methodology is very promising for the valorization of quarry dust for the production of non-autoclaved aerated concrete with acceptable mechanical and thermal insulating properties and high added value compared to conventional concrete building materials.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κυψελωτό σκυρόδεμα υδροθερμικής ωρίμανσης (autoclaved aerated concrete ή AAC) είναι ένα ελαφρύ πορώδες υλικό αποτελούμενο από εξαιρετικά λεπτομερή αδρανή (λειοτριβημένη χαλαζιακή άμμος), η άσβεστος και το τσιμέντο, ενώ ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος διογκωτικός παράγοντας είναι η σκόνη αργιλίου (Kanehira et al., 2013; Hamad, 2014). Παράγεται με φαινόμενες πυκνότητες από 400 έως 1100 kg/m³ και σκληρύνεται (ωρίμανση) σε ειδικούς θαλάμους (αυτόκλειστα) υπό πίεση (4-16 bar) και σε θερμοκρασία 170-190°C για χρονικό διάστημα 8-16 ωρών. Η αυξημένη πίεση και θερμοκρασία συμβάλλουν στην ταχεία ωρίμανση του κυψελωτού σκυροδέματος και τη μετατροπή των δραστικών συστατικών του σε ενώσεις υψηλής αντοχής και σταθερότητας, όπως ο τομπερμορίτης (Narayanan and Ramamurthy, 2000). Η χρήση μεγάλων ποσοτήτων λεπτόκοκκης χαλαζιακής άμμου, που αποτελείται κυρίως από κρυσταλλικό διοξείδιο του πυριτίου (crystalline silica), είναι απαραίτητη για το σχηματισμό των ενώσεων της ομάδας των τομπερμοριτών που προσδίδουν στο AAC την απαιτούμενη αντοχή. Όμως το κρυσταλλικό διοξείδιο του πυριτίου είναι μια ιδιαίτερα βλαπτική σκόνη (ινογόνα) που δημιουργεί σοβαρές μη αναστρέψιμες βλάβες στο αναπνευστικό σύστημα των εργαζομένων που εκτίθενται σε αυτή (Driscoll and Guthrie, 2010; Normohammadi et al., 2016). Επίσης, η λειοτριβήση της πυριτικής άμμου, καθώς και η ωρίμανση του AAC με χρήση αυτοκλείστου σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, αποτελούν ενεργοβόρες διαδικασίες. Είναι λοιπόν σημαντική η παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος με χρήση άλλων υλικών αντί της χαλαζιακής άμμου και με διαδικασίες παραγωγής λιγότερο ενεργοβόρες.

Η χρήση λατομικής παιπάλης ασβεστολιθικής σύστασης (αδρανής μη επιβλαβής σκόνη εξαιρετικά λεπτομερής) για την πλήρη υποκατάσταση της χαλαζιακής άμμου, καθώς και η συμβατική ωρίμανση που χρησιμοποιείται για δομικά στοιχεία βασισμένα σε τσιμέντο (σε θερμοκρασία 20±2°C και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 28 ημέρες σύμφωνα με τον ΚΤΣ) αντί της υδροθερμικής ωρίμανσης σε αυτόκλειστο αποτελεί μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα ερευνητική κατεύθυνση.

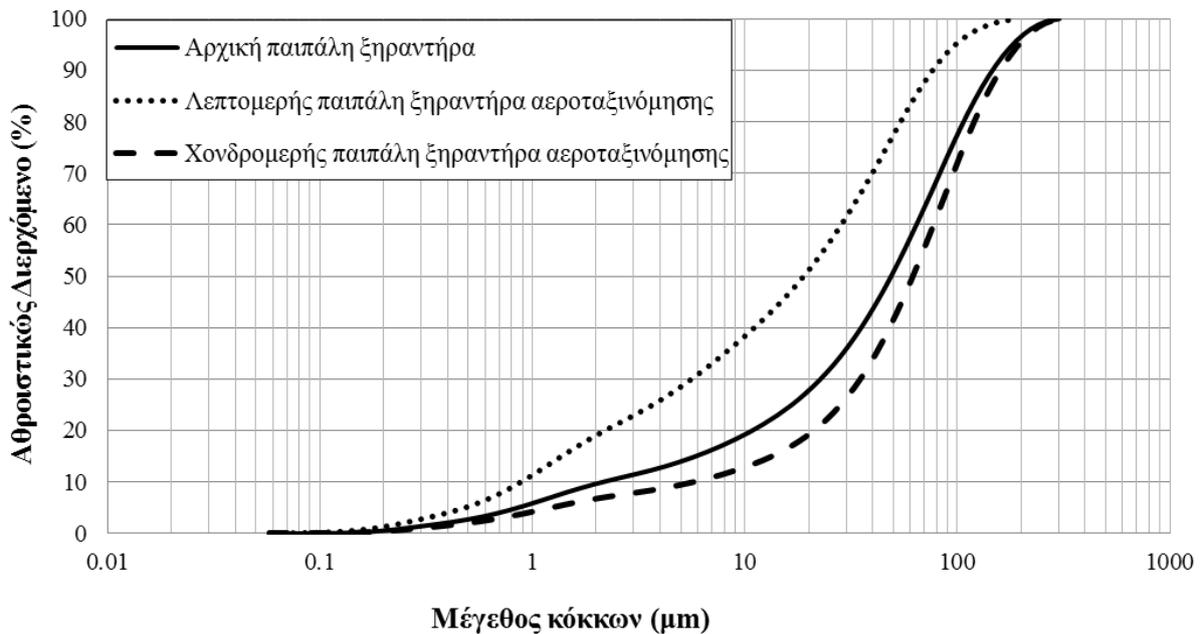
Η λατομική παιπάλη είναι ένα λεπτομερές παραπροϊόν που παράγεται κατά τις διαδικασίες παραγωγής θραυστών αδρανών σκυροδέματος και οδοποιίας. Η συσσώρευση αυτών των λεπτομερών παραπροϊόντων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της βιομηχανίας των αδρανών. Επιπλέον, κατά τη διαχείριση των λεπτομερών αυτών υλικών (αποθήκευση - απόθεση) απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες σκόνης στον αέρα με δυσμενείς επιπτώσεις για το περιβάλλον (Galetakis et al., 2012). Με την ανακύκλωση των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων για την παρασκευή κυψελωτού σκυροδέματος είναι δυνατό να απορροφηθούν μεγάλες ποσότητες λεπτομερών παραπροϊόντων με αποτέλεσμα να μειωθεί ακόμα περισσότερο το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή του και να περιοριστούν οι επιπτώσεις από την απόρριψη των λατομικών παραπροϊόντων στο περιβάλλον.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης με αποκλειστικό αδρανές την παιπάλη, με χρήση τσιμέντου ως συνδετικού υλικού και σκόνης αργιλίου ως διογκωτικό παράγοντα. Η μεθοδολογία καθορισμού των συνθέσεων βασίζεται στον κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό Box-Behnken, σε συνδυασμό με τη μέθοδο των επιφανειών απόκρισης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης σύνθεσης.

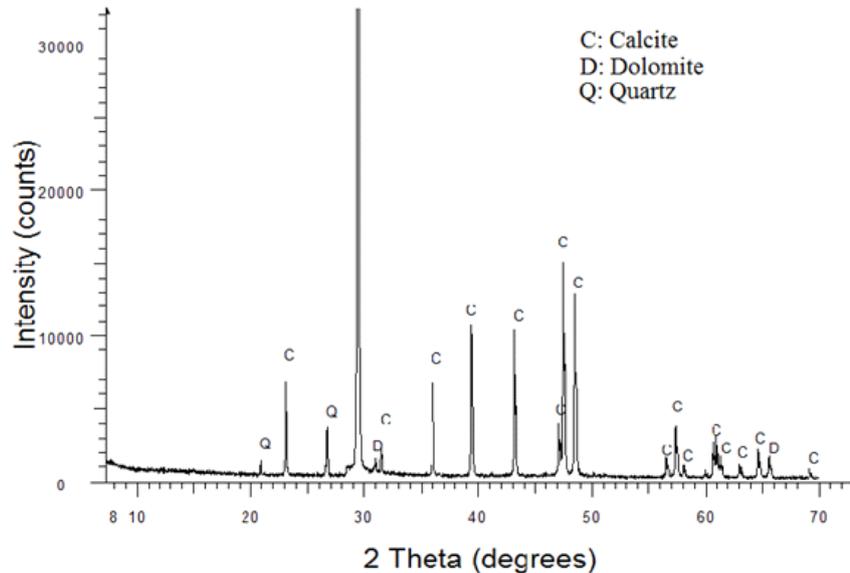
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

2.1. Χαρακτηρισμός λατομικής παιπάλης

Η παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε για να αντικαταστήσει την χαλαζιακή άμμο στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν προέρχεται από το σύστημα ξήρανσης (παιπάλη μαρμάρου ξηραντήρα) της μαρμαρόσκονης από εργοστάσιο παραγωγής έτοιμων κονιαμάτων. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η κοκκομετρική ανάλυση της παιπάλης, ενώ στο Σχήμα 2 φαίνεται η ορυκτολογική της σύσταση. Από το Σχήμα 1 παρατηρείται ότι ένα μεγάλο ποσοστό (περίπου 30%) της παιπάλης είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο ($<20\mu\text{m}$), γεγονός που αυξάνει την απαίτηση του μίγματος σε νερό. Για το λόγο αυτό, η παιπάλη διαχωρίστηκε μέσω αεροταξινόμησης σε δύο κοκκομετρικά κλάσματα ($+65\mu\text{m}$ και $-65\mu\text{m}$) και προέκυψαν τριών διαφορετικών κοκκομετριών τύποι παιπάλης (Σχήμα 1). Στις δοκιμές που έγιναν, χρησιμοποιήθηκε μόνο το χονδροκόκκο κλάσμα της παιπάλης αεροταξινόμησης ($+65\mu\text{m}$). Η ορυκτολογική ανάλυση με βάση το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X (Σχήμα 2) έδειξε ότι το βασικό ορυκτολογικό συστατικό της παιπάλης είναι ο ασβεστίτης σε ποσοστό 96%, ενώ σε μικρότερα ποσοστά εμφανίζονται δολομίτης και χαλαζίας. Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με σύστημα κοκκομετρικής ανάλυσης ακτίνων laser (Malvern Instruments, MastersizerS). Η ορυκτολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (X-Ray Diffraction), χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτόματης περιθλασιμετρίας ακτίνων-X τύπου D8-Advance της εταιρείας Bruker AXS.



Σχήμα 1. Κοκκομετρική ανάλυση παιπάλης.



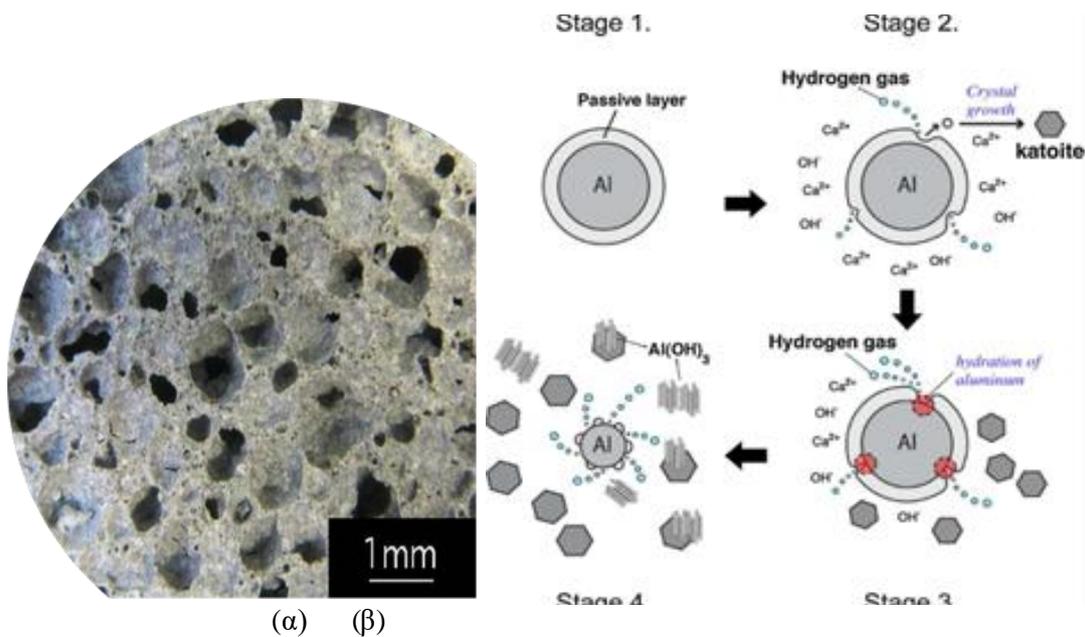
Σχήμα 2. Ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X δείγματος παιπάλης.

2.2. Τσιμέντο - Υδράσβεστος- Σκόνη Al - Χημικά πρόσμικτα

Για την παρασκευή των δοκιμών κυψελωτού σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε λευκό τσιμέντο Portland CEM I 52.5N, η χημική σύσταση του οποίου συμμορφώνεται με το πρότυπο EN 197-1. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ξηρή υδράσβεστος τύπου CL90 η οποία ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του πρότυπου EN 459-1. Για τη διόγκωση των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκε σκόνη αργιλίου (εμπορικός τύπος RO 260) η οποία είναι αναμεμιγμένη σε ποσοστό 10% κ.β. σε σκόνη ασβεστόλιθου. Έχει μέση διάμετρο περίπου 45μm και υψηλή ειδική επιφάνεια (~19000 cm²/g).

Η διόγκωση του σκυροδέματος και η κυψελωτή δομή του (Σχήμα 3α) δημιουργείται από το εκλυόμενο υδρογόνο που παράγεται κατά την αντίδραση της σκόνης Al με το Ca(OH)₂, όπως φαίνεται στην σχέση (1). Ο μηχανισμός της αντίδρασης δημιουργίας υδρογόνου λαμβάνει χώρα σε τέσσερα στάδια (Σχήμα 3β) και περιλαμβάνει την καταστροφή του προστατευτικού στρώματος (passive layer) στην επιφάνεια σκόνης αλουμινίου, το σχηματισμό κρυστάλλων κατοϊτή (katoite), την ενυδάτωση του αργιλίου και την έκλυση υδρογόνου (Kanehira et al., 2013). Μετά την αντίδραση, το διογκωμένο σκυροδέμα μπορεί να σκληρυνθεί υπό υδροθερμικές συνθήκες στους 170-190 °C χρησιμοποιώντας ατμό υψηλής πίεσης (σε αυτόκλειστο) σε σύντομο χρονικό διάστημα ή να σκληρυνθεί σε συνήθη θάλαμο ωρίμανσης, απαιτώντας στην περίπτωση αυτή μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (Kanehira et al., 2013; Hamad, 2014).





Σχήμα 3. (α) Πορώδηςδομήκυψελωτούσκυροδέματος, (β) Μηχανισμός παραγωγής υδρογόνου από την αντίδραση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ με τη σκόνη Al (Kanehira et al., 2013).

Για τη μείωση του απαιτούμενου νερού και την επίτευξη της βέλτιστης ρεολογικής συμπεριφοράς των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκε υπερευστοποιητής πολυκαρβοξυλικής βάσης τύπου Melflux 2651F, σε αναλογία 0.35% κ.β. επί των συνολικών στερεών.

2.3. Μεθοδολογία καθορισμού συνθέσεων και παρασκευή δοκιμών

Η αρχική μελέτη της σύνθεσης των μιγμάτων για την παραγωγή του κυψελωτού σκυροδέματος, βασίστηκε στο μοντέλο στοίβαξης κόκκων (packing model) κατά Andreassen. Με βάση τα αποτελέσματα της αρχικής μελέτης έγινε ο καθορισμός της περιοχής μεταβολής των παραμέτρων του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού Box-Behnken, ενώ για τον καθορισμό της βέλτιστης σύνθεσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των επιφανειών απόκρισης. Το μοντέλο Andreassen είναι κατάλληλο για το σχεδιασμό συνθέσεων στις οποίες συμμετέχουν πολύ λεπτόκοκκα υλικά όπως η παιπάλη. Στον καθορισμό των συνθέσεων με βάση το μοντέλο Andreassen λαμβάνεται υπόψη η σχέση που έχει η πυκνότητα στοίβαξης, δηλαδή ο τρόπος διάστρωσης των κόκκων των αδρανών υλικών στο μίγμα, με τη μηχανική αντοχή του και τη ρεολογία του. Όταν το κυρίαρχο κριτήριο σχεδιασμού είναι η ρεολογική ικανότητα του τελικού μίγματος, τότε απαιτείται αραιότερη πυκνότητα στοίβαξης. Αντίθετα, όταν η κοκκομετρική κατανομή των αδρανών που χρησιμοποιούνται οδηγεί στη μείωση των κενών στο νωπό σκυρόδεμα, τότε επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση των μηχανικών αντοχών του σκληρυμένου τελικού προϊόντος (Fuller and Thompson, 1907; Andreassen and Andersen, 1930).

Σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο Andreassen, η βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση δίνεται από την εξίσωση (1):

$$P = (d^q - d_o^q) / (D^q - d_o^q) \times 100 \quad (1)$$

όπου,

P: το αθροιστικό ποσοστό του υλικού με διάμετρο μικρότερη από d,

D: το μέγιστο μέγεθος κόκκου στο μίγμα,

d_o: το ελάχιστο μέγεθος κόκκου στο μίγμα και

q: ο συντελεστής κατανομής του μεγέθους των κόκκων.

Ο συντελεστής q μπορεί να κυμαίνεται από 0.2 έως 0.37 ανάλογα με την απαιτούμενη ρεολογία του μίγματος. Η τιμή q μικρότερη από 0.23 μπορεί να ληφθεί για μίγματα με υψηλές απαιτήσεις ρευστότητας, ενώ η τιμή q μεγαλύτερη από 0.32 μπορεί να ληφθεί για μίγματα με υψηλότερη πυκνότητα στοιβαξης (Funk et al., 1980; Kumar and Santhanam, 2003; Galetakis et al., 2016).

Λόγω των παραδοχών και των απλοποιήσεων που εισάγονται στο μοντέλο Andreassen (π.χ. δεν λαμβάνεται υπόψη η μορφολογία των κόκκων, κ.ά.), οι εκτιμήσεις του είναι προσεγγιστικές και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μόνο στο αρχικό στάδιο καθορισμού των συνθέσεων. Στη συνέχεια με βάση τις αρχικές αυτές εκτιμήσεις επιλέγονται τα επίπεδα για τις αναλογίες των συστατικών των μιγμάτων στον παραγοντικό πειραματικό σχεδιασμό που ακολουθεί. Για την αποδοτικότερη λειτουργία της πειραματικής διαδικασίας και για να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά ο μεγάλος αριθμός των απαιτούμενων συνθέσεων που πρέπει να διερευνηθούν γίνεται χρήση του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού κατά Box-Behnken. Τα πειραματικά αυτά σχέδια απαιτούν τρία επίπεδα μεταβολής για κάθε παράγοντα (χαμηλό, μεσαίο και υψηλό που συμβολίζονται ως -1, 0 και 1, αντίστοιχα) και χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάπτυξη μοντέλων δεύτερης τάξης όταν γίνεται χρήση των επιφανειών απόκρισης για τη βελτιστοποίηση (Myers and Montgomery, 2002).

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι παράγοντες πειραματικού σχεδιασμού και τα επίπεδα τιμών για τις συνθέσεις που παρασκευάστηκαν, ενώ οι παράμετροι απόκρισης (εξαρτημένες μεταβλητές) φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Συμβολισμός των παραγόντων σχεδιασμού και επίπεδα τιμών.

Παράγοντες σχεδιασμού	Επίπεδα παράγοντα		
	Χαμηλό (-1)	Μεσαίο (0)	Υψηλό (1)
A: (Τσιμέντο + Υδράσβεστος) / Παιπάλη	0.54	0.77	1.00
B: Σκόνη αργιλίου / (Τσιμέντο + Υδράσβεστος)	0.017	0.0235	0.03
C: Υδράσβεστος / Τσιμέντο	0.50	0.75	1.00

Πίνακας 2. Εξαρτημένες μεταβλητές (παράμετροι απόκρισης).

Συμβολισμός	Περιγραφή μεταβλητής
F_c	Αντοχήσεθλίψη (MPa)
d	Πυκνότητα (kg/m^3)
w/b	Λόγος νερού/συνδετικό
λ	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

Ένας πλήρης παραγοντικός πειραματικός σχεδιασμός 3 παραγόντων με 3 επίπεδα πειραματισμού θα οδηγούσε σε 27 (3^3) συνθέσεις, ενώ ο κλασματικός σχεδιασμός Box-Behnken χρησιμοποιώντας ένα υποσύνολο ενός πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού οδηγεί σε 12 συνθέσεις. Για τον υπολογισμό του σφάλματος μέτρησης των μεταβλητών απόκρισης, η σύνθεση στο μεσαίο επίπεδο (0) επαναλαμβάνεται τρεις φορές. Έτσι συνολικά προέκυψαν 15 συνθέσεις (AC1 έως AC15) που δίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Συνθέσεις που παρασκευάστηκαν και οι ιδιότητες των δοκιμίων που μετρήθηκαν.

Σύνθεση	Παράγοντες σχεδιασμού			Συστατικά μιγμάτων				Μετρηθείσες ιδιότητες			
	A	B	C	Ώδράσβεστος (% κ.β.)	Τσιμέντο (% κ.β.)	Παιπάλη (% κ.β.)	Σκόνη AI (% κ.β.)	w/b	d (kg/m ³)	Fc (MPa)	λ (W/m·K)
AC1	0.77	0.0235	0.75	18.45	24.60	55.93	1.02	0.80	830	3.95	0.24
AC2	0.77	0.0235	0.75	18.45	24.60	55.93	1.02	0.80	850	5.53	0.25
AC3	0.77	0.0170	1.00	21.59	21.59	56.08	0.74	0.94	830	4.12	0.24
AC4	0.77	0.0170	0.50	14.39	28.79	56.08	0.74	0.68	870	4.50	0.25
AC5	0.54	0.0170	0.75	14.94	19.91	64.55	0.60	0.92	910	5.80	0.27
AC6	0.77	0.0235	0.75	18.45	24.60	55.93	1.02	0.80	840	4.65	0.24
AC7	0.77	0.0300	1.00	21.47	21.47	55.77	1.29	0.94	860	4.90	0.25
AC8	1.00	0.0235	1.00	24.70	24.70	49.44	1.16	0.96	850	4.51	0.25
AC9	1.00	0.0300	0.75	21.11	28.15	49.26	1.48	0.81	840	4.35	0.24
AC10	0.54	0.0235	1.00	17.39	17.39	64.40	0.82	1.16	890	4.03	0.26
AC11	0.54	0.0235	0.50	11.60	23.18	64.40	0.82	0.81	940	6.11	0.28
AC12	0.77	0.0300	0.50	14.31	28.63	55.77	1.29	0.73	890	6.61	0.26
AC13	1.00	0.0170	0.75	21.24	28.34	49.58	0.84	0.76	900	7.50	0.26
AC14	0.54	0.0300	0.75	14.87	19.83	64.26	1.04	0.93	920	4.95	0.27
AC15	1.00	0.0235	0.50	16.47	32.94	49.43	1.16	0.57	850	6.00	0.25

Η παρασκευή των συνθέσεων έγινε στον εργαστηριακό αναμκτήρα τσιμεντοκονιαμάτων τύπου MATEST mortar mixer E094. Κατά τη διάρκεια της ανάμιξης, έγινε η προσθήκη της απαιτούμενης ποσότητας νερού ώστε το μίγμα να αποκτήσει την επιθυμητή ρευστότητα που μετρήθηκε με τη μέθοδο του μικροκώνου εξάπλωσης (Felekoglou 2007; Galetakis et al., 2016). Στο στάδιο αυτό υπολογίστηκε για κάθε μίγμα ο λόγος νερό/συνδετικό (w/b). Στη συνέχεια το μίγμα χυτεύτηκε σε τριδύμες μεταλλικές πρισματικές μήτρες διαστάσεων 40x40x160 mm³. Κατά τη χύτευση η καθεμία από τις μήτρες γεμίζονταν περίπου μέχρι τη μέση, για να υπάρχει έτσι αρκετός ελεύθερος χώρος για τη διόγκωση των δοκιμίων. Την επόμενη μέρα τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τις μήτρες και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ωρίμανσης (MATEST curing chamber E139). Η ωρίμανση των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος σε θερμοκρασία 20±1 °C και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 28 ημέρες. Ο εργαστηριακός έλεγχος των δοκιμίων περιελάμβανε:

- Μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Fc) σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1.
- Μέτρηση της πυκνότητας (d) σύμφωνα με το πρότυπο EN 99.
- Προσδιορισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) σύμφωνα με τη μέθοδο ακτινικής διάδοσης θερμότητας-radial heat flow method (Zhao et al., 2016).

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων των σκληρυμένων δοκιμίων μετά την ωρίμανση, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων του παραγοντικού σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό στατιστικής επεξεργασίας STATGRAPHICS 5 Plus. Η ανάλυση περιελάμβανε τον υπολογισμό των κύριων επιδράσεων και των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στις παραμέτρους απόκρισης προκειμένου να εντοπιστούν αυτοί με την σημαντικότερη επίδραση. Επιπλέον, η ανάλυση περιελάμβανε την ανάπτυξη πολυωνυμικών μοντέλων 2^{ου} βαθμού για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων σχεδιασμού χρησιμοποιώντας τη

μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης σύμφωνα με τους Myers, 1999 και Myers και Montgomery, 2002.

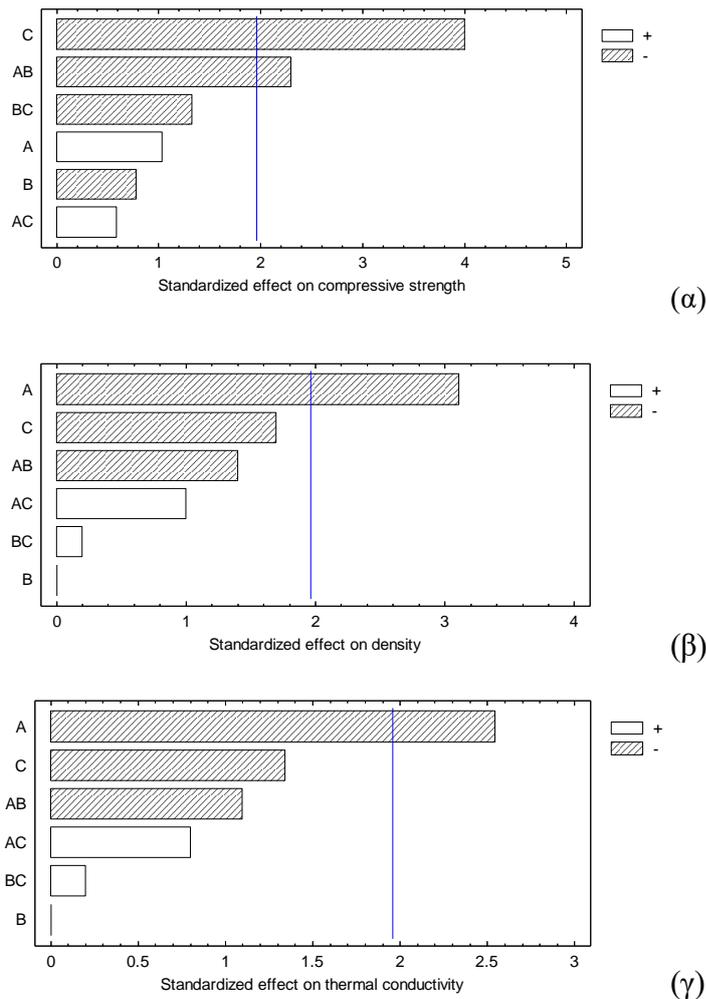
Οι κύριες επιδράσεις και οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων σχεδιασμού στις παραμέτρους απόκρισης υπολογίστηκαν με βάση την τυπική μεθοδολογία ανάλυσης πειραματικών σχεδίων (Myers and Montgomery, 2002). Σύμφωνα με αυτή, η κύρια επίδραση του παράγοντα A (λόγος τσιμέντου και υδρασβέστου προς την παμπάλη) στην αντοχή σε θλίψη (Fc) υπολογίζεται ως η διαφορά των μέσων τιμών της Fc στο υψηλό και στο χαμηλό επίπεδο του παράγοντα A. Αν η κύρια επίδραση διααιρεθεί με το σφάλμα μέτρησης της Fc (υπολογίστηκε σε 0.5MPa) τότε προκύπτει η κανονικοποιημένη τιμή της επίδρασης που χρησιμοποιείται για να κατασκευαστούν τα διαγράμματα Pareto. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται οι επιδράσεις των υπόλοιπων παραγόντων σχεδιασμού στην Fc καθώς και στις άλλες παραμέτρους απόκρισης (d, w/b και λ). Το σφάλματα μέτρησης που υπολογίστηκαν για κάθε μεταβλητή απόκρισης είναι 0.5MPa για την αντοχή σε θλίψη (Fc), 25kg/m³ για την πυκνότητα (d) και 0.01 W/m·K για τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ).

Στατιστικά σημαντικές θεωρούνται οι κανονικοποιημένες τιμές που οι απόλυτες τιμές τους υπερβαίνουν την τιμή 1.96 (το όριο της μπλε γραμμής στο διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην εκάστοτε μεταβλητή). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο επίπεδο βεβαιότητας 95%, που επιλέχθηκε ως ικανοποιητικό για τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές (Standardized effect) των κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού στην αντοχή σε θλίψη, στην πυκνότητα και στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Από τα διαγράμματα Pareto φαίνεται ότι για την αντοχή σε θλίψη (Σχήμα 4α) στατιστικά σημαντικές είναι η επίδραση του παράγοντα C και η αλληλεπίδραση AB, ενώ για την πυκνότητα και τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (Σχήμα 4β και 4γ), στατιστικά σημαντικός είναι ο παράγοντας A. Επιπλέον, από το Σχήμα 4 φαίνεται ότι όλοι οι παράγοντες έχουν την ίδια επίδραση στην πυκνότητα και τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ πυκνότητας και θερμικής αγωγιμότητας (Bourg et al., 2016).

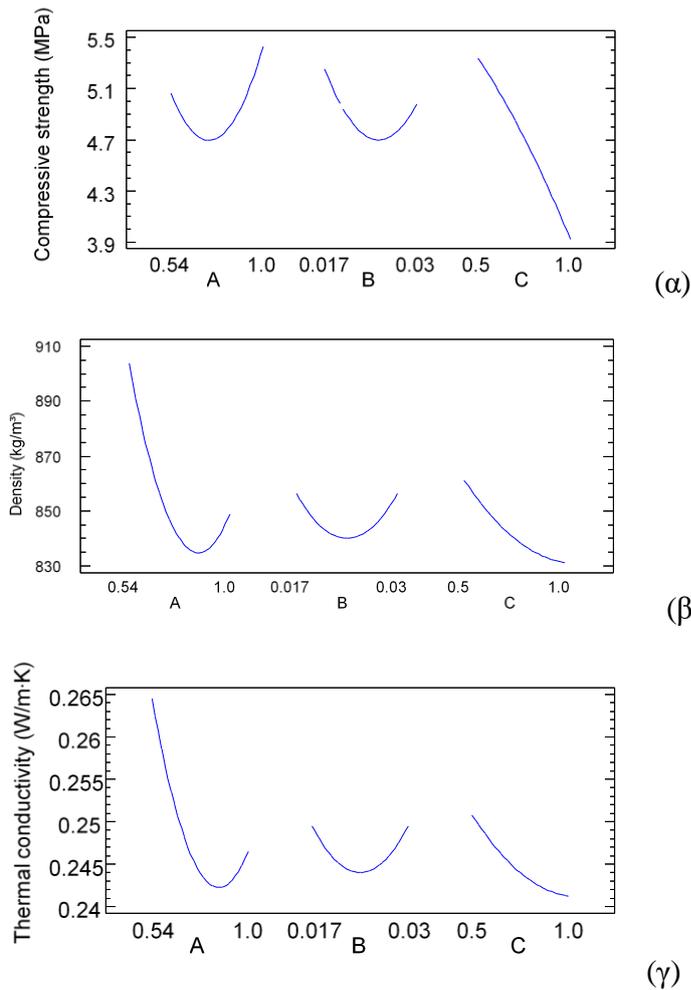
Ο παράγοντας σχεδιασμού B (Σκόνη αργιλίου / (Τσιμέντο + Υδρασβέστος)) δεν φάνηκε να επηρεάζει σημαντικά καμία από τις παραμέτρους απόκρισης (Σχήμα 4). Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι το επίπεδο πειραματισμού που επιλέχθηκε για τον παράγοντα B (0.017 - 0.03) είναι υψηλό με αποτέλεσμα τα μίγματα που παρασκευάστηκαν να έχουν επαρκή ποσότητα σκόνης αργιλίου και η παραγωγή του διογκωτικού αερίου (υδρογόνο) να εξαρτάται κυρίως από τη συγκέντρωση του Ca(OH)₂ που σχετίζεται με την περιεκτικότητα του μίγματος σε τσιμέντο και υδρασβέστο.

Όσον αφορά τη συνδυασμένη επίδραση (αλληλοεπιδράσεις) των παραγόντων σχεδιασμού A, B και C στην αντοχή σε θλίψη, στην πυκνότητα και στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας φαίνεται ότι η αλληλεπίδραση AB σε όλες τις μετρούμενες παραμέτρους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις αλληλεπιδράσεις BC και AC.



Σχήμα 4. Διάγραμμα Pareto για τις κανονικοποιημένες τιμές των επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού (α) στην αντοχή σε θλίψη, (β) στην πυκνότητα και (γ) στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Α:(Τσιμέντο + Υδράσβεστος) / Παιπάλη, Β:Σκόνη αργιλίου / (Τσιμέντο +Υδράσβεστος) και C:Υδράσβεστος / Τσιμέντο.

Το Σχήμα 5 περιγράφει τη μεταβολή της αντοχής σε θλίψη (Σχήμα 5α), της πυκνότητας (Σχήμα 5β) και του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (Σχήμα 5γ) ως συνάρτηση των παραγόντων σχεδιασμού Α, Β και C. Παρατηρείται ότι ο παράγοντας C επηρεάζει σημαντικά την αντοχή σε θλίψη, ενώ οι παράγοντες Α και Β έχουν μικρότερη επίδραση. Ο παράγοντας Α επηρεάζει σημαντικά την πυκνότητα και τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ενώ η επίδραση του παράγοντα Β και του παράγοντα C στις παραμέτρους αυτές είναι μικρή. Η επίδραση των παραγόντων Α και Β στις μετρούμενες παραμέτρους απόκρισης είναι μη γραμμική, ενώ του παράγοντα C παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση από τη γραμμικότητα.



Σχήμα 5. Διαγράμματα μεταβολής(α) της αντοχής σε θλίψη, (β) της πυκνότητας και (γ) του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ως συνάρτηση των παραγόντων A, B και C. A: (Τσιμέντο + Υδράσβεστος) / Παιπάλη, B: Σκόνη αργιλίου / (Τσιμέντο +Υδράσβεστος) και C: Υδράσβεστος / Τσιμέντο.

3.1.Βελτιστοποίηση συνθέσεων με χρήση της μεθοδολογίας επιφανειών απόκρισης

Η μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης (ResponseSurfaceMethodology-RSM) αποτελείται από μια σειρά στατιστικών και μαθηματικών εργαλείων, που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη μιας κατάλληλης σχέσης (μοντέλο) που συνδέει τους παράγοντες σχεδιασμού x_i με μια παράμετρο απόκρισης y . Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών των x_i που οδηγούν στη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση της y (ανάλογα με τη φύση του προβλήματος) σε μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι τα πολυωνμικά μοντέλα πρώτου και δεύτερου βαθμού.

Λαμβάνοντας υπόψη την μη γραμμική μεταβολή των παραμέτρων απόκρισης σε σχέση με την αλλαγή των παραγόντων σχεδιασμού (Σχήμα 5) υπολογίστηκαν πολυωνμικά μοντέλα 2^{ου} βαθμού για να περιγράψουν τη συσχέτιση των παραγόντων σχεδιασμού (A, B και C) με τις παραμέτρους απόκρισης (F_c , d_{kai} λ). Τα πολυωνμικά μοντέλα που υπολογίστηκαν δίνονται στις εξισώσεις (2)-(4), ενώ για κάθε μοντέλο υπολογίστηκε ο συντελεστής προσαρμογής R.

$$F_c = 8.18193 - 7.66121A - 22.2633B + 1.98324C + 10.1134A^2 - 384.615AB + 2.56522AC + 9585.8B^2 - 204.615BC - 1.32C^2 (R=0.71)$$

(2)

$$d = 1592.85 - 1062.82A - 10217.4B - 413.545C + 685.255A^2 - 11705.7AB + 217.391AC + 384615B^2 + 1538.466BC + 100C^2 (R=0.85)$$

(3)

$$\lambda = 0.491612 - 0.339632A - 3.74711B - 0.135027C + 0.217391A^2 - 3.67893AB + 0.0695652AC + 130.178B^2 + 0.615385BC + 0.032C^2 (R=0.93)$$

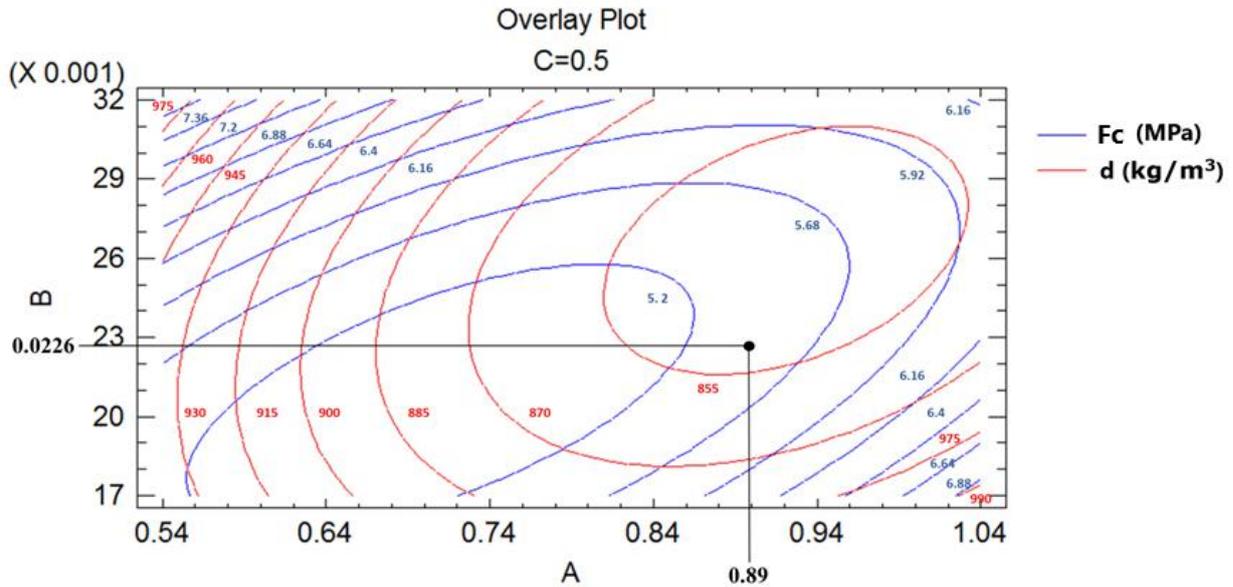
(4)

όπου: $A \in [0.54 \ 1.00]$, $B \in [0.017 \ 0.03]$ και $C \in [0.50 \ 1.00]$

Οι τιμές του R που υπολογίστηκαν κυμαίνονται από 0.71 έως 0.93 και χαρακτηρίζονται ικανοποιητικές. Κατά συνέπεια οι εξισώσεις (2) έως (4) θεωρείται ότι μπορούν να περιγράψουν με ικανοποιητική ακρίβεια την εξάρτηση των F_c , d και λ από τους παράγοντες A, B και C και να χρησιμοποιηθούν για την βελτιστοποίηση των συνθέσεων. Τυπικά παραδείγματα απλών βελτιστοποιήσεων είναι ο υπολογισμός των τιμών των A, B και C που μεγιστοποιούν την F_c ή ελαχιστοποιούν την d ή τον λ . Στην περίπτωση βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών απόκρισης (όπως π.χ. ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της F_c και ελαχιστοποίηση της d) ο προσδιορισμός των τιμών των παραγόντων σχεδιασμού A, B και C που επιτυγχάνουν τη βελτιστοποίηση αυτή, είναι ένα πιο περίπλοκο πρόβλημα. Μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές που χρησιμοποιείται στην βελτιστοποίηση στις περιπτώσεις αυτές είναι εκείνη που βασίζεται στη χρησιμοποίηση της συνάρτησης της επιθυμητής τιμής (desirability function). Με την τεχνική αυτή υπολογίζονται οι τιμές των παραγόντων σχεδιασμού που οδηγούν στις πιο «επιθυμητές» τιμές των παραμέτρων απόκρισης (Derringer and Suich, 1980).

Όταν ο αριθμός των παραμέτρων απόκρισης είναι μικρός, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαγράμματα (βασίζονται στα πολυωνμικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν) που επιλύουν γραφικά το πρόβλημα της βελτιστοποίησης (Galetakis et al, 2016). Τα διαγράμματα αυτά επιτρέπουν και το σχεδιασμό μιγμάτων με προκαθορισμένες τιμές των F_c , d και λ .

Στο Σχήμα 6, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που δείχνει τον τρόπο σχεδιασμού μίγματος για παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης με αντοχή σε $F_c = 5.5$ MPa και πυκνότητα $d = 850$ kg/m³. Στο Σχήμα 6 δίνεται σε μορφή ισοκαμπυλών η μεταβολή της F_c και της d συναρτήσει των παραμέτρων σχεδιασμού A και B για το χαμηλό επίπεδο το C (0.5). Αντίστοιχες ισοκαμπύλες μπορούν να κατασκευαστούν και για το μεσαίο και υψηλό επίπεδο του παράγοντα C. Οι ισοκαμπύλες αυτές σχεδιάζονται με βάση τις πολυωνμικές σχέσεις (2) και (3) που υπολογίστηκαν παραπάνω. Στο Σχήμα 6 με μαύρο μικρό κύκλο απεικονίζεται το σημείο που αντιστοιχεί σε μίγμα με αντοχή σε θλίψη $F_c = 5.5$ MPa και πυκνότητα $d = 850$ kg/m³. Από τις τιμές της τετμημένης και τεταγμένης του σημείου αυτού προκύπτει ότι οι τιμές των παραγόντων σχεδιασμού είναι $A = 0.89$ και $B = 0.0226$.



Σχήμα 6. Ισοκαμπύλες μεταβολής της F_c και της d συναρτήσει των παραμέτρων σχεδιασμού A και B (για το χαμηλό επίπεδο του C) και υπολογισμός των παραγόντων σχεδιασμού που αντιστοιχούν σε μίγμα με αντοχή σε θλίψη $F_c=5.5$ MPa και πυκνότητα $d=850$ kg/m³.

Για την επιβεβαίωση της μεθοδολογίας που περιγράφεται, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4, παρασκευάστηκε μια επιπλέον σύνθεση κυψελωτού σκυροδέματος (AC16), ενώ μετρήθηκε (όπως περιγράφεται στην ενότητα II) η αντοχή σε θλίψη και η πυκνότητα των παραγόμενων δοκιμίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών (Πίνακας 4), η διαφορά μεταξύ των τιμών σχεδιασμού και των τιμών που μετρήθηκαν βρίσκεται στην περιοχή του σφάλματος μέτρησης (0.5 MPa για την F_c και 25 kg/m³ για την d), γεγονός που επιβεβαιώνει τη ορθότητα της μεθοδολογίας σχεδιασμού.

Πίνακας 4. Παράμετροι σχεδιασμού και αποτελέσματα των δοκιμών επιβεβαίωσης της μεθοδολογίας.

Σύνθεση	Τιμές σχεδιασμού		Μετρηθείσες τιμές	
	F_c , MPa	d , kg/m ³	F_c , MPa	d , kg/m ³
AC16	0.89	0.0226	0.5	0.0226
			5.5	850
			5.9	840

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μεθοδολογία σύνθεσης μιγμάτων για παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος φυσικής σκλήρυνσης με προκαθορισμένες ιδιότητες που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, αποτελεί μια ενδιαφέρουσα ερευνητική κατεύθυνση για την αξιοποίηση λεπτομερών παραπροϊόντων της λατομικής και κατασκευαστικής βιομηχανίας. Ο συνδυασμός του παραγοντικού σχεδιασμού Box-Behken και των επιφανειών απόκρισης επιτρέπει τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη διόγκωση των μιγμάτων και καθορίζουν άμεσα τις ιδιότητες του παραγόμενου κυψελωτού σκυροδέματος. Ταυτόχρονα καθιστά εφικτό το σχεδιασμό συνθέσεων με προκαθορισμένες ιδιότητες που ενδιαφέρουν όπως, η αντοχή σε θλίψη, η πυκνότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων του παραγοντικού σχεδιασμού που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και αφορούσε τη σύνθεση μιγμάτων για παραγωγή κυψελωτού σκυροδέματος με χρήση λατομικής παιπάλης, έδειξε ότι ο λόγος υδράσβεστος/τσιμέντο έχει στατιστικά σημαντική επίδραση στην αντοχή σε θλίψη, ενώ ο λόγος (τσιμέντο+υδράσβεστος)/παιπάλη επηρεάζει σημαντικά την πυκνότητα και τη θερμική αγωγιμότητα των παραγόμενων δοκιμίων.

Ο σχεδιασμός σύνθεσης με προκαθορισμένες τιμές αντοχής σε θλίψη και πυκνότητας επιβεβαιώθηκε με επιπρόσθετες δοκιμές. Η διαφορά μεταξύ των τιμών σχεδιασμού και των τιμών που μετρήθηκαν βρίσκεται στην περιοχή του σφάλματος μέτρησης, γεγονός που επιβεβαιώνει τη ρηθότητα της μεθοδολογίας σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andreassen A.H.M. and Andersen J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten), *Kolloid-Zeitschrift*, 50 (1930) 217-228.
- Bourret J., Tessier-Doyen N., Naït-Ali B., Penneç F., Alzina A., Peyratout C.S. and Smith D.S. Effect of the Pore Volume Fraction on the Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Kaolin-Based Foams, *J Eur Ceram Soc*, 33 (2013) 1487-1495.
- Derringer G. and Suich R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables, *J Qual Technol*, 12:4 (1980) 214-219.
- Driscoll K.E. and Guthrie G.D. Crystalline Silica and Silicosis, *Comprehensive Toxicology (Second Edition)*, 8 (2010) 331-350.
- Felekoglou B. Effects of PSD and Surface Morphology of Micro-Aggregates on Admixture Requirement and Mechanical Performance of Micro-Concrete, *Cem Concr Compos*, 29:6 (2007) 481-489.
- Fuller W.B. and Thompson S.E. The Laws of Proportioning Concrete, *Am Soc Civ Eng J Transp*, 59 (1907) 67-143.
- Funk J.E., Dinger D.R. and Funk J.E. Jr. Coal Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content, Final Report, Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO), New York, (1980).
- Galetakis M., Alevizos G. and Leventakis K. Evaluation of Fine Limestone Quarry By-Products, For the Production of Building Elements - An Experimental Approach. *Constr Build Mater*, 26 (2012) 122-130.
- Galetakis M., Piperidi C., Alevizos G., Stiakakis E., Komnitsas K., Soultana A. and Vasileiou A. Experimental Investigation of The Utilization of Quarry Dust for The Production of Microcement - Based Building Elements by Moulding Casting. *Constr Build Mater*, 107 (2016) 247-254.
- Hamad A.J. Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review, *Int J Mater Sci Eng*, 2 (2014) 152-157.
- Kanehira S., Kanamori S., Nagashima K., Saeki T., Visbal H., Fukui T. and Hirao K. Controllable Hydrogen Release via Aluminum Powder Corrosion in Calcium Hydroxide Solutions, *J As Ceram Soc*, 1 (2013) 296-303.
- Kumar S.V. and Santhanam M. Particle Packing Theories and Their Application in Concrete Mixture Proportioning: A Review. *Indian Concr J*, 77 (2003) 1324-1331.
- Myers R.H. and Montgomery D.C. Response Surface Methodology: Product and Process Optimization Using Designed Experiments, 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, (2002).

- Myers R.H. Response Surface Methodology – Current Status and Future Directions (with discussion). J Qual Technol, 31 (1999) 30-44.
- Narayanan N. and Ramamurthy K. Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review. Cem Concr Compos, 22 (2000) 321-329.
- Normohammadi M., Kakooei H., Omid L., Yari S. and Alimi R. Risk Assessment of Exposure to Silica Dust in Building Demolition Sites. Saf Health Work, 7:3 (2016) 251-255.
- Zhao D., Qian X., Gu X., Jajja S.A. and Yang R. Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials, J Electron Packag, 138:4 (2016) 040802.

Ανάπτυξη ελαφροσκυροδέματος με χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων

Μ.Χ. Στρατουρά^(1,2), Γ-Ε.Δ. Λάζαρη⁽²⁾, Μ.Γ. Νομικού⁽³⁾, Ε.Γ. Μπαδογιάννης⁽²⁾, Ε.Γ. Παπαδάκης⁽¹⁾

⁽¹⁾ Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Γεωργίου Σεφέρη 2, 30100, Αγρίνιο

⁽²⁾ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773, Αθήνα

⁽³⁾ ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ, Ελληνικό Κέντρο Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΕΚΕΤΣ), Λεωφόρος Ιωνίας 122, 13671, Αθήνα

Λέξεις-κλειδιά: ανθεκτικότητα, βιομηχανικά παραπροϊόντα, διείσδυση χλωριόντων, ελαφροσκυρόδεμα, κίσηρης, περλίτης, πορώδες, τέφρα φλοιού ρυζιού, τριχοειδής απορρόφηση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο κύριος στόχος της παρούσης ερευνητικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ελαφροσκυροδέματος με αδρανή που αποτελούν βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως υπόλειμμα εξόρυξης περλίτη στο κόσκινο 2 mm και τέφρα φλοιού ρυζιού καθώς και η μελέτη παραμέτρων που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα του. Για το σκοπό αυτό παρασκευάζονται συνθέσεις ίδιας κατηγορίας αντοχής (LC28/30) και πυκνότητας (D1.6) και συγκρίνονται, όσον αφορά στην ανθεκτικότητα τους, με συνθέσεις συμβατικών ελαφροαδρανών όπως το κίσηρόδεμα. Έτσι, μελετώνται παράμετροι ανθεκτικότητας όπως η υδατοαπορροφητικότητα λόγω τριχοειδούς απορρόφησης, το ανοικτό πορώδες και η διαπερατότητα σε χλωριόντα, μέσω του υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μεταβατικής κατάστασης, σύμφωνα με το πρότυπο NT BUILD 492. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, καταγράφεται διαφορετική κατάταξη των συνθέσεων ως προς τις παραπάνω παραμέτρους ανθεκτικότητας, με τα σκυροδέματα από περλίτη και τέφρα φλοιού ρυζιού να εμφανίζονται ανθεκτικότερα ως προς τις περισσότερες από αυτές.

Development of lightweight concrete by using industrial by-products

M.Ch. Stratoura^(1,2), G-E.D. Lazari⁽²⁾, M.G. Nomikou⁽³⁾, E.G. Badogiannis⁽²⁾, V.G. Papadakis⁽¹⁾

⁽¹⁾ University of Patras, Department of Environmental Engineering, 2 Georgiou Seferi St., 30100, Agrinio

⁽²⁾ National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, 9 Iroon Polytechniou str., 15773, Athens

⁽³⁾ AGET HERACLES, Group of Companies, Hellenic Concrete Technology Center (HCTC), 122 Ioanias Avenue, 13671, Athens

Keywords: capillary absorption, chloride penetration, durability, industrial by-products, lightweight concrete, perlite, porosity, pumice, rice husk ash.

ABSTRACT: The main aim of this study is to develop lightweight concrete, with aggregates which are industrial by-products such as run of mine (ROM) perlite 2 mm screen residue and rice husk ash and, additionally to study their durability's parameters. For that reason, different mixtures of lightweight concrete have been produced with the similar compressive strength class (LC28/30) and density (D1.6), and have been compared concerning their durability with mixtures of pumice lightweight aggregates. The durability characteristics were investigated by water absorption, due to capillary absorption, porosity and chloride penetration, estimating non-state chloride migration coefficient according to NT BUILD 492. The analysis of the test results leads to the conclusion, that the use of lightweight aggregates, such as pumice and perlite, gives satisfactory strengths. According to the experimental results, a different classification concerning the durability's parameters of concrete mixtures is recorded, with perlite and rice husk ash concrete mixtures to be of enhanced durability.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στρατηγική του αειφόρου σχεδιασμού, συνομολογημένη από τις απαιτήσεις των κανονισμών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, έχει τρεις βασικούς άξονες βιώσιμης ανάπτυξης: την οικονομία, την κοινωνία και το περιβάλλον. Το σχέδιο δράσης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής θέτει στόχους για τη δημιουργία νέων ισχυρών κοινών αξιών, υπογραμμίζοντας την ανάγκη μετάβασης σε μια «κυκλική» οικονομία, συμπεριλαμβανομένης της κυκλικής βιοοικονομίας. Απαραίτητη προϋπόθεση για να συνεχίσει να αναπτύσσεται η κοινωνία και να εξασφαλίζεται η επάρκεια φυσικών πόρων, η σταθερότητα και η διάρκεια, είναι να ακολουθηθεί ένα νέο οικονομικό μοντέλο ανάπτυξης, στο πλαίσιο του οποίου γίνεται επαναχρησιμοποίηση των πόρων σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό. Επιπλέον, αν μειωθούν στο μηδέν τα απόβλητα, θα μειωθεί σημαντικά και η ανάγκη για την άντληση νέων πόρων, η οποία και φέρει μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος.

Είναι δεδομένη η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στον οικολογικό σχεδιασμό κτιρίων, με Σχεδόν Μηδενική Κατανάλωση Ενέργειας και ταυτόχρονα ανθεκτικών στο χρόνο, με την αειφόρο ανάπτυξη. Μόνο κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να δημιουργηθεί ένα σύνολο, λειτουργικά άρτιο και περιβαλλοντικά βιώσιμο. Σε αυτό το πλαίσιο, η τεχνολογική ανάπτυξη και εφαρμογή του Ελαφροσκυροδέματος, με τη χρήση των βιομηχανικών παραπροϊόντων, εκτιμάται ότι θα συμβάλει στην αναβάθμιση και στην περαιτέρω ανάπτυξη της βιομηχανίας παραγωγής σκυροδέματος, καθιστώντας την βασικό πυλώνα βιώσιμης ανάπτυξης, που θα ανταποκριθεί στις διαρκώς αυξανόμενες τεχνικές απαιτήσεις των νέων κατασκευών.

Πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόβλημα της ανθεκτικότητας θεωρείται σήμερα από τη διεθνή κοινότητα των μηχανικών ως το υπ' αριθμόν ένα επιστημονικό και πρακτικό πρόβλημα του σκυροδέματος καθώς αποτελεί καθοριστικό παράγοντα, για τη διάρκεια ζωής όλων των κατασκευών [1,2]. Είναι γνωστό μάλιστα ότι η διάβρωση του χάλυβα αποτελεί το σημαντικότερο πρόβλημα ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος. Η πλειονότητα των περιπτώσεων φθοράς σκυροδέματος σχετίζεται με την διάβρωση του οπλισμού, η οποία εισάγεται κυρίως μέσω της ενανθράκωση του σκυροδέματος (δράση CO₂ της ατμόσφαιρας) ή/και της διείδυσης χλωριόντων [3,4].

Ο φλοιός ρυζιού αποτελεί το 20% του αρχικού βάρους του ρυζιού και είναι ένα από τα σημαντικότερα παραπροϊόντα της βιομηχανίας παραγωγής ρυζιού. Η παγκόσμια παραγωγή ρυζιού, ανέρχεται στους 700 εκατ. τόνους ακατέργαστου ρυζιού ετησίως, ενώ η παραγωγή σε φλοιό ρυζιού ανέρχεται σε περίπου 140 εκατ. τόνους [5]. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου ετήσιας παραγωγής, χρήζει άμεσης και επιτακτικής ανάγκης η ορθή διαχείριση και αξιοποίηση των φλοιών ρυζιού για περιβαλλοντικούς λόγους περιστολής ενεργειακού αποτυπώματος. Η τέφρα φλοιών ρυζιού (rice husk ash, RHA) είναι το στερεό, γεωργικό, βιομηχανικό παραπροϊόν, που προκύπτει από την καύση των φλοιών ρυζιού. Η RHA έχει ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία την καθιστούν πολύ ελκυστική για αξιοποίηση σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς. Στα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, η λεπτότητά της και η υψηλή περιεκτικότητά της σε άμορφο πυρίτιο, που μπορεί να υπερβαίνει το 90% [6,7]. Η RHA, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο υλικό στην παραγωγή τσιμέντου/σκυροδέματος, καθώς εμφανίζει σημαντικές ποζολανικές ιδιότητες. Ο Kartini [8], υποστηρίζει, ότι η RHA είναι ένα ποζολανικό υλικό, με ευεργετικά αποτελέσματα στην αντοχή του σκυροδέματος.

Ο περλίτης είναι φυσική ηφαιστειακή ύαλος που σχηματίζεται με την απότομη ψύξη – στερεοποίηση ηφαιστειακής λάβας, κατά την οποία παγιδεύεται νερό στη μάζα της σε ποσοστά 1-5%. Στην Ελλάδα η παραγωγή ακατέργαστου ορυκτού περλίτη ανέρχεται στους 764.000 τόνους [9]. Πρόκειται για ένα βιομηχανικό προϊόν που παράγεται με αμελητέα επίδραση στο περιβάλλον, γεγονός που τον καθιστά χρήσιμο προϊόν, υψηλής προστιθέμενης αξίας [10]. Σε πρόσφατες ερευνητικές εργασίες, αναφέρεται ότι το ελαφροσκυρόδεμα με

υπόλειμμα εξόρυξης περλίτη στο κόσκινο 2 mm, εμφανίζει ανταγωνιστικές του συμβατικού ιδιότητες, ως αποτέλεσμα της πληρωτικής δράσης (filler effect) του λεπτόκοκκου περλίτη αλλά και της εκδήλωσης με την πάροδο του χρόνου του ποζολανικού του δυναμικού [1,11]. Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα αξιοποίησης των ανωτέρω βιομηχανικών παραπροϊόντων για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό αξιολογούνται φυσικομηχανικές ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος και διερευνώνται παράμετροι ανθεκτικότητας, όπως η υδατοαπορροφητικότητα, η τριχοειδής απορρόφηση και η διείδυση χλωριόντων.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ

2.1 Υλικά και σύνθεση ελαφροσκυροδέματος

Παράχθηκαν τέσσερις (4) διαφορετικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος και μία (1) σύνθεση αναφοράς συμβατικού σκυροδέματος (REF). Σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο (C) τύπου CEM I 42.5R, με τη χημική ανάλυση που δίνεται στον **Πίνακα 1**. Η ποσότητα του τσιμέντου και ο λόγος νερού προς τσιμέντο (w/c) διατηρήθηκαν σταθερά για κάθε σύνθεση, ήτοι 400 kg/m^3 και 0.40, αντίστοιχα. Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος ήταν κίσσηρης (Pu), ακατέργαστος περλίτης (Pe) και RHA (R). Χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, ασβεστολιθικά αδρανή (Ca), συγκεκριμένα άμμος, ριζάκι και γαρμπίλι. Στον **Πίνακα 1**, δίνεται η χημική ανάλυσή των αδρανών (κίσσηρης, περλίτης και RHA). Τέλος, για την παρασκευή των μειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ειδικά χημικά πρόσμικτα σκυροδέματος, όπως επιβραδυντής Plastiment 20R (PL) και ρευστοποιητής, (SP) Sika® Viscocrete superplasticizer. Η ποσότητά τους μεταβαλλόταν ανάλογα έτσι ώστε να επιτευχθεί κατηγορία κάθισης S3. Πριν την ανάμιξη τα αδρανή είχαν έρθει σε κατάσταση κορεσμού, προκειμένου να διευκολυνθεί η εργασιμότητα του μείγματος κατά την παρασκευή του ελαφροσκυροδέματος. Στον **Πίνακα 2**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν, ενώ στο **Σχήμα 1** φαίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του μείγματος αδρανών, όπως προέκυψε από τη μελέτη σύνθεσης. Από κάθε σύνθεση σκυροδέματος λήφθηκαν κυβικά δοκίμια, ακμής 100 mm, για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη και κυλινδρικά δοκίμια $\varnothing 100 \times 200 \text{ mm}$, με σκοπό την εκτέλεση των δοκιμών, που αφορούσαν στις ιδιότητες ανθεκτικότητας. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η παρασκευή των μειγμάτων και η πειραματική διερεύνηση έλαβε χώρα στο Εργαστήριο του ΕΚΕΤΣ του ομίλου ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ και στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.).

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση συστατικών σκυροδέματος (% κ.β.).

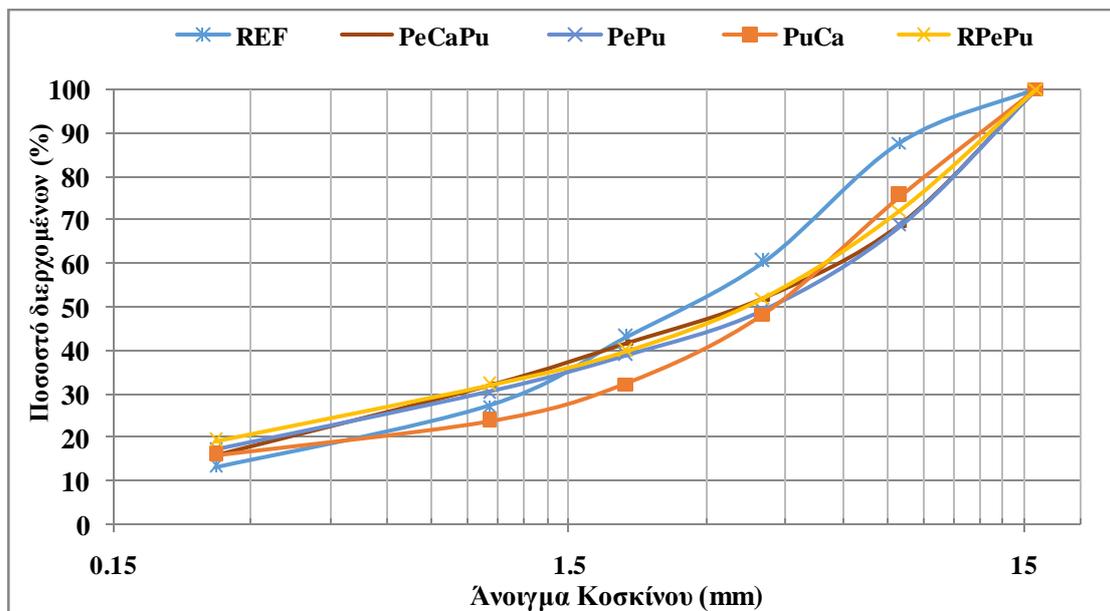
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I.
C	18.9	5.21	3.27	62.4	2.19	3.63	0.51	0.38	0.34	0.09	2.90
Pu	68.2	11.8	1.15	4.09	0.44	-	4.00	2.76	0.12	0.03	7.37
Pe	73.8	12.9	1.00	1.40	0.25	-	3.49	4.49	-	-	2.59
RH	90.5	0.08	0.45	1.22	0.48	-	0.84	0.66	-	-	5.66
A	9										

2.2 Πειραματικές Μέθοδοι

Συνολικά τρία (3) κυβικά δοκίμια σκυροδέματος παρασκευάστηκαν και εξετάστηκαν στις 28 ημέρες, με αποτέλεσμα να προκύψει η μέση τιμή των θλιπτικών αντοχών. Η ανθεκτικότητα των μειγμάτων ελαφροσκυροδέματος αξιολογήθηκε με βάση την υδατοαπορροφητικότητα και την ανθεκτικότητα διείσδυσης χλωριόντων, σε δείγματα που συντηρήθηκαν για 28 ημέρες στο νερό. Το ανοιχτό πορώδες (open porosity) OP (%) του σκυροδέματος ελέγχθηκε σε κυλινδρικό δοκίμιο, Ø100 x 50 mm [12]. Με τη χρήση όμοιου κυλινδρικού δοκιμίου πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός της τριχοειδούς απορρόφησης, με σκοπό την εκτίμηση της απορροφητικότητας (sorptivity) μέσω τριχοειδών πόρων S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) του σκυροδέματος [13]. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς των χλωριόντων (chloride migration coefficient) επιλέχθηκε η επιταχυνόμενη δοκιμή NordTest Build 492 [14], η οποία βασίζεται σε μέθοδο που είχαν αναπτύξει προγενέστερα οι Tang and Nilsson [15]. Για τον προσδιορισμό του βάθους διείσδυσης χλωριόντων εφαρμόζεται χρωματογραφική μέθοδος [16].

Πίνακας 2. Περιεκτικότητα συστατικών των συνθέσεων σκυροδέματος (kg/m^3).

Συστατικό	Κωδικός Σύνθεσης				
	REF	PeCaPu	PuCa	PePu	RPePu
C	400	400	400	400	400
Ca	1884	55	51	-	-
Pu	-	435	961	843	101
Pe	-	546	-	149	804
R	-	-	-	-	101
PL	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
SP	6.0	4.2	3.6	3.6	4.4
w/c	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40



Σχήμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση μείγματος αδρανών των συνθέσεων σκυροδέματος.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ, ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στον **Πίνακα 3**, παρουσιάζονται οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (κάθιση, πυκνότητα και η % περιεκτικότητα σε αέρα) και του σκληρυμένου σκυροδέματος (θλιπτική αντοχή 28 ημερών) για όλες τις συνθέσεις, όπως προέκυψαν πειραματικά. Ο **Πίνακας 4** συνοψίζει τις τιμές όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας 28 ημερών (ανοικτό πορώδες, τριχοειδή απορρόφηση και συντελεστή διείδυσης χλωριόντων) που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3**, η προσθήκη ελαφρών αδρανών επηρεάζει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή, καθώς παρατηρείται μείωση της, εν συγκρίσει με αυτήν του συμβατικού σκυροδέματος. Η μείωση της θλιπτικής αντοχής στις συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος εξαρτάται από τον τύπο των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν και το ποσοστό τους στο μείγμα. Αρκετοί ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι η θλιπτική αντοχή μειώνεται με τη μείωση της πυκνότητας, καθώς αυξάνεται το ποσοστό των ελαφρών αδρανών στο σκυρόδεμα [1,17]. Οι Vargas et al [18], αναφέρουν ότι οι ρωγμές που προκαλούνται από τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη στο ελαφροσκυρόδεμα, διασχίζουν τα ελαφρά αδρανή, ενώ στο συμβατικό σκυρόδεμα οι ρωγμές διασχίζουν την διεπιφάνεια των αδρανών και της πάστας. Προηγούμενες έρευνες αναφέρουν ότι τα ποζολανικά υλικά δεν έχουν σημαντική ποζολανική δράση σε πρώιμες ηλικίες, γεγονός που οφείλεται εν μέρει στη χαμηλή περιεκτικότητα σε διαθέσιμο υδροξείδιο του ασβεστίου [19,20], συνεπώς, τα ελαφρά αδρανή δεν θα μπορούσαν να ενισχύσουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά, αλλά και την μικροδομή του ΕΣ σε πρώιμες ηλικίες της σκλήρυνσης, λόγω του αργού ρυθμού της ποζολανικής αντίδρασης [11]. Στην περίπτωση χρήσης RHA ως αδρανές, ορισμένοι ερευνητές αναφέρουν πως η συμβολή της RHA στην ανάπτυξη αντοχών έχει μικρότερη επίδραση [21]. Στην έρευνα τους οι Litos et al [22], αναφέρουν πως η χρήση λεπτοαλεσμένης RHA, συμβάλει ευεργετικά στη πλήρωση των πόρων και τη βελτίωση της μικροδομής του ΕΣ, καθώς πρόκειται για υλικό με υψηλές ποζολανικές ιδιότητες. Στην παρούσα εργασία, καθώς η RHA χρησιμοποιείται ως αδρανές, δεν παρατηρήθηκαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα για την ηλικία των 28 ημερών. Πιθανόν, η RHA σε αυτές τις πρώιμες ηλικίες να διαθέτει μικρή ως ασήμαντη ποζολανικότητα. Επιπρόσθετα, όταν η RHA αντικαθιστά αδρανή, δεν παρέχεται η δυνατότητα ομοιόμορφης κατανομής της στη μάζα του σκυροδέματος, οπότε και η ομοιόμορφη αντίδραση της με το τσιμέντο. Έτσι δεν δημιουργούνται παντού θέσεις πυρήνωσης στην πάστα του τσιμέντου και δεν αξιοποιείται κατάλληλα το ποζολανικό της δυναμικό για τον σχηματισμό περισσώτερου C-S-H, το οποίο ως γνωστόν συμβάλει σημαντικά στην βελτίωση της δομής του σκυροδέματος [23,24].

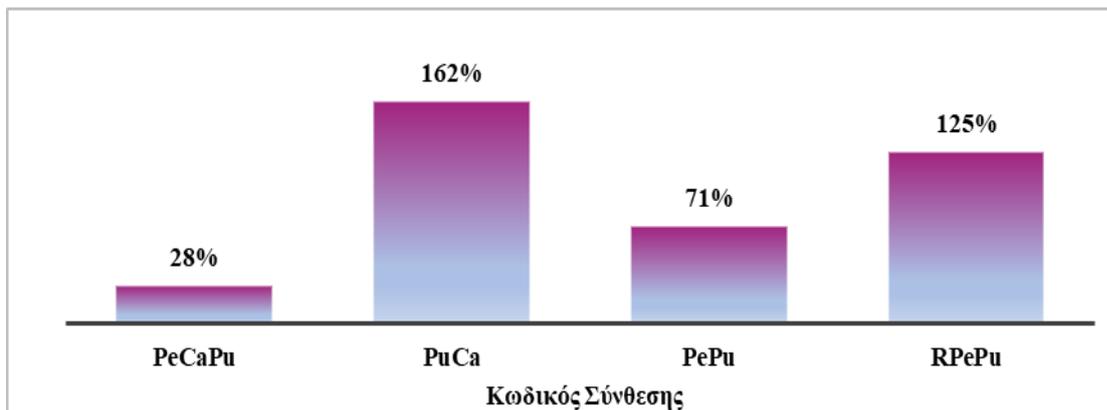
Πίνακας 3. Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Κωδικός Σύνθεσης	Κάθιση (mm)	Περιεκτικότητα σε αέρα (%)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)
REF	11	3.1	2390	77.80
PeCaPu	17	4.8	1680	32.59
PuCa	24	6.2	1530	25.02
PePu	20	5.3	1530	25.69
RPePu	7	5.6	1550	24.25

Πίνακας 4. Αποτελέσματα από τις δοκιμές ανθεκτικότητας.

Κωδικός Σύνθεσης	Ανοικτό Πορώδες	Συντ. τριχοειδούς απορρόφησης	Συντελεστής διείσδυσης
	OP (%)	S (mm/min ^{0.5})	D _{nssm} · 10 ⁻¹² (m ² /s)
REF	12.87	0.135	8.93
PeCaPu	16.42	0.110	5.45
PuCa	33.72	0.161	7.54
PePu	22.06	0.138	7.57
RPePu	28.97	0.168	8.48

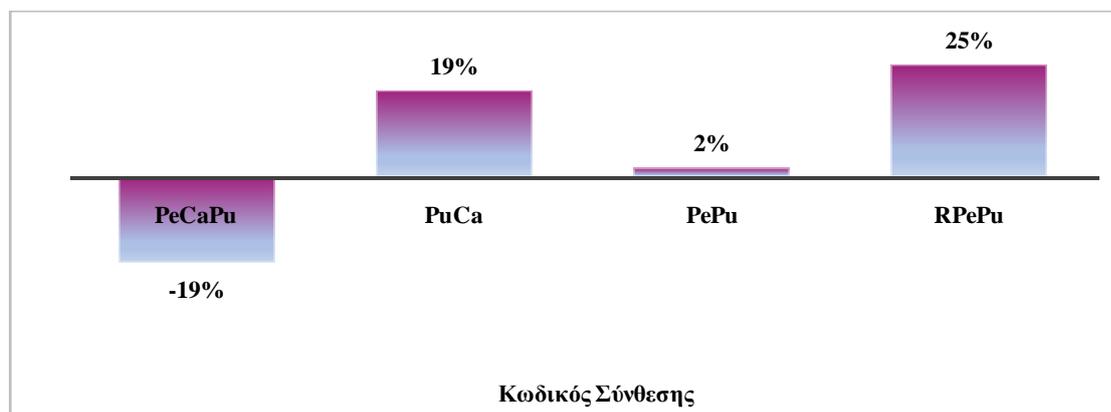
Στον Πίνακα 4, όσο και στο διάγραμμα του Σχήματος 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του ανοικτού πορώδους, OP(%). Τη μέγιστη τιμή (33%) ανοικτού πορώδους παρουσίασε η σύνθεση PuCa. Την ελάχιστη τιμή (12%), απέδωσε η σύνθεση REF. Οι συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές του OP (%) σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Αυτό θεωρείται αναμενόμενο, σύμφωνα και με τους Lo et al [25], που αναφέρουν ότι καθώς τα ελαφρά αδρανή έχουν μεγαλύτερη απορρόφηση νερού από τα συμβατικά, επηρεάζεται τόσο η μικροδομή της πάστας του τσιμέντου, όσο και η διεπιφάνεια της πάστας με τα αδρανή. Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι η χρήση περλίτη φαίνεται να έχει θετική επίδραση στο πορώδες. Στη σύνθεση PeCaPu καταγράφεται αύξηση της τάξης του 28% του πορώδους σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς (Σχήμα 2). Το γεγονός αυτό, μπορεί να αποδοθεί, είτε στη δράση του περλίτη ως φυσικό πληρωτικό, είτε στην ποζολανική του δραστηριότητα. Λόγω της ποζολανικής δράσης του περλίτη ευνοείται ο περαιτέρω σχηματισμός C-S-H, με αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας του σκυροδέματος [26]. Όσον αφορά στη σύνθεση με RHA, οι τιμές του ανοικτού πορώδους είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Όπως αναφέρουν στην έρευνα τους οι Venkatanarayanan and Rangaraju [27], τα αδρανή σωματίδια από RHA είναι σε μεγάλο βαθμό ακανόνιστα, με φλύκταινες, σε στρώσεις και παρουσιάζουν πορώδη δομή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να αυξάνουν το πορώδες του σκυροδέματος με RHA (RPePu).



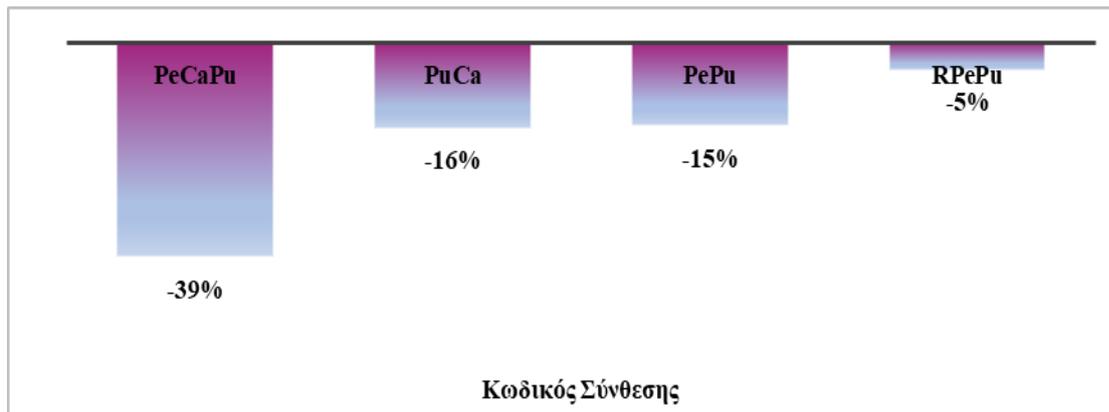
Σχήμα 2. Μεταβολή των τιμών του ανοικτού πορώδους (OP, %) ανά σύνθεση ΕΣ, σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς REF.

Τα αποτελέσματα της τριχοειδούς απορρόφησης απεικονίζονται στον Πίνακα 4. Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης κυμαίνονται από 0.086 mm/min^{0.5} έως 0.132 mm/min^{0.5}. Πρέπει να αναφερθεί ότι για όλες τις τιμές καταγράφεται υψηλός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (R²) της τάξης του 0.99, γεγονός που τις καθιστά αξιόπιστες. Στις

συνθέσεις με ελαφρά αδρανή, παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, της τάξης του 19% σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς για τη σύνθεση PeCaPu (Σχήμα 3). Επίσης, πρέπει να αναφερθεί, πως με τη χρήση περλίτη στο ελαφροσκυρόδεμα, ειδικότερα για τις συνθέσεις PeCaPu και PePu, παρατηρείται σημαντική μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Επομένως, ο συνδυασμός περλίτη και κίσηρης προσέδωσαν στο μείγμα καλύτερη συμπεριφορά. Αντίθετα, ο μεγαλύτερος συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης καταγράφεται για τη σύνθεση RPePu. Συνεπώς, φαίνεται ότι η χρήση χονδρόκοκκης RHA, επηρεάζει αρνητικά τον συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Προηγούμενες μελέτες, αναφέρουν πως σε μεγαλύτερες ηλικίες, η RHA βελτιώνει ελαφρώς την απόδοση των μειγμάτων σχετικά με το συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης [28]. Οι Kannan and Ganesan [29], αναφέρουν ότι οι αυξημένες τιμές απορρόφησης οφείλονται σε πόρους που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα από RHA λόγω της μειωμένης εργασιμότητας, η οποία καταγράφεται και για τη σύνθεση RPePu. Όπως φαίνεται, τόσο στον Πίνακα 4, όσο και στο διάγραμμα του Σχήματος 4, οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής διείδυσης χλωριόντων για το ελαφροσκυρόδεμα, κυμαίνονται από $5.45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ως $8.48 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, όταν για το συμβατικό σκυρόδεμα μετράται τιμή ίση με $8.93 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Η χρήση ROM περλίτη στις συνθέσεις PeCaPu και PePu, φαίνεται να προσδίδει ακόμα καλύτερη συμπεριφορά στο ΕΣ, έναντι του συντελεστή διείδυσης χλωριόντων. Τη μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή διείδυσης χλωριόντων, της τάξης του 39%, φαίνεται να έχει η σύνθεση PeCaPu (Σχήμα 4). Αυτό μπορεί να αποδοθεί, είτε στην επίδραση φυσικής πληρώσεως των μικροσωματιδίων του περλίτη, είτε στην ποζολανική του δραστηριότητα [11,26]. Η ύπαρξη άμορφου SiO_2 στην κίσηρη και στον περλίτη, προσδίδει στο μείγμα ποζολανικές ιδιότητες υψηλής δραστηριότητας, που συντελούν στο σχηματισμό πληρωτικών υλικών και αυξάνουν τη συνοχή της πάστας [30,31]. Με τη χρήση RHA ως αδρανές στο ΕΣ, σε πρώιμες ηλικίες, η μείωση του συντελεστή διείδυσης χλωριόντων, σε σχέση με την REF ήταν της τάξης του 5% (Σχήμα 4). Σύμφωνα με την έρευνα των Balapour et al [32], η προσθήκη RHA, παρέχει ένα καλύτερο περιβάλλον, για τη βελτίωση του μεγέθους των πόρων σε μεγαλύτερες ηλικίες.



Σχήμα 3: Μεταβολή των τιμών του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης ($S, \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$), ανά σύνθεση ΕΣ, σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς REF.



Σχήμα 4. Μεταβολή των τιμών του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων ($D_{nssm} \times 10^{-12}$, m^2/s), ανά σύνθεση ΕΣ, σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς REF.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά από μελέτη και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Το σκυρόδεμα με κίσηρη και περλίτη αναπτύσσει ικανοποιητική αντοχή συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δομοστατικές εφαρμογές.
- Οι τιμές του ανοικτού πορώδους του ελαφροσκυροδέματος, γενικά, εκτιμώνται αυξημένες. Η χρήση λεπτότερου κλάσματος αδρανών από περλίτη επηρεάζει θετικά το πορώδες του ελαφροσκυροδέματος.
- Ο συνδυασμός κίσηρης και περλίτη οδηγεί σε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Σε σύγκριση με το συμβατικό, η μείωση φτάνει στο 19%.
- Η προσθήκη ελαφρών αδρανών κίσηρης και περλίτη επηρέασε θετικά την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων. Η μείωση του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων για τη σύνθεση PeCaPu σε σχέση με το συμβατικό, φτάνει το 39%.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέρμες ευχαριστίες προς την ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ για τη διάθεση εργαστηριακού εξοπλισμού και πρώτων υλών και στις εταιρίες IMERYS INDUSTRIAL MINERALS GREECE S.A και ΕΥ.ΓΕ. Πιστιόλας Α.Ε. για τη χορηγία περλίτη και τέφρας φλοιού ρυζιού, αντίστοιχα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Stratoura, M., Badogiannis, E., Sideris, K.K. & Papadakis, V.G. Development of durable and structural lightweight concrete, *RILEM Spring Convention and Sustainable Materials, Systems and Structures Conference*, Rovinj, Croatia, March 18-22, 2019.
2. Badogiannis, E., Sfikas, I., Voukia, D., & Trezos, K. (2015). Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 82, pp131-141.
3. Basheer, P.A.M., Chidiac, S.E. & Long, A.E. (1996). Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures. *Construction Building Materials*, Vol 10, pp 27.
4. Thompson, N.G. & Lankard, D.R. (1997). *Improved Concretes for Corrosion Resistance*, Georgetown Pike, McLean VA, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-96-207.
5. F.A.O. Rice Market Monitor, Trade and Markets Division, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, June 2010, Volume XIII.

6. Papadakis, V.G. & Tsimas. S. (2002) Supplementary cementing materials in concrete - Part I: Efficiency and design. *Cement and Concrete Research*, Vol 32, pp 1525-1532.
7. Antiohos, S.K., Papadakis VG, & Tsimas S. (2014) Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and finess. *Cement and Concrete Research*, Vol 61-62, pp 20-27.
8. Kartini, K., (2011). Rice husk ash – pozzolanic material for sustainability. *International journal of applied science and technology*, Vol 1.
9. Administrator, "MIlos News," 2019. [Online]. Available: <https://milosnews.net/οι-πωλήσεις-μπετονίτη-και-περλίτη-για/>. [Accessed 13 June 2019]
10. Agar, O., Tekin. O.H., Sayyed M.I., Korkmaz, M.E., Gulfa, O. & Ertugay Can. (2019). Experimental investigation of photon attenuation behaviors for concretes including natural perlite mineral. *Results in Physics*, Vol 12, pp 237-343.
11. Stratoura, M., Badogiannis, E. & Papadakis, V.G. (2018). Study on the durability parameters of lightweight concrete. *18th Greek Concrete Conference in Sustainable construction out of concrete and the contribution of the cement technology to environmental protection*. Athens, Greece. March 29-31, 2018.
12. ASTM C 642. (1997). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. United States: ASTM International.
13. RILEM TC 116-PCD. (1999). RILEM Technical Recommendation: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete. In *Materials and Structures*, Vol 32, pp 178-179.
14. NT Build 492. (1999). *Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiment*. Finland, Nordtest.
15. Tang, L. & Nilsson, L.O. (1992). Rapid determination of chloride diffusivity of concrete by applying an electric field. *ACI Materials Journal*, Vol 49, pp 49-53.
16. Kim, H.S., Lee, S.H. & Moon, H.Y. (2007). Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials*, Vol 21, pp 1229-1237.
17. Turkmen, I., Demirboğa, R. & Gul, R. (2007). The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the freezing and thawing of concrete. *Computers and Concrete*, Vol 3, pp 163-175.
18. Vargas, P., Restrepo-Baena, O. & Tobón, I.J. (2017). Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. *Construction and Building Materials*, Vol 137, pp 381-389.
19. Madani, H., Norouzifa, N.M., Rostami, J. (2018). The synergistic effect of pumice and silica fume on the durability and mechanical characteristics of eco-friendly concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 174, pp 356-368.
20. Adesina, A.P. & Olutoge, A.F. (2019). Structural properties of sustainable concrete developed using rice husk ash and hydrated lime. *Journal of Building Engineering*. Vol 25, pp 100804.
21. Habeeb, G.A. & Fayyadh, M.M. (2009). Rice husk ash concrete: the effect of RHA average particle size on mechanical properties and drying shrinkage. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol 3, pp 1616–1622.
22. Litos, L., Pistiolas, A., Pistiolas, K., Sousa-Coutinho, J., Tapali T.G. & Papadakis V.G.(2012). *Exploitation of rice husk ash in the production of mortar & concrete of high durability and low environmental cost*. EVIPAR 4th Hellenic Conference on the Utilization of By-Products in Construction. June 11-12, Thessaloniki, Greece.
23. Jamil, M., Kaish, A.B.M.A., Raman, S.N. & Zain, M.F.M. (2013). Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system, *Construction and Building Materials*, Vol 47, pp 588–593.

24. Ghassan, A.H. & Mahmud, H.B. (2010). Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. *Materials Research*, Vol 13, pp 185–190.
25. Lo, Y., Gao, X.F. & Jeary, A.P. (1999). Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete. *Building and Environment*, Vol 34, pp 759-764.
26. Mortari-Karein, S.M., Vosoughi, P., Isapour, S. & Karakouzian, M. (2018). Pretreatment of natural perlite powder by further milling to use as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, Vol 186, pp 782-789.
27. Ventkatarayanan, K.H. & Rangaraju, P.R. (2015). Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete. *Cement Concrete Composites*, Vol 55, pp 348–363.
28. Zahedi, M., Ramezani pour, A.A. & Ramezani pour, A.M. (2015). Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. *Construction and Building Materials*, Vol 78, pp 354-361.
29. Kannan, V. & Ganesan, K. (2014). Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, Vol 51, pp 225-234.
30. Aly, M., Hashmi, M.S.J., Olabi, A.G., Messeiry, M. & Hussain, A.I. (2011). Effect of nano clay particles on mechanical, thermal and physical behaviours of waste-glass cement mortars. *Materials Science and Engineering*, Vol 528, pp 7991-7998.
31. Gao, K., Lin, K.L., Wang, D.Y., Hwang, C.L., Tuan, B.L.A, Shiu, H.S. & Cheng, T.W. (2013). Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, Vol 48, pp 441-447.
32. Balapour, M., Ramezani pour, A.A. & Hajibandeh, E. (2017). An investigation on mechanical and durability properties of mortars containing nano and micro RHA. *Construction and Building Materials*, Vol 132, pp 470-477.

Συν-αξιοποίηση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) και μεταλλουργικής σκωρίας για την παραγωγή ανόργανων πολυμερών

A. Σουλτανά¹, A. Βαλουμά², K. Κομνίτσας¹, M. Γαλετάκης¹

¹Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100, Χανιά

²Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100, Χανιά

Λέξεις κλειδιά: ανόργανα πολυμερή, απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων, μεταλλουργική σκωρία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας συν-αξιοποίησης αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) και μεταλλουργικής σκωρίας για την παραγωγή ανόργανων πολυμερών και τη χρήση τους ως συνδετικών ή δομικών υλικών. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκε αρχικά η επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η ορυκτολογική και χημική σύσταση των πρώτων υλών, η συγκέντρωση του διαλύματος ενεργοποίησης, η θερμοκρασία θέρμανσης και ο χρόνος ωρίμανσης, στην αντοχή σε θλίψη των παραγόμενων δοκιμίων. Η μορφολογία και η σύσταση των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν μελετήθηκαν μέσω της τεχνικής της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (XRD) και της υπέρυθρης φασματοσκοπίας (FTIR). Επιλεγμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές ανθεκτικότητας, όπως αντοχή σε θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες (έως 800 °C) και μετά από εμβάπτιση σε απιονισμένο νερό και όξινα διαλύματα για 7 και 30 ημέρες. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπεραίνεται ότι η συν-αξιοποίηση ΑΚΚ και μεταλλουργικής σκωρίας για την παραγωγή ανόργανων πολυμερών είναι μια βιώσιμη λύση για τη διαχείριση των αποβλήτων αυτών.

Co-valorization of construction and demolition waste (CDW) and metallurgical slag for the production of inorganic polymers

A. Sultana¹, A. Valouma², K. Komnitsas¹, M. Galetakis¹

¹School of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, Chania, Crete, 73100, Greece

²School of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Chania, Crete, 73100, Greece

Keywords: inorganic polymers, construction and demolition waste, metallurgical slag

ABSTRACT: In this study, the co-valorization potential of construction and demolition waste (CDW) and metallurgical slag for the production of inorganic polymers and their use as binders or construction materials is investigated. Initially, the effect of the mineralogical and chemical composition of raw materials, molarity of the alkaline activating solution, curing temperature and ageing period on the compressive strength of the final products was also studied. The produced specimens were characterized using analytical techniques such as X-ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Inorganic polymers produced under the optimum conditions were subjected to high temperature firing (up to 800 °C) and immersed in distilled water and acidic solutions for 7 and 30 days. Results indicate that co-valorization of CDW and metallurgical slag for the production of inorganic polymers is a feasible and sustainable option for the management of these wastes.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) αποτελούν το μεγαλύτερο ρεύμα αποβλήτων που παράγεται στις βιομηχανικές χώρες. Προέρχονται από δραστηριότητες σχετικές με κατασκευές και κατεδαφίσεις κτιρίων, και περιλαμβάνουν κυρίως αδρανή υλικά όπως σκυρόδεμα και απόβλητα τοιχοποιίας, ξύλα, μέταλλα και άλλα υλικά σε μικρότερες ποσότητες (Wong et al., 2018). Εκτιμάται ότι σχεδόν το 54 % των ΑΚΚ αποτελείται από κεραμικά απόβλητα τοιχοποιίας (τούβλα, πλακάκια κλπ.) και το 12 % από σκυρόδεμα (Salazar et al., 2017).

Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των αποβλήτων καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον όπως είναι η ρύπανση του εδάφους και της ατμόσφαιρας και η αισθητική υποβάθμιση της περιοχής όπου διατίθενται. Η αξιοποίηση αυτών των υλικών μέσω αλκαλικής ενεργοποίησης για την παραγωγή δευτερογενών προϊόντων (ανόργανα πολυμερή ή γεωπολυμερή) υψηλής προστιθέμενης αξίας κρίνεται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση (Panizza et al., 2018).

Τα ανόργανα πολυμερή παρουσιάζουν βελτιωμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, όπως υψηλή αντοχή, χαμηλή διαπερατότητα, αντοχή στην προσβολή με οξέα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευαστική βιομηχανία και σε άλλες εφαρμογές (Fort et al., 2018; Ghanbari et al., 2015). Η σύστασή τους εξαρτάται από το είδος των πρώτων υλών, όπως μεταλλουργική σκωρία, μετακαολίνη, ιπτάμενη τέφρα κ.ά. και των χρησιμοποιούμενων αλκαλικών διαλυμάτων με στόχο τη δημιουργία δεσμών Si-O-Al-O αντίστοιχων με αυτούς των ένυδρων πυριτικών ασβεστίων (C-S-H) των φάσεων του τσιμέντου (Nergis et al., 2018).

Η σκωρία παράγεται σε μεγάλες ποσότητες παγκοσμίως από τις ηλεκτρικές καμίνους κατά την παραγωγή βασικών μετάλλων, χάλυβα και διαφόρων κραμάτων. Μέρος της παραγόμενης σκωρίας καταναλώνεται στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου, ενώ οι υπολειπόμενες ποσότητες αποτίθενται είτε σε επιφανειακούς χώρους είτε στον πυθμένα των θαλασσών με αποτέλεσμα τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Η αξιοποίηση της μεταλλουργικής σκωρίας μέσω αλκαλικής ενεργοποίησης αποτελεί μια βιώσιμη λύση στο πρόβλημα της διαχείρισής της (Zaharaki and Komnitsas, 2009; Zaharaki et al., 2016). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν στη συν-διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) και μεταλλουργικής σκωρίας για την παραγωγή ανόργανων πολυμερών.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Για την παρασκευή των ανόργανων πολυμερών χρησιμοποιήθηκαν πλακάκια από ΑΚΚ που συλλέχθηκαν από κατεδαφισμένα κτίρια του Νομού Χανίων και σκωρία σιδηρονικελίου, προσφορά του εργοστασίου παραγωγής σιδηρονικελίου «ΛΑΡΚΟ Α.Ε.». Τα πλακάκια πριν από τη χρήση τους λειοτριβήθηκαν σε ραβδόμυλο (Sepor), ενώ η σκωρία λειοτριβήθηκε σε μύλο Bico pulveriser. Η χημική σύσταση των πρώτων υλών (Πίνακας 1) προσδιορίστηκε με φασματοσκοπία φθορισμού ακτινών-X (XRF-EDS, Brucker-AXS S2Range). Η απώλεια πύρωσης υπολογίστηκε μετά από πύρωση των υλικών στους 1050 °C για 4 ώρες. Η κοκκομετρική ανάλυση των υλικών (Πίνακας 2) πραγματοποιήθηκε με χρήση αναλυτή Laser Mastersizer S (Malvern Instruments).

Πίνακας 1. Χημική σύσταση (%κ.β.) των πρώτων υλών.

	Πλακάκια	Σκωρία σιδηρονικελίου
SiO ₂	62.10	32.74
CaO	5.60	3.73
Na ₂ O	1.10	--
Al ₂ O ₃	14.74	8.32
MgO	1.70	2.76
K ₂ O	4.46	--
Fe ₂ O ₃	8.01	43.83
Cr ₂ O ₃	--	3.07
TiO ₂	1.05	--
MnO	--	0.41
P ₂ O ₅	0.11	--
SO ₃	--	0.18
Zn	0.21	--
ZrO ₂	0.49	--
BaO	0.08	--
Σύνολο	99.65	95.04

Πίνακας 2. Κοκκομετρία πρώτων υλών.

Υλικό	d ₉₀ (μm)	d ₅₀ (μm)	d ₁₀ (μm)
Πλακάκια	100	22.9	0.73
Σκωρία σιδηρονικελίου	45.6	8.9	0.43

Για την παρασκευή των δοκιμίων, αρχικά παρασκευάστηκε το διάλυμα ενεργοποίησης με διαλυτοποίηση άνυδρων pellets NaOH σε απιονισμένο νερό και προσθήκη διαλύματος πυριτικού νατρίου (Merck, Na₂O: 7.5-8.5 %, SiO₂: 25.5-28.5 %). Έπειτα, προστέθηκαν σε αυτό τα λειοτριβημένα υλικά υπό συνεχή μηχανική ανάδευση, ώστε να προκύψει ένα εύπλαστο και ομοιογενές μίγμα, το οποίο χυτεύτηκε αμέσως σε κυβικές μεταλλικές μήτρες διαστάσεων 5x5x5 cm³. Οι μήτρες δονήθηκαν για μερικά λεπτά, ώστε να περιοριστεί η παρουσία φυσαλίδων στα τελικά δοκίμια και παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου για 24 ώρες μέχρι την επαρκή στερεοποίηση του μίγματος. Στη συνέχεια, τα δοκίμια εξήχθησαν από τις μήτρες, τοποθετήθηκαν σε πλαστικές σακούλες ώστε να αποφευχθεί η εξάτμιση της υγρασίας και θερμάνθηκαν σε εργαστηριακό φούρνο (ON-02G) στους 80 ή 90 °C για 24 ώρες. Μετά από ωρίμανση για 7 και 28 μέρες, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης χρησιμοποιώντας τη μηχανή MATEST C123N. Σε κάθε πειραματική σειρά και για λόγους σύγκρισης παρασκευάστηκαν δοκίμια αναφοράς (control). Όλα τα δοκίμια παρασκευάστηκαν εις τριπλούν και η αντοχή σε θλίψη προσδιορίστηκε ως μέση τιμή για τα τρία δοκίμια. Τα ποσοστά ανάμιξης των πρώτων υλών εξαρτώνται από τις πρώτες ύλες και το διάλυμα που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση και δίνονται στον Πίνακα 3. Η επιλογή των πειραματικών συνθηκών, βασίστηκε σε προηγούμενες μελέτες για την παραγωγή ανόργανων πολυμερών με χρήση διαφόρων τύπων βιομηχανικών παραπροϊόντων (Komnitsas et al., 2019, Komnitsas et al., 2015, Komnitsas and Zaharaki, 2015).

Πίνακας 3. Αναλογίες ανάμιξης πρώτων υλών και διαλυμάτων (%κ.β.).

Κωδικός*	Στερεό	NaOH (M)	NaOH	H ₂ O	Na ₂ SiO ₃	Αναλογία υγρού προς στερεό (L/S)
T8	65.5	8	4.9	14.3	15.3	0.53
T10	65.1	10	5.9	13.5	15.5	0.54
S	81.1	8	2.1	6.3	10.5	0.23
T75-S25	68.3	8	4.5	13.2	14.1	0.47
T50-S50	70.2	8	4.2	12.3	13.2	0.42

T8: ανόργανο πολυμερές από πλακάκι – χρήση 8 M NaOH

S: ανόργανο πολυμερές από σκωρία – χρήση 8 M NaOH

Τα δοκίμια ανόργανων πολυμερών που παρασκευάστηκαν χαρακτηρίστηκαν ως προς τη μορφολογία τους με χρήση αναλυτικών τεχνικών όπως XRD (X-Ray Diffraction) και FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy). Αναλυτικότερα, για την ορυκτολογική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο ακτίνων-X τύπου Bruker D8 Advance (λυχνία Cu, φάσμα σάρωσης από 4° έως 70° 2θ, βήμα 0.02°, χρόνος μέτρησης 0.2 s/βήμα), λογισμικό DIFFRACplus EVA v. 2006 και βάση δεδομένων PDF, ενώ για τον προσδιορισμό της δομής των τελικών προϊόντων μέσω καταγραφής της απορρόφησης της ακτινοβολίας από υπέρυθρα μήκη κύματος χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο υπέρυθρου Fourier Transform της Perkin-Elmer Model 1000 για εύρος φάσματος 400-4000 cm⁻¹. Το πορώδες (%) επιλεγμένων δοκιμίων προσδιορίστηκε με ποροσιμετρία υδραργύρου σε ποροσίμετρο τύπου Micromeritics AutoPore 9400. Η υδατοαπορρόφητικότητα των δοκιμίων μετρήθηκε σύμφωνα με το EN 13755.

Επιλεγμένα ανόργανα πολυμερή με ικανοποιητική αντοχή υποβλήθηκαν σε δοκιμές ανθεκτικότητας μέσω εμβάπτισής τους σε απιονισμένο νερό και σε όξινα διαλύματα (1 M HCl και 1 M H₂SO₄) για 7 και 30 ημέρες. Μετά από τις δοκιμές εμβάπτισης υπολογίστηκε η απώλεια μάζας των δοκιμίων και προσδιορίστηκε η αντοχή τους σε θλίψη.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανθεκτικότητας των ανόργανων πολυμερών μετά από πύρωση για 2 ώρες σε θερμοκρασίες 400, 600 και 800 °C (σε φούρνο N-8L Selecta).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

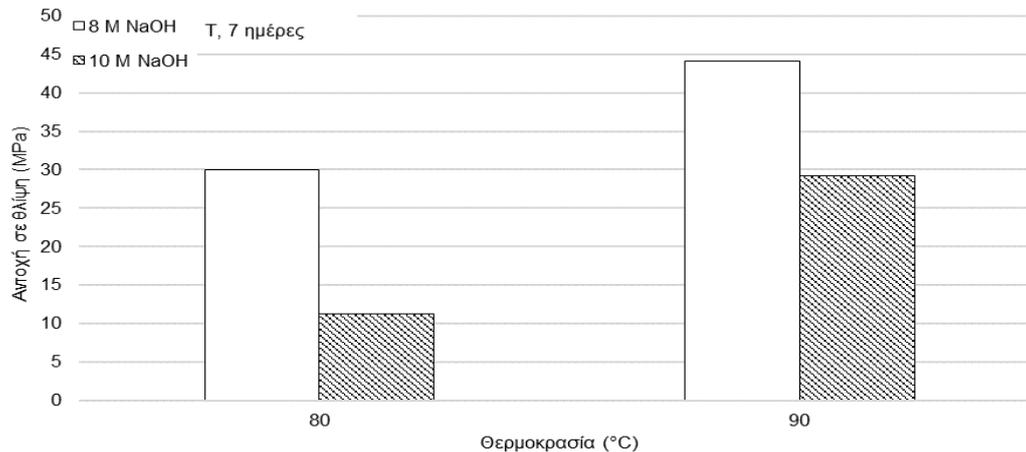
3.1. Επίδραση της συγκέντρωσης του NaOH και της θερμοκρασίας θέρμανσης στην αντοχή σε θλίψη

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η αντοχή σε θλίψη των ανόργανων πολυμερών από πλακάκια (T) σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του διαλύματος NaOH και τη θερμοκρασία θέρμανσης. Όπως προκύπτει, τα ανόργανα πολυμερή από πλακάκια (T) αποκτούν την υψηλότερη αντοχή (44.1 MPa) όταν η συγκέντρωση του διαλύματος NaOH είναι 8 M και η θερμοκρασία θέρμανσης 90 °C. Όταν η συγκέντρωση του διαλύματος NaOH αυξάνεται στα 10 M, η αντοχή των δοκιμίων μειώνεται. Επίσης, από το Σχήμα 1 παρατηρείται ότι η αντοχή σε θλίψη των ανόργανων πολυμερών από πλακάκια που παράγονται σε συγκέντρωση 8 M NaOH αυξάνεται από 30 σε 44.1 MPa όταν η θερμοκρασία αυξάνεται από 80 σε 90 °C.

Η συγκέντρωση του διαλύματος NaOH και η θερμοκρασία θέρμανσης των δοκιμίων παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην απόκτηση υψηλών αντοχών. Οι πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις διαλύματος NaOH δεν επαρκούν για τη διαλυτοποίηση των πρώτων υλών, ενώ η χρήση περίσσειας NaOH, οδηγεί σε μείωση της αντοχής των ανόργανων πολυμερών, καθώς η περίσσεια Na₂O στο σύστημα παρεμποδίζει το φαινόμενο της πολυσυμπύκνωσης (Maragkos et al., 2009; Tuyan et al., 2018).

Όσον αφορά στη θερμοκρασία θέρμανσης, η υψηλότερη θερμοκρασία επιδρά θετικά στις μηχανικές ιδιότητες, καθώς η αλκαλική ενεργοποίηση συμβάλλει στη διαλυτοποίηση μεγαλύτερης ποσότητας πρώτων υλών και στο σχηματισμό ισχυρών δεσμών, ενώ η χαμηλή θερμοκρασία θέρμανσης δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση των αντιδράσεων (Zaharaki et al., 2016; Puertas and Torres-Carrasco, 2014).

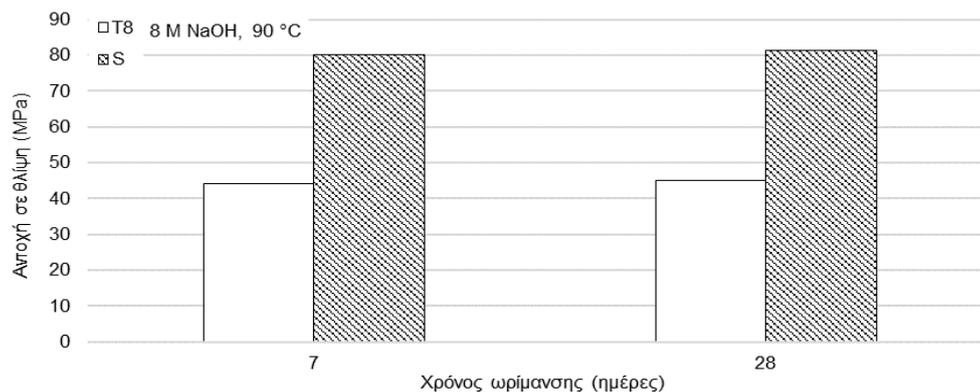
Τα βέλτιστα αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη λήφθηκαν για τα ανόργανα πολυμερή που παρασκευάστηκαν σε συγκέντρωση 8 M NaOH και θερμοκρασία θέρμανσης 90 °C.



Σχήμα 1. Επίδραση της συγκέντρωσης του διαλύματος NaOH στην αντοχή των ανόργανων πολυμερών από πλακάκια (T) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία θέρμανσης.

3.2. Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε θλίψη

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει την επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε θλίψη ανόργανων πολυμερών που παρασκευάστηκαν από πλακάκια και μεταλλουργική σκωρία (T8, S σύμφωνα με τον Πίνακα 3).

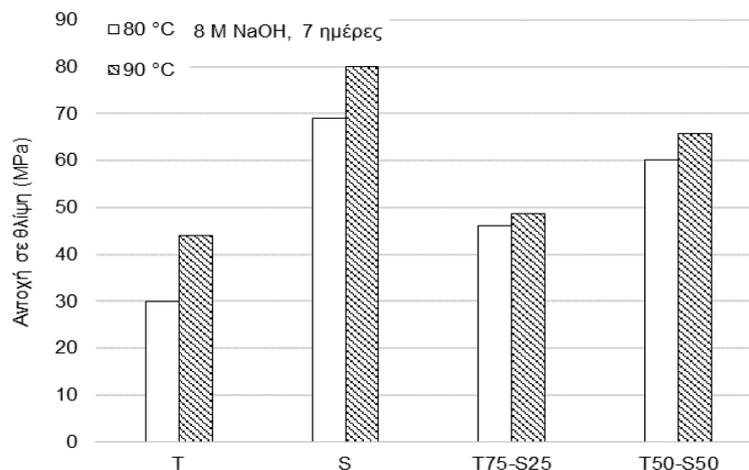


Σχήμα 2. Επίδραση του χρόνου ωρίμανσης στην αντοχή σε θλίψη ανόργανων πολυμερών από πλακάκια και μεταλλουργική σκωρία (T8, S σύμφωνα με τον Πίνακα 3).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η αύξηση του χρόνου ωρίμανσης από 7 σε 28 ημέρες δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την αντοχή των ανόργανων πολυμερών και αυτό σημαίνει ότι οι αντιδράσεις ολοκληρώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

3.3. Επίδραση της προσθήκης μεταλλουργικής σκωρίας στην αντοχή σε θλίψη ανόργανων πολυμερών από πλακάκια

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η επίδραση της προσθήκης μεταλλουργικής σκωρίας στην αντοχή σε θλίψη ανόργανων πολυμερών από πλακάκια για διαφορετικές θερμοκρασίες θέρμανσης. Για λόγους σύγκρισης παρατίθενται επίσης οι αντοχές των δοκιμών αναφοράς (T και S αντίστοιχα). Από το Σχήμα 3 προκύπτει ότι τα ανόργανα πολυμερή που παράγονται όταν αναμιγνύονται πλακάκια με μεταλλουργική σκωρία σε ποσοστό 50 %κ.β., χρησιμοποιώντας διάλυμα NaOH 8 M, σε θερμοκρασία θέρμανσης 90 °C παρουσιάζουν την υψηλότερη αντοχή σε θλίψη (65.7 MPa). Επιπλέον, φαίνεται ότι η θερμοκρασία θέρμανσης 90 °C (Σχήμα 3), επιδρά θετικά στην αντοχή όλων των παραγόμενων δοκιμών.



Σχήμα 3. Αντοχή σε θλίψη ανόργανων πολυμερών με αρχική πρώτη ύλη πλακάκια και μεταλλουργική σκωρία. Προσθήκη μεταλλουργικής σκωρίας σε ποσοστό 25 %κ.β. (T75-S25) και 50 %κ.β. (T50-S50) για διαφορετικές θερμοκρασίες θέρμανσης.

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει την υδατοαπορροφητικότητα, το πορώδες και την πυκνότητα επιλεγμένων ανόργανων πολυμερών δίνοντας παράλληλα και τις αντοχές σε θλίψη.

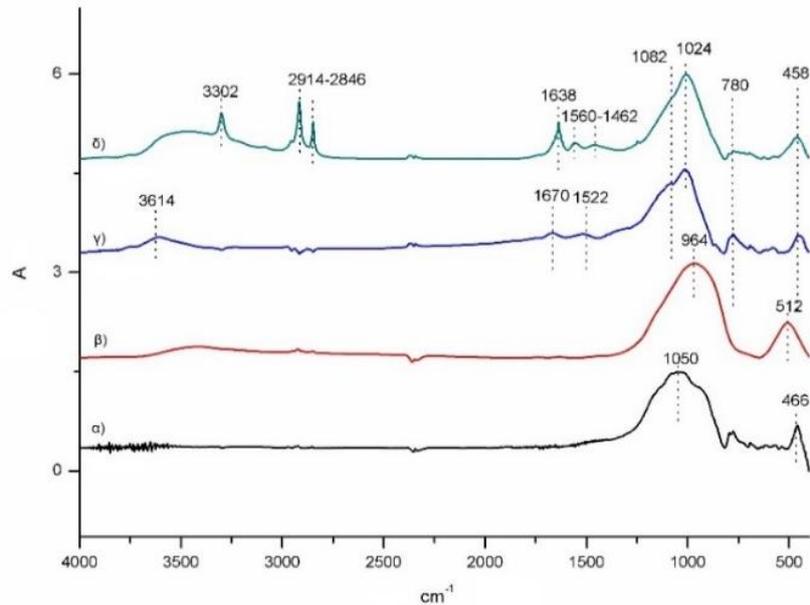
Πίνακας 4. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων δοκιμών που παρασκευάστηκαν στις βέλτιστες συνθήκες (8 M NaOH, 90 °C).

	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Υδατοαπορροφητικότητα (%)	Πορώδες (%)	Πυκνότητα (kg/m ³)
T8	44.1	17.8	23.2	1920
S	80.1	4.21	10.9	2580
T50-S50	65.7	13.1	14.7	2270

Παρατηρείται ότι η προσθήκη σκωρίας μείωσε το πορώδες και την υδατοαπορροφητικότητα και αύξησε την πυκνότητα των δοκιμών. Οι μεταβολές αυτές που παρατηρήθηκαν συμφωνούν με τις μεταβολές της αντοχής των δοκιμών σε θλίψη.

3.4. Μορφολογία ανόργανων πολυμερών

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι μετασχηματισμοί των φάσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την αντίδραση των πρώτων υλών και των αλκαλικών διαλυμάτων, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις FTIR σε επιλεγμένα δοκίμια. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα φάσματα των πρώτων υλών και των ανόργανων πολυμερών που παρασκευάστηκαν από πλακάκια και σκωρία σιδηρονικελίου (αναλογίες ανάμιξης πλακακίων-σκωρίας: 75-25 %κ.β. και 50-50 %κ.β.) στις βέλτιστες συνθήκες 8 M NaOH, 90 °C).



Σχήμα 4. Φάσματα FTIR α) πλακακίων και β) σκωρίας ως πρώτες ύλες, και ανόργανων πολυμερών με γ) 25 %κ.β. αντικατάσταση πλακακίων (T75-S25) και δ) 50 %κ.β. αντικατάσταση πλακακίων (T50-S50) με σκωρία.

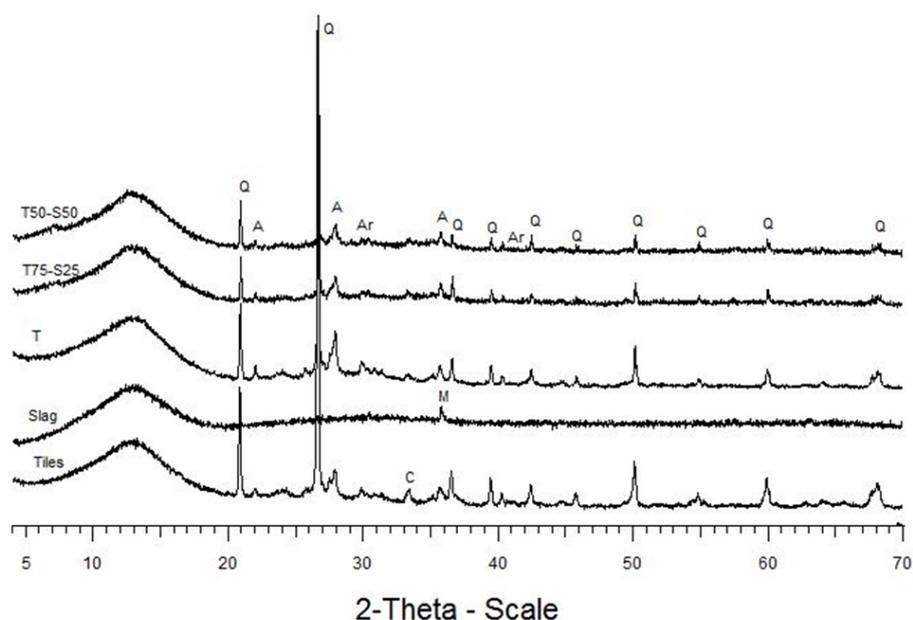
Το φάσμα των πλακακίων ως πρώτη ύλη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4α. Οι κορυφές που εντοπίζονται στα 1050 cm^{-1} και οι κορυφές μεταξύ $800\text{-}450\text{ cm}^{-1}$ σχετίζονται με τις αργιλοπυριτικές φάσεις και αποδίδονται στους δεσμούς Si-O και Al-O (Komnitsas et al., 2009).

Οι ζώνες απορρόφησης της σκωρίας (Σχήμα 4β) εντοπίζονται στα 964 και 512 cm^{-1} . Η κορυφή στα 512 cm^{-1} αποδίδεται σε δεσμούς Fe-O λόγω της παρουσίας μαγνητίτη (Muthuvel et al., 2019). Η κύρια κορυφή της σκωρίας των 964 cm^{-1} μετατοπίζεται στα 1024 cm^{-1} στα δοκίμια T75-S25 και T50-S50 (Σχήμα 4γ, δ). Η μετατόπιση αυτή αντιπροσωπεύει τη δημιουργία των χαρακτηριστικών δεσμών Si-O-Si του σχηματισμού των ανόργανων πολυμερών. Η νέα κορυφή στα 1082 cm^{-1} θεωρείται χαρακτηριστική της δομής των ανόργανων πολυμερών και υποδηλώνει πως το υπό μελέτη ανόργανο πολυμερές αποτελείται από πολυμερικά είδη αλυσίδας όμοιου μήκους, ενώ η σκωρία ως πρώτη ύλη αποτελείται από ποικίλα μεγέθη πολυμερικών αλυσίδων (Maragkos et al., 2009). Το γεγονός αυτό δικαιολογεί τη μεγαλύτερη αντοχή των δοκιμίων αυτών συγκριτικά με τα αντίστοιχα από πλακάκια.

Οι δονήσεις κάμψης κοντά στα 460 cm^{-1} αποδίδονται στους δεσμούς Al-O και Si-O φάσεων που παραμένουν αναλλοίωτες από τα αλκαλικά διαλύματα και δεν συνεισφέρουν στη δημιουργία του αργιλοπυριτικού δικτύου (Koupris et al., 2018). Η ζώνη απορρόφησης μεταξύ

2914-2846 cm^{-1} και 3700-3000 cm^{-1} οφείλεται σε δονήσεις κάμψης του δεσμού O-H εξαιτίας των ασθενών δεσμών των μορίων του νερού που βρίσκεται στην επιφάνεια ή στις πολυμερικές δομές. Η ζώνη απορρόφησης μεταξύ 1670-1638 cm^{-1} αποδίδεται σε δονήσεις στρέψης και κάμψης του δεσμού H-O-H, ενώ η ζώνη απορρόφησης στα 1560-1462 cm^{-1} αποδίδεται σε ατμοσφαιρική ενανθράκωση (Zaharaki et al., 2010; Tuyan et al., 2018).

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης XRD επιλεγμένων ανόργανων πολυμερών που παρασκευάστηκαν από πλακάκια (T), με αντικατάσταση πλακακίων με σκωρία κατά 25 %κ.β. (T75-S25) και 50 %κ.β. (T50-S50) στις βέλτιστες συνθήκες (8 M NaOH, 90 °C), καθώς και των πλακακίων (Tiles) και της σκωρίας (Slag) ως πρώτες ύλες.



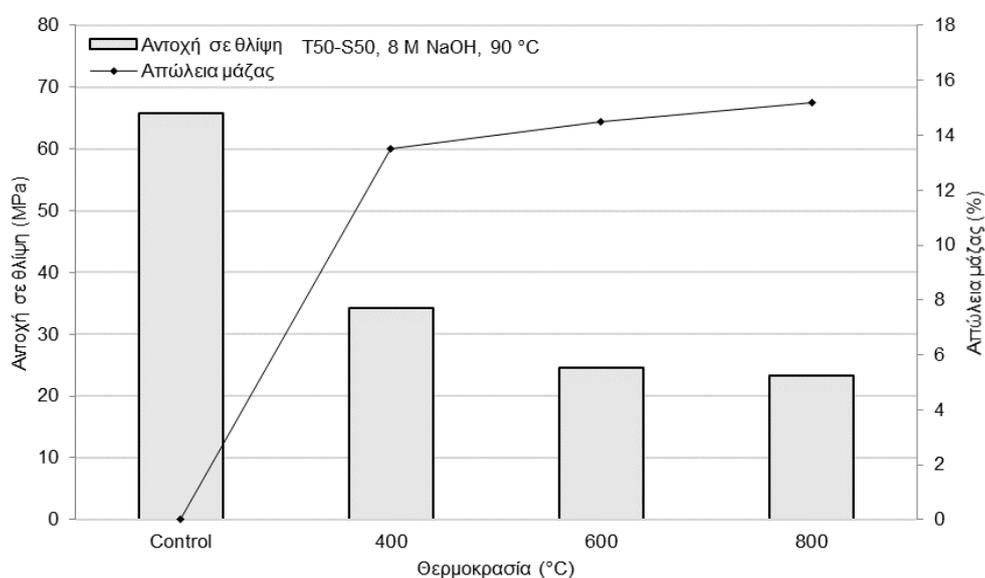
Σχήμα 5. Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X των πλακακίων (Tiles) και της σκωρίας (Slag) ως πρώτες ύλες, ανόργανων πολυμερών από πλακάκια (T), πλακάκια με αντικατάσταση 25 %κ.β. με σκωρία (T75-S25) και πλακάκια με αντικατάσταση 50 %κ.β. με σκωρία (T50-S50) στις βέλτιστες συνθήκες (8 M NaOH, 90°C). Q: χαλαζίας (SiO_2), A: αλβίτης ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), C: ασβεστίτης (CaCO_3), M: Μαγνητίτης (Fe_3O_4) και Ar: αραγωνίτης (CaCO_3).

Οι φάσεις που εντοπίζονται στις πρώτες ύλες είναι ο χαλαζίας (SiO_2), ο αλβίτης ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), ο ασβεστίτης (CaCO_3), ο μαγνητίτης (Fe_3O_4) και ο αραγωνίτης (CaCO_3). Τα ανόργανα πολυμερή χαρακτηρίζονται κυρίως από άμορφη δομή, ενώ εμφανίζονται και κρυσταλλικές φάσεις όπως ο χαλαζίας και ο αλβίτης. Παρατηρείται ότι η ένταση των κορυφών των ανόργανων πολυμερών από πλακάκια και πλακάκια-σκωρία είναι χαμηλότερη από αυτές των πρώτων υλών. Τα ακτινοδιαγράμματα XRD των ανόργανων πολυμερών παρουσιάζουν μεγαλύτερο ποσοστό άμορφου από τα αντίστοιχα των πρώτων υλών, το οποίο αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης των πλακακίων με σκωρία. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται από τις αντοχές σε θλίψη (Σχήμα 3), βάσει των οποίων όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης με σκωρία, τόσο αυξάνεται και η αντοχή των δοκιμίων.

3.5. Δοκιμές ανθεκτικότητας

Η δομική ακεραιότητα ανόργανων πολυμερών που παρασκευάστηκαν με 50 %κ.β. αντικατάσταση πλακακίων με σκωρία (T50-S50 σύμφωνα με τον Πίνακα 3) στις βέλτιστες συνθήκες (8 M NaOH, 90 °C) διερευνήθηκε μετά από πύρωση σε υψηλές θερμοκρασίες (400, 600 και 800 °C για 2 ώρες) ή εμβάπτιση σε απιονισμένο νερό και όξινα διαλύματα (1 M HCl και 1 M H₂SO₄) για 7 και 30 ημέρες. Μετά από κάθε δοκιμή υπολογίστηκε η απώλεια μάζας των δοκιμίων και προσδιορίστηκε η αντοχή τους σε θλίψη. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται και οι αντοχές των δοκιμίων ελέγχου (control) που δεν υποβλήθηκαν στις παραπάνω δοκιμές.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η αντοχή σε θλίψη και η απώλεια μάζας των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε πύρωση στους 400, 600 και 800 °C για 2 ώρες.

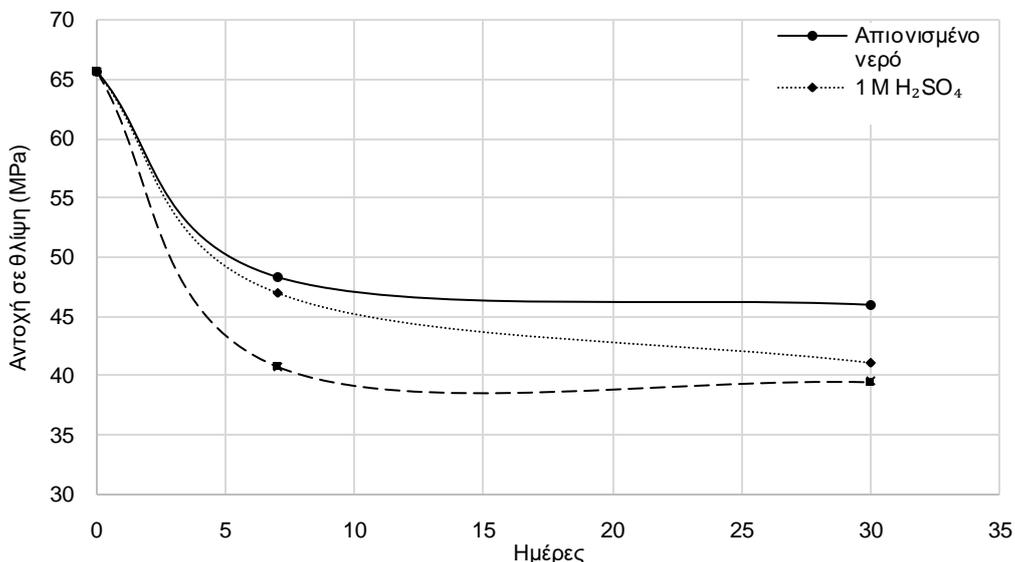


Σχήμα 6. Αντοχή σε θλίψη και απώλεια μάζας των ανόργανων πολυμερών T50-S50 που έχουν παραχθεί στις βέλτιστες συνθήκες, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία πύρωσης.

Η αντοχή των ανόργανων πολυμερών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που αποδίδεται στην απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού και στην σταδιακή διάσπαση της πολυμερικής δομής τους. Παρόλα αυτά, η αντοχή των δοκιμίων παραμένει μεγαλύτερη από 20 MPa μετά από πύρωση στους 800 °C για 2 ώρες. Η ποσοστιαία απώλεια μάζας αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας πύρωσης από 13.5 σε 15.2 %. Η μεγαλύτερη απώλεια μάζας παρατηρείται μέχρι τους 400 °C.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων που εμβάπτιστηκαν σε απιονισμένο νερό, διάλυμα H₂SO₄ συγκέντρωσης 1 M και διάλυμα HCl συγκέντρωσης 1 M, για 7 και 30 ημέρες. Στις 30 ημέρες, η αντοχή των δοκιμίων που εμβάπτιστηκαν στο διάλυμα HCl μειώνεται κατά 40 %. Αντίστοιχη μείωση σε ποσοστό έως 37 % προκύπτει και μετά από εμβάπτιση των ανόργανων πολυμερών σε διάλυμα H₂SO₄. Με την εμβάπτιση των ανόργανων πολυμερών σε απιονισμένο νερό η αντοχή τους σε θλίψη μειώνεται κατά 30 %, αλλά παραμένει μεγαλύτερη από 45 MPa.

Η ποσοστιαία απώλεια μάζας των δοκιμίων που εμβαπτίστηκαν στο απιονισμένο νερό, στο διάλυμα H_2SO_4 και στο διάλυμα HCl για 30 ημέρες, ήταν ίση με 1, 2.9 και 4 %, αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι σε κάθε περίπτωση η αντοχή των δοκιμίων παρέμεινε μεγαλύτερη από 35 MPa, ακόμη και για τα δοκίμια που εμβαπτίστηκαν σε διαλύματα HCl και H_2SO_4 για περίοδο 30 ημερών.



Σχήμα 7. Μεταβολή της αντοχής των ανόργανων πολυμερών (T50-S50) που έχουν παραχθεί στις βέλτιστες συνθήκες (8 M NaOH, 90 °C), όταν εμβαπτίζονται σε απιονισμένο νερό και σε όξινα διαλύματα (1 M HCl και 1 M H_2SO_4).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ανόργανα πολυμερή που παρασκευάστηκαν από πλακάκια παρουσίασαν υψηλές τιμές αντοχής σε θλίψη που φτάνουν τα 44.1 MPa. Οι βέλτιστες συνθήκες παρασκευής των δοκιμίων αυτών είναι συγκέντρωση διαλύματος NaOH 8 M, θερμοκρασία θέρμανσης 90 °C και περίοδος ωρίμανσης 7 ημέρες. Η αύξηση του χρόνου ωρίμανσης από 7 σε 28 ημέρες δεν επηρέασε την αντοχή των ανόργανων πολυμερών.

Η χρήση της σκωρίας για μερική αντικατάσταση των πλακακίων επέφερε σημαντική βελτίωση στην τελική αντοχή των δοκιμίων. Τη μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη (65.7 MPa) είχαν τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με πλακάκια και 50 %κ.β. αντικατάσταση με σκωρία στις βέλτιστες συνθήκες (8 M NaOH, 90 °C).

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης FTIR γίνεται εμφανές πως οι δεσμοί Si-O, Al-O αναδιοργανώνονται σε δίκτυο Si-O-Si και Al-O-Si, χαρακτηριστικό της επιτυχούς αλκαλικής ενεργοποίησης.

Η δοκιμή πύρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες επηρέασε σημαντικά τη δομική ακεραιότητα των ανόργανων πολυμερών και μείωσε την αντοχή τους έως 65 %. Παρόλα αυτά η αντοχή των δοκιμίων παρέμεινε μεγαλύτερη από 20 MPa μετά από πύρωση στους 800 °C για 2 ώρες.

Από τις δοκιμές εμβάπτισης των ανόργανων πολυμερών σε απιονισμένο νερό και όξινα διαλύματα παρατηρήθηκε ότι σε κάθε περίπτωση η αντοχή των δοκιμίων παρέμεινε

μεγαλύτερη από 35 MPa, ακόμη και για τα δοκίμια που εμβαπτίστηκαν σε διαλύματα HCl και H₂SO₄ για περίοδο 30 ημερών.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας συμπεραίνεται ότι η συν-αξιοποίηση ΑΚΚ και μεταλλουργικής σκωρίας για την παραγωγή ανόργανων πολυμερών με ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες αποτελεί μια βιώσιμη λύση για τη διαχείριση των αποβλήτων αυτών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου «INVALOR: Ερευνητική Υποδομή για την Αξιοποίηση Αποβλήτων και Αειφόρου Διαχείρισης Φυσικών Πόρων» (MIS 5002495) που εντάσσεται στη δράση «Ενίσχυση των Υποδομών Έρευνας και Καινοτομίας» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Nergis, B. D. D., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P., Tahir, M. F. M. Geopolymers and their uses: Review. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering 374, 12-19, (2018).
- Fořt, J., Vejmelková, E., Koňáková, D., Alblová, N., Čácharová, M., Keppert, M., Rovnaníková, P., Černý, R. Application of waste brick powder in alkali activated aluminosilicates: functional and environmental aspects. Journal of Cleaner Production 194, 714-725, (2018).
- Ghanbari, M., Hadian, A. M., Nourbakhsh, A. A. Effect of processing parameters on compressive strength of metakaolinite based geopolymers: Using DOE approach. 5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, UFGNSM15 Procedia Materials Science 11, 711-716, (2015).
- Kioupi, D., Kavakakis, Ch., Tsivilis, S., Kakali, G. Synthesis and characterization of porous fly ash-based geopolymers using Si as foaming agent. Advances in Materials Science and Engineering 2018, 11, (2018).
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., Galetakis, M. Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. Advanced Powder Technology 26, 368-376, (2015).
- Komnitsas, K., Bartzas, G., Karmali, V., Petrakis, E., Kurylak, W., Pietek, G., Kanasiewicz, J. Assessment of alkali activation potential of a polish ferronickel slag. Sustainability 11(7), 1863, (2019).
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Perdikatsis, V. Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers. Journal of Hazardous Materials 161, 760-768, (2009).
- Komnitsas, K., Zaharaki, D. Co-utilization of construction and demolition with industrial wastes for the production of geopolymers. In Inter. Conference on Industrial Waste & Wastewater Treatment & Valorization, President Hotel, Athens, 21-23, (2015).

- Maragkos, I., Giannopoulou, I. P., Pantias, D. Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers. *Minerals Engineering* 22(2), 196-203, (2009).
- Muthuvel, I., Gowthami, K., Thirunarayanan, G., Suppuraj, P., Krishnakumar, B., do Nascimento, Sobral, A. J. F., Swaminathan, M. Graphene oxide-Fe₂V₄O₁₃ hybrid material as highly efficient hetero-Fenton catalyst for degradation of methyl orange. *International Journal of Industrial Chemistry* 1-11, (2019).
- Panizza, M., Natali, M., Garbin, E., Tamburini, S., Secco, M. Assessment of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates as a building material. *Construction and Building Materials* 181, 119-133, (2018).
- Puertas, F., Torres-Carrasco, M. Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterization, *Cement and Concrete Research* 57, 95-104, (2014).
- Robayo-Salazar, R. A., Rivera, J. F., de Gutiérrez, R. M. Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials* 149, 130-138, (2017).
- Tuyan, M., Andiç-Çakir, Ö., Ramyar, K. Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. *Composites Part B: Engineering* 135, 242-252, (2018).
- Wong, C. L., Mo, K. H., Yap, S. P., Alengaram, U. J., Ling, T. C. Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. *Journal of Cleaner Production* 195, 226-239, (2018).
- Zaharaki, D., Galetakis, M., Komnitsas, K. Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation. *Construction and Building Materials* 121, 686-693, (2016).
- Zaharaki, D., Komnitsas, K. Effect of additives on the compressive strength of slag-based inorganic polymers. *Global Nest Journal* 11(2), 137-146, (2009).
- Zaharaki, D., Komnitsas, K., Perdikatsis, V. Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition. *Journal of Materials Science* 45(10), 2715-2724, (2010).

Διερεύνηση της παραγωγής τερνεσιτικών τσιμέντων από ελληνικά βιομηχανικά παραπροϊόντα

Ν. Σταυρουλάκης^{1,2,*}, Α. Χαρίτου¹, Α. Παπαδημητρίου¹, Σ. Αντίοχος³, Α. Καραμπέρι¹, Μ. Γαλετάκης⁴, Σ. Τσίμας¹

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, 15773, Αθήνα, Ελλάδα

²ΦΙΝΟΜΠΕΤΟΝ Α.Ε., 73100, Χανιά, Κρήτη, Ελλάδα

³Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, Εργοστάσιο Καμαρίου, Ελλάδα

⁴Σχολή Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100, Χανιά, Ελλάδα

* n.stavroulakis@outlook.com.gr

Λέξεις κλειδιά: Τερνεσίτης, Γελιμίτης, Θειοαργιλικά τσιμέντα, Ιπτάμενη τέφρα, Γύψος FGD

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα έρευνα εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης ελληνικών βιομηχανικών παραπροϊόντων στην παραγωγή θειοαργιλικού τσιμέντου με κυρίαρχη ορυκτολογική φάση τον τερνεσίτη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν μίγματα Ιπτάμενης Τέφρας και Γύψου αποθείωσης (FGD), προερχόμενων από τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης, μαζί με ασβεστόλιθο. Εφαρμόστηκαν διαφορετικά σενάρια κλινκεροποίησης και μελετήθηκαν οι ιδιότητες κλίνκερ και τσιμέντων τερνεσιτικής-βελιτικής-θειοαργιλικής σύστασης, καθώς και η επίδραση της διαδικασίας κλινκεροποίησης στις ιδιότητες αυτές.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν την ικανότητα ενσωμάτωσης βιομηχανικών παραπροϊόντων στη διαδικασία παραγωγής τερνεσιτικών-βελιτικών-θειοαργιλικών κλίνκερ και τσιμέντων, τη σημαντική επίδραση των συνθηκών κλινκεροποίησης στις ιδιότητες τους, καθώς και την αναγκαιότητα περαιτέρω διερεύνησης για τον σωστότερο καθορισμό της σχέσης μεταξύ των ορυκτολογικών φάσεων στο τερνεσιτικό-βελιτικό-θειοαργιλικό σύστημα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα βελιτικά-θειοαργιλικά κλίνκερ αποτελούν πολλά υποσχόμενες εναλλακτικές του τσιμέντου Portland λόγω των χαμηλών εκπομπών CO₂ κατά την παραγωγική τους διαδικασία. Τέτοια κλίνκερ παράγονται από την έψηση μιγμάτων ασβεστόλιθου, βωξίτη και γύψου σε θερμοκρασίες από 1250 έως 1350°C, οι οποίες είναι κατά 100-200°C μειωμένες σε σχέση με την παραγωγή του κοινού Portland που παράγεται στους 1450°C. Οι φαρίνες των κλίνκερ αυτών εμφανίζουν επίσης χαμηλότερες τιμές του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο (LSF), καθώς περιέχουν λιγότερο ασβεστόλιθο, οπότε παρουσιάζουν μειωμένες εκπομπές CO₂ σχετιζόμενες με τις πρώτες ύλες. Τα κλίνκερ αυτά είναι επίσης πιο ευάλεστα απαιτώντας επομένως μειωμένη ενέργεια κατά τη λειοτρίβηση. Η συνολική μείωση των εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την παραγωγή, μπορεί να ξεπεράσει το 25% [1-4].

Ο τερνεσίτης, C₅S₂Š (σημειογραφία που χρησιμοποιείται στο σύνολο της εργασίας: C=CaO, A=Al₂O₃, S=SiO₂, F=Fe₂O₃, Š=SO₃, H=H₂O) είναι ένα φυσικό ορυκτό που βρέθηκε στο βουνό Ettringer, κοντά στην περιοχή Eifel της Γερμανίας, του οποίου η κρυσταλλική δομή ταυτοποιήθηκε πρωτίστως το 1960 από τους Sundius και Peterson στα τοιχώματα κλιβάνων τσιμέντου, ενώ αργότερα το 1972 ο Pryce αναγνώρισε τον τερνεσίτη σε αποθέσεις στα τοιχώματα κλιβάνου ασβέστη στην περιοχή κοντά στη φλόγα όπου η θερμοκρασία ήταν ~1100°C [5-7]. Ο τερνεσίτης σχηματίζεται στο θερμοκρασιακό εύρος 900-1180°C από την αντίδραση βελίτη C₂S με ανυδρίτη CŠ (1), ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες διασπάται εκ νέου σύμφωνα με την αντίστροφη αντίδραση (1) [7-12]:



Συχνά, ο τερνεσίτης αναφέρεται ως συστατικό των βελιτικών-θειοαργλικών κλίνκερ χωρίς όμως να του προσδίδονται υδραυλικές ιδιότητες [2,10,13-16]. Πρόσφατα, ωστόσο, ερευνητές του κέντρου τεχνολογίας της Heidelberg cement ανακάλυψαν ότι ως συστατικό των θειοαργλικών κλίνκερ, ο τερνεσίτης μπορεί να έχει υδραυλικές ιδιότητες, προτείνοντας έναν μηχανισμό ενεργοποίησης βασισμένο στην παρουσία διαλυτού AH_3 [17-20]. Τα τερνεσιτικά-βελιτικά-θειοαργλικά τσιμέντα αποτελούν σημαντικό πεδίο έρευνας για τη βιομηχανία τσιμέντου καθώς θεωρούνται ως πιθανά και πολλά υποσχόμενα τσιμέντα προς αντικατάσταση του κοινού τσιμέντου Portland [9].

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η μελέτη της δυνατότητας παραγωγής τερνεσιτικών-βελιτικών-θειοαργλικών τσιμέντων με παράλληλη αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, οι ιδιότητες των τσιμέντων αυτών και πώς επιδρούν οι διαφορετικές διεργασίες κλινκεροποίησης σε αυτές.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Πρώτες ύλες

Η επιλογή των πρώτων υλών (πρωτογενών ή βιομηχανικών παραπροϊόντων) έγινε με γνώμονα την περιεκτικότητα τους σε CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , και SO_3 . Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ο ασβεστόλιθος ως πηγή CaO , η Ιπτάμενη τέφρα ως πηγή SiO_2 και Al_2O_3 , και ο γύψος FGD ως πηγή SO_3 . Η προμήθεια των πρώτων υλών έγινε από το εργοστάσιο της εταιρίας «TITAN» στο Καμάρι Αττικής (Ασβεστόλιθος) και τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης (Ιπτάμενη τέφρα και FGD).

Η χημική σύσταση των πρώτων υλών προσδιορίστηκε με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων-Χ (XRF) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Η ορυκτολογική σύσταση προσδιορίστηκε με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ χρησιμοποιώντας ένα μηχάνημα Bruker D-8 Advance σε διαμόρφωση θ - 2θ με μονοχρωματική ακτινοβολία $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5418$ Å) και ανιχνευτή LYNXEYE (1-

D) με φίλτρο Ni. Κατά την λήψη των μετρήσεων εφαρμόστηκε συνεχής περιστροφή του δειγματοφορέα. Η ποσοτική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Rietveld με την ενσωμάτωση κορούνδιου (Al_2O_3) ως πρότυπο και χρήση του λογισμικού Autoquan v.2.80. Αναλυτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση πρώτων υλών, %κ.β.

	Ασβεστόλιθος	Ιπτάμενη Τέφρα	FGD
SiO_2	2,59	45,46	0,72
Al_2O_3	1,51	20,68	0,44
Fe_2O_3	0,47	9,84	0,07
CaO	51,16	14,39	36,20
MgO	1,03	2,08	0,73
K_2O	0,08	1,35	
Na_2O		0,3	
SO_3		3,66	53,25
Α.Π.	42,82	1,45	4,94

Πίνακας 2. Ορυκτολογική ανάλυση πρώτων υλών, %κ.β.

	Ασβεστόλιθος	Ιπτάμενη τέφρα	FGD
Άμορφο		43	
Ασβεστίτης (CaCO ₃)	95	3	5
Δολομίτης (CaMg(CO ₃) ₂)	4		
Χαλαζία (SiO ₂)	1	16	1
Ανυδρίτης (CaSO ₄)		6	
Γκελενίτης (C ₂ AS)		5	
Βελίτης (C ₂ S)		4	
Μπραουνμυλλερίτης (C ₄ AF)		2	
Αματίτης (Fe ₂ O ₃)		2	
Μαγκχεμίτης (Fe ₂ O ₃)		3	
Άστριοι		15	
[(Ca;Na)(Si;Al) ₄ O ₈ , (Na;K)(Si ₃ Al)O ₈]			
Βασσανίτης (CaSO ₄ ·0.5H ₂ O)			91
Γύψος (CaSO ₄)			3
CaO		1	

2.2. Σχεδιασμός μίγματος φαρίνας

Οι πρώτες ύλες ξηράνθηκαν και λειοτριβήθηκαν χωριστά προκειμένου να είναι 100% διερχόμενες από κόσκινο 90μm. Για κάθε μίγμα πρώτων υλών (φαρίνα) τα υλικά ζυγίστηκαν χωριστά και ομογενοποιήθηκαν με ξηρή ανάδευση για 60' σε κυλιόμενο κεραμικό μύλο μέσα στον οποίο είχαν προστεθεί σφαίρες από κορούνδιο. Η ολοκλήρωση της διαδικασίας ομογενοποίησης ελέγχθηκε μέσω απώλειας πύρωσης από 3 διαφορετικά σημεία του δοχείου. Η στοχευόμενη σύσταση του κλίνκερ επιλέχθηκε με γνώμονα τους γελιμίτη (C₄A₃S̄) και τερνεσίτη ως κυρίαρχες ορυκτολογικές φάσεις σε αυτό. Ειδικότερα, στόχος ήταν ο σχηματισμός ενός κλίνκερ με κυρίαρχη φάση τον Τερνεσίτη και την ύπαρξη του γελιμίτη ως παράγοντα ενεργοποίησης της διαδικασίας ενυδάτωσης του, καθώς κατά την αντίδραση ενυδάτωσης του παράγεται AH₃ σύμφωνα με τις αντιδράσεις (2) και (3)^[12,15]:



Στον πίνακα 3 φαίνεται η επιδιωκόμενη, άμεση και έμμεση, ορυκτολογική σύσταση του τελικού κλίνκερ. Η σύσταση του μίγματος της φαρίνας προέκυψε με αντίστροφο υπολογισμό μέσω των τροποποιημένων εξισώσεων Bogue για το σύστημα οξειδίων C-S-A-S̄^[21-22] και ήταν Ασβεστόλιθος 48,18%, Ιπτάμενη τέφρα 32,01% και FGD γύψος 19,81%.

Πίνακας 3. Θεωρητική, άμεση και έμμεση, ορυκτολογική σύσταση κλίνκερ κατά Bogue.

Άμεσοι στόχοι	%	Έμμεσοι στόχοι	%
		C ₅ S ₂ S̄	60,0
C ₄ A ₃ S̄	19,0	C ₄ A ₃ S̄	19,0
C ₂ S	59,0	C ₂ S	16,0
C \check{S}	22,0	C \check{S}	5,0
Σύνολο	100,0	Σύνολο	100,0

2.3. Κλινκεροποίηση

Το μίγμα της φαρίνας μορφοποιήθηκε σε σφαίρες των 50g με προσθήκη 15% νερού και αφέθηκε για 60 λεπτά εντός κλίβανου ξήρανσης, στους 100°C. Κατόπιν, τοποθετήθηκε σε κάψες πλατίνας και ψήθηκε για 30 και 60 λεπτά σε κλίβανο υψηλών θερμοκρασιών, στους 1150, 1200, 1250 και 1300°C με ρυθμό θέρμανσης 15°C/min, ενώ στη συνέχεια ψύχθηκε με δύο τρόπους: α) με ταχεία ψύξη με ρεύμα αέρος μέχρι θερμοκρασίας περιβάλλοντος και β) με αργή ψύξη μέχρι τους 950°C και κατόπιν ταχεία ψύξη μέχρι θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Δεδομένης της χρήσης βιομηχανικών παραπροϊόντων τα οποία περιέχουν υψηλές ποσότητες κρυσταλλικών φάσεων, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε θερμοκρασίες έως 1200°C, είναι απαραίτητη η αύξηση της θερμοκρασίας ίσως και πάνω από τους 1250°C προκειμένου να διασπαστούν πλήρως. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή αργής ψύξης είναι απαραίτητη για τον επανασχηματισμό του τερνεσίτη. Οι συνθήκες κλινεροποίησης των παραγόμενων κλίνκερ παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

2.4.Χαρακτηρισμός κλίνκερ

Στους πίνακες 5_α και 5_β παρουσιάζεται το ποσοστό ελευθέρως ασβέστου (fCaO) και η ορυκτολογική σύσταση των παραγόμενων κλίνκερ.

2.5.Ενυδάτωση των κλίνκερ και αξιολόγηση της υδραυλικής συμπεριφοράς

Από τα παραγόμενα κλίνκερ επιλέχθηκαν το A1-20/30/F και το B2-25/30/S(30'/950), προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά τους σε ενυδάτωση. Τα κλίνκερ αυτά προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη θεωρητικά (κατά Bogue) ζητούμενη ορυκτολογική σύσταση, ενώ έχουν παραχθεί με διαφορετική μέθοδο κλινκεροποίησης. Τα συγκεκριμένα κλίνκερ λειοτριβήθηκαν σε μύλο bond σε λεπτότητα Blaine 4500±100cm²/g. Μέρος από τα κλίνκερ ενυδατώθηκε με λόγο ν/τ 0,4 προκειμένου να μελετηθούν, μέσω XRD, τα προϊόντα ενυδάτωσης πραγματοποιώντας διακοπή της ενυδάτωσης με τη μέθοδο εναλλαγής διαλυτών μετά από διαστήματα 1, 3, 7 και 28 ημερών.

Πίνακας 4. Ονομασίες και συνθήκες κλινκεροποίησης των παραγόμενων κλίνκερ

Ονομασία δείγματος	Θερμοκρασία έψησης	Χρόνος έψησης	Ρυθμός ψύξης
A1-20/30/F	1200°C	30 λεπτά	Γρήγορος
A2-20/30/S(30'/950)		30 λεπτά	30' έως τους 950°C μετά γρήγορος
A3-20/60/F		60 λεπτά	Γρήγορος
A4-20/60/S(30'/950)		60 λεπτά	30' έως τους 950°C μετά γρήγορος
B1-25/30/F	1250°C	30 λεπτά	Γρήγορος
B2-25/30/S(30'/950)		30 λεπτά	30' έως τους 950°C μετά γρήγορος
B3-25/60/F		60 λεπτά	Γρήγορος
B4-25/60/S(30'/950)		60 λεπτά	30' έως τους 950°C μετά γρήγορος
C1-30/30/F	1300°C	30 λεπτά	Γρήγορος
C2-30/30/S(30'/950)		30 λεπτά	30' έως τους 950°C μετά γρήγορος
C3-30/30/S(45'/950)		30 λεπτά	45' έως τους 950°C μετά γρήγορος
C4-30/30/S(60'/950)		30 λεπτά	60' έως τους 950°C μετά γρήγορος
C5-30/60/F		60 λεπτά	Γρήγορος
D1-15/30/F	1150°C	30 λεπτά	Γρήγορος
D2-15/60/F		60 λεπτά	Γρήγορος
D3-15/60/S(30'/950)		60 λεπτά	30' έως τους 950°C μετά γρήγορος

Πίνακας 5α. Ορυκτολογική σύσταση και fCaO κλίνκερ παραγόμενων στους 1200 και 1250°C

Ορυκτολογικές φάσεις	A1	A2	A3	A4	Ορυκτολογική σύσταση %			
					B1	B2	B3	B4
C ₅ S ₂ S	50,0	58,0	46,8	41,3	14,8	43,8	4,2	36,8
C ₄ A ₃ S-o	4,5	6,2	5,2	4,0	4,9	5,5	5,2	3,9
C ₄ A ₃ S-cu	8,0	6,2	9,1	6,7	8,6	6,8	9,4	7,9
α-C ₂ S	4,0	2,5	-	5,3	-	1,4	1,0	1,3
β-C ₂ S	15,3	7,4	19,5	22,7	40,7	15,1	57,3	19,7
γ-C ₂ S	-	1,2	-	2,7	-	1,4	-	2,6
C ₄ AF	2,3	-	3,9	1,3	6,2	1,4	4,2	2,6
C ₃ A-cu	-	1,2	2,6	-	3,7	4,1	1,0	3,9
CŠ	4,5	4,9	3,9	2,7	12,3	9,6	10,4	9,2
γ-Fe ₂ O ₃	4,5	3,7	3,9	4,0	3,7	4,1	3,1	3,9
MgO	-	1,2	-	1,3	-	-	1,0	-
C ₂ AS	4,5	4,9	1,3	5,3	1,2	4,1	-	5,3
C ₂ K ₂ S ₃	2,3	2,5	3,9	2,7	3,7	2,7	-	2,6
fCaO	0,50	0,52	0,36	0,34	0,42	0,40	0,11	0,13

Πίνακας 5β. Ορυκτολογική σύσταση και fCaO κλίνκερ παραγόμενων στους 1300 και 1150°C

Ορυκτολογικές φάσεις	C1	C2	C3	C4	C5	Ορυκτολογική σύσταση %		
						D1	D2	D3
C ₅ S ₂ S	7,3	4,8	3,8	3,8	-	53,1	60,4	57,1
C ₄ A ₃ S-o	11,0	6,0	5,1	3,8	9,2	6,1	6,3	4,8
C ₄ A ₃ S-cu	9,8	9,6	8,9	9,0	8,2	7,1	6,3	6,0
α-C ₂ S	25,6	4,8	3,8	2,6	31,6	3,1	4,0	1,2
β-C ₂ S	20,7	36,1	43,0	39,7	29,6	14,3	7,5	7,1
γ-C ₂ S	-	2,4	-	-	-	-	-	1,2
C ₄ AF	2,4	7,2	6,3	9,0	2,0	2,0	2,1	2,4
C ₃ A-cu	4,9	-	1,3	2,6	5,1	-	-	-
CŠ	12,2	19,3	13,9	16,7	5,1	4,1	4,2	7,1
γ-Fe ₂ O ₃	1,2	3,6	3,8	3,8	1,0	4,1	4,2	3,6
MgO	-	-	-	-	-	-	-	1,2
C ₂ AS	-	2,4	6,3	5,1	2,0	3,1	3,1	4,8
C ₂ K ₂ S ₃	4,9	3,6	3,8	3,8	6,1	3,1	2,1	3,6
fCaO	0,25	0,22	0,26	0,16	0,08	0,25	0,22	0,40

Η υδραυλικότητα των επιλεγμένων κλίνκερ καθώς και μιγμάτων τους με 5% και 10% γύψο εξετάστηκε με τη μέθοδο της ισόθερμου θερμιδομετρίας στους 20°C κάνοντας χρήση θερμιδομέτρου CALMETRIX I-CAL 2000.

2.6. Προετοιμασία κονιαμάτων και δοκιμή αντοχής σε θλίψη

Για την αξιολόγηση των μηχανικών αντοχών προετοιμάστηκαν δοκίμια κονιάματος με χρήση των παραχθέντων κλίνκερ, γύψου, πρότυπης άμμου και νερού. Το κάθε κλίνκερ αναμίχθηκε με 5% και 10% γύψο και στη συνέχεια προστέθηκε πρότυπη άμμος και νερό σε αναλογία νερό προς τσιμέντο (ν/τ) 0,5, σύμφωνα με το EN 196-1. Κατασκευάστηκαν δοκίμια 40x40x160mm τα οποία συντηρήθηκαν σε συνθήκες 98% Σ.Υ και 22°C για 3, 7 και 28 ημέρες οπότε και πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές αντοχής σε θλίψη.

3. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

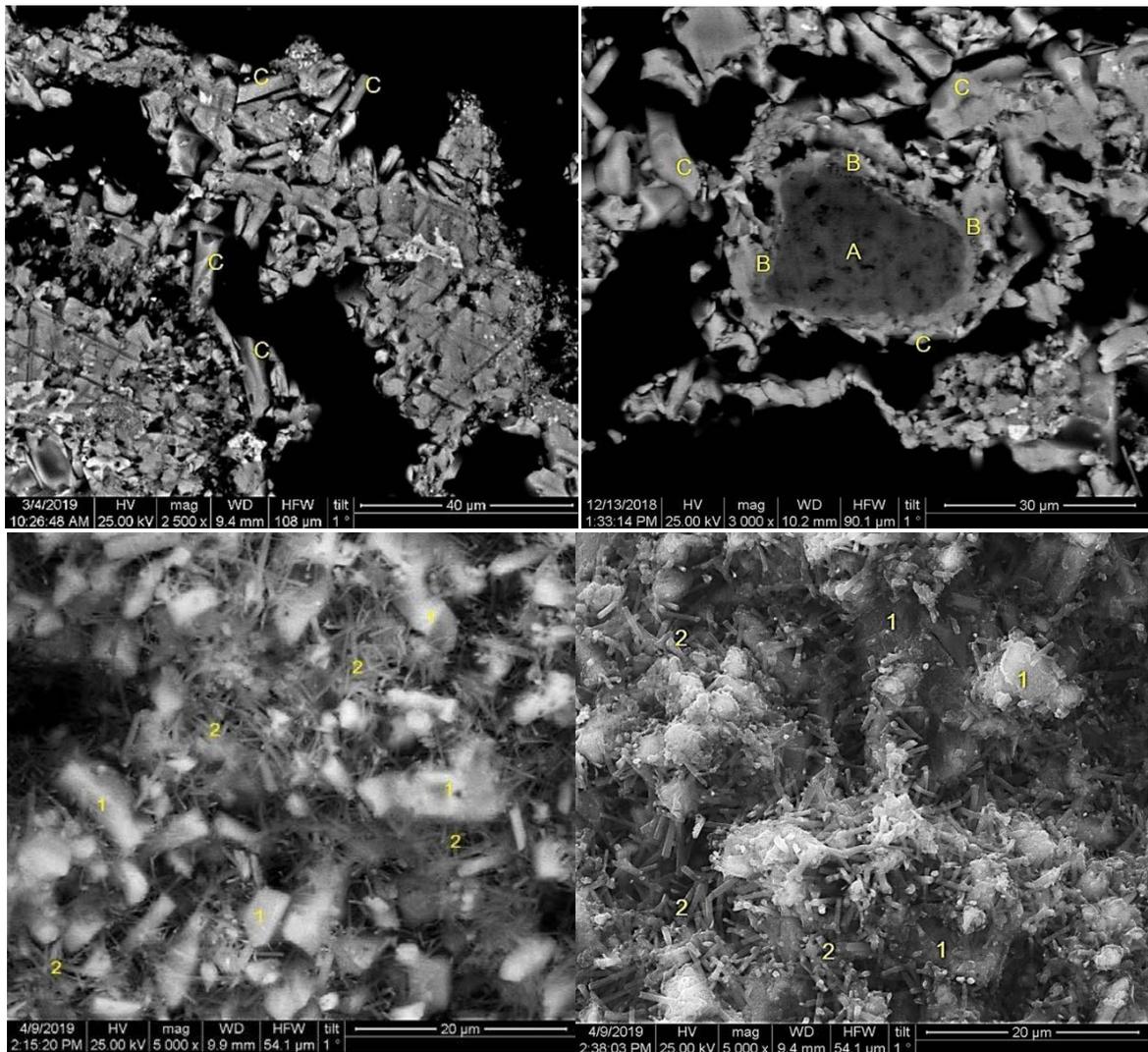
3.1. Παραγωγή Τερνεσιτικού-Βελιτικού-Θειοαργλικού κλίνκερ

Η θερμοκρασία έψησης παίζει καθοριστικό ρόλο στο σχηματισμό του τερνεσίτη. Είναι φανερό ότι ο τερνεσίτης μπορεί να παραχθεί σε υψηλό ποσοστό με κλινκεροποίηση ενός σταδίου, εφόσον η θερμοκρασία βρίσκεται εντός του θερμοκρασιακού προφίλ σχηματισμού του (950-1200°C), ενώ ήδη από τους 1200°C, για παρατεταμένο χρόνο έψησης, αρχίζει να διασπάται ξανά. Κατά την έψηση στους 1300°C για 60' ο τερνεσίτης διασπάστηκε πλήρως,

ενώ για μικρό χρόνο έψησης στους 1300°C παραμένει σε μικρό ποσοστό (7%) στο κλίνκερ. Το ποσοστό του βελίτη στο κλίνκερ είναι επίσης σε άμεση συνάρτηση με τη θερμοκρασία και αντιστρόφως ανάλογο με το ποσοστό του τερνεσίτη στο κλίνκερ, επιβεβαιώνοντας την αντίδραση (1) παραπάνω. Η εφαρμογή ταχείας ψύξης αποτρέπει το σχηματισμό του ασταθούς πολύμορφου γ -C₂S, καθώς δεν εμφανίζεται σε κανένα από τα παραγόμενα κλίνκερ στα οποία εφαρμόστηκε αυτή, ενώ ευνοεί τη σταθεροποίηση του β -C₂S ως κύριο πολύμορφο του βελίτη. Η εφαρμογή αργής ψύξης μέχρι τους 950°C, ωστόσο, επέτρεψε σε κάποιες περιπτώσεις τον επανασχηματισμό του τερνεσίτη σε ικανοποιητικά ποσοστά. Στους 1250°C η συγκέντρωση του αυξήθηκε από 15% σε 44%, όμως κάτι αντίστοιχο δε κατέστη εφικτό στους 1300°C ακόμα και για μεγαλύτερους χρόνους αργής ψύξης (45' και 60'). Ο γελιμίτης σχηματίζεται στην κυβική και ορθορομβική του δομή σε μικρότερο όμως ποσοστό από το επιθυμητό, για τις θερμοκρασίες έως 1250°C. Στους 1300°C το ποσοστό σχηματισμού του είναι πολύ κοντά με το θεωρητικό, ενώ φαίνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί τη σταθεροποίηση της ορθορομβικής δομής έναντι της κυβικής. Ο αργός ρυθμός ψύξης, ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες, ευνοεί το σχηματισμό της κυβικής δομής σε μεγαλύτερο ποσοστό έναντι της ορθορομβικής.

3.2. Επίδραση των συνθηκών κλινκεροποίησης στη μικροδομή

Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συνέβαλε στη μείωση του πορώδους του κλίνκερ και την περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή των κρυσταλλικών σχηματισμών σε αυτό. Η αργή ψύξη επίσης, βοήθησε στη διατήρηση της ομοιόμορφης κατανομής των σχηματισμών αυτών μέσα στη δομή των κλίνκερ. Κατά την αργή ψύξη ο τερνεσίτης σχηματίζει επιμήκεις ραβδόμορφους κρυστάλλους (Εικόνα 1a – περιοχή C). Από τη μικροσκοπική παρατήρηση της εικόνας 1b, η ανάλυση SEM/EDS ανέδειξε την παρουσία μεγάλου κόκκου χαλαζία (περιοχή A) με σχηματισμούς βελίτη στη διεπιφάνεια (περιοχή B) και σχηματισμούς κυρίως τερνεσίτη στην εξωτερική στοιβάδα (περιοχές C). Αυτό μαρτυρά ότι η παρουσία χαλαζία (πολύ κοινή κρυσταλλική φάση στην περίπτωση των χαμηλής ποιότητας πρώτων υλών) ενισχύει το σχηματισμό βελίτη, ως πρόδρομη φάση, ακολουθούμενου από το σχηματισμό τερνεσίτη, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τα ευρήματα προηγούμενων μελετών^[19]. Κατά τις πρώτες ημέρες ενυδάτωσης του κλίνκερ A1-20/30/F, παρατηρείται μεγάλο πορώδες με χαρακτηριστικά κενά μεταξύ των άνυδρων φάσεων και των βελονοειδών προϊόντων ενυδάτωσης (εικόνα 1c, περιοχή 2) καταδεικνύοντας τη συνεχιζόμενη ενυδάτωση του κλίνκερ. Μεγάλοι αδιάλυτοι κόκκοι παρατηρούνται στη δομή του κλίνκερ οι οποίοι σύμφωνα με την ανάλυση EDS κυρίως αποτελούνται από κόκκους τερνεσίτη (εικόνα 1c, περιοχή 1). Μετά από 28 ημέρες ενυδάτωσης, ο βαθμός ενυδάτωσης έχει αυξηθεί και το πλέγμα έχει συμπυκνωθεί σημαντικά. Στην εικόνα 1d φαίνονται ινώδεις ενυδατωμένες φάσεις (περιοχή 2) οι οποίες έχουν αναπτυχθεί μέσα στη δομή του δείγματος και μόλις λίγοι, μέσου μεγέθους μη-ενυδατωμένοι κόκκοι έχουν μείνει (περιοχή 1). Οι άνυδρες φάσεις είναι κυρίως πολυγωνικοί κρύσταλλοι τερνεσίτη. Η ανάλυση SEM/EDS δεν ανέδειξε τα τυπικά προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου παρόλο που αυτά φάνηκαν μέσω της ορυκτολογικής ανάλυσης.



Εικόνα 1. Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας SEM μη ενυδατώνων κλίνκερ (1a-πάνω αριστερά, 1b-πάνω δεξιά) και ενυδατωμένων κλίνκερ μετά από 1 ημέρα (1c-κάτω αριστερά) και 28 ημέρες (1d-κάτω δεξιά) ενυδάτωσης.

3.3. Σχηματισμός ένυδρων φάσεων κατά την ενυδάτωση 1, 3, 7 και 28 ημερών

Στον πίνακα 6 παρουσιάζεται ο βαθμός κατανάλωσης των ενεργών φάσεων του κλίνκερ και οι ενυδατωμένες φάσεις που σχηματίστηκαν. Παρατηρείται η άμεση κατανάλωση του γελμίτη και του ανυδρίτη, ήδη από τις πρώτες 24 ώρες ενυδάτωσης, προς σχηματισμό ετρινγκίτη σύμφωνα με την αντίδραση (2).

Η εμφάνιση του Κατοίτη στις σχηματιζόμενες φάσεις μαρτυρά την παράλληλη πραγματοποίηση των παρακάτω αντιδράσεων, σε συνδυασμό με την ενυδάτωση του τερνεσίτη:



όπου στην προκειμένη περίπτωση ο Strätlingite (C_2ASH_8) παράγεται από την ενυδάτωση του τερνεσίτη παρουσία AH_3 [23-25].

Πίνακας 6. Βαθμός κατανάλωσης των ενεργών ορυκτολογικών φάσεων των κλίνκερ και ποσοστό σχηματιζόμενων ενυδατωμένων φάσεων, μέσω ποσοτικής ανάλυσης Rietveld.

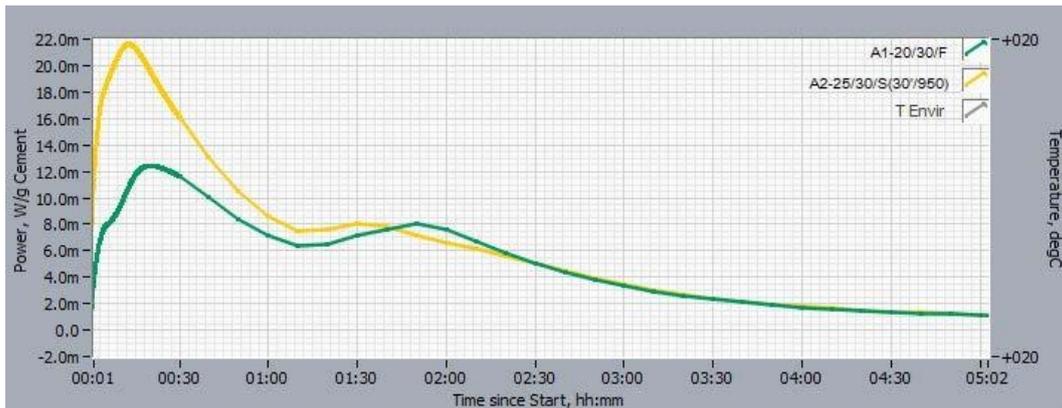
	A1-20/30/F				B2-25/30/S(30°/950)			
	1-ημ.	3-ημ.	7-ημ.	28-ημ.	1-ημ.	3-ημ.	7-ημ.	28-ημ.
Βαθμός κατανάλωσης (%)								
$\Sigma C_4A_3\check{S}$	100	100	100	100	100	100	100	100
ΣC_2S	43	38	27	53	39	39	44	44
$C\check{S}$	100	100	100	100	100	100	100	100
$C_5S_2\check{S}$	48	32	30	56	57	61	63	63
Σχηματισμός ενυδατωμένων φάσεων (%)								
Etringite	16	23	1	1	16	1	1	2
Fe-Etringite	1	1	22	15	1	15	15	13
AF _m	-	-	-	-	-	-	-	-
C ₂ ASH ₈	-	-	-	-	-	-	-	-
Tobermorite	1	1	-	-	1	-	-	-
Katoite	1	2	-	3	1	1	1	1
Άμορφο	37	17	22	45	46	50	51	54

Ο τερνεσίτης, σε αντίθεση με αναφορές προηγούμενων ερευνών^[2,10,13-16] σύμφωνα με τις οποίες είναι υδραυλικά ανενεργός, παρουσιάζει δραστηριότητα η οποία αυξάνεται με την εφαρμογή του σύνθετου σεναρίου κλινκεροποίησης. Αποδεικνύεται επίσης ότι στα τερνεσιτικά-βελιτικά-θειοαργυλικά κλίνκερ ο τερνεσίτης παρουσιάζει μεγαλύτερη δραστηριότητα έναντι του βελίτη, σε συμφωνία με προηγούμενες έρευνες^[18]. Παρατηρείται ωστόσο, παράλληλη ενεργοποίηση και των δύο αυτών φάσεων κάτι που έρχεται σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες που ήθελαν τον τερνεσίτη να μπλοκάρει την ενεργοποίηση του βελίτη, λόγω του υπερκορεσμού του διαλύματος των πόρων σε Si κατά τη διαλυτοποίηση του τερνεσίτη^[18]. Στα προϊόντα ενυδάτωσης δεν ανιχνεύτηκαν AF_m φάσεις, είναι όμως πολύ πιθανό αυτές να βρίσκονται μεταξύ των ενυδατωμένων άμορφων φάσεων.

3.4.Αξιολόγηση της πορείας ενυδάτωσης

Πρώιμη ενυδάτωση

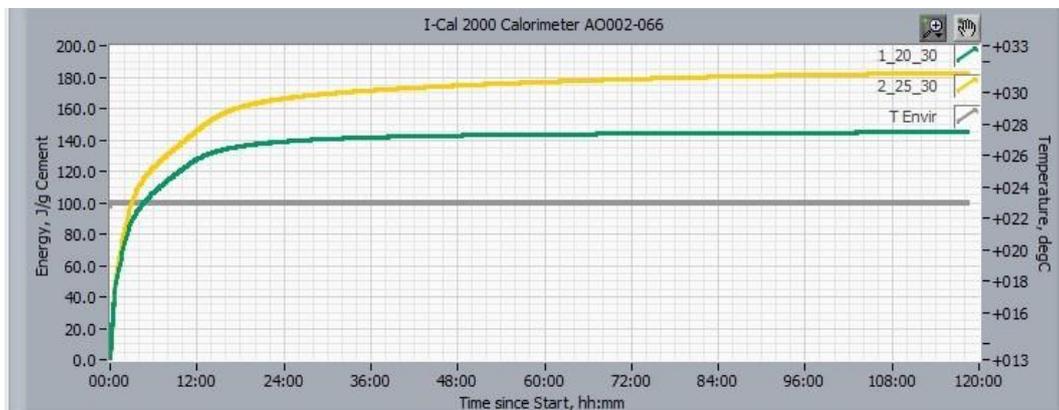
Η πρώιμη ενυδάτωση των κλίνκερ αποκαλύπτει τρεις εξώθερμες κορυφές κατά τις πρώτες 2 ώρες της ενυδάτωσης. Η πρώτη κορυφή αποδίδεται στη διαλυτοποίηση-ενυδάτωση του κλίνκερ, η δεύτερη κορυφή στην αντίδραση (2) του γελιμίτη με τον ανυδρίτη προς σχηματισμό ετριγκίτη, ενώ η τρίτη κορυφή πιθανότατα δηλώνει την ενυδάτωση περίσσειας ποσότητας γελιμίτη μετά την κατανάλωση της διαθέσιμης ποσότητας του ανυδρίτη, σύμφωνα με την αντίδραση (3). Ιδιαίτερα στο κλίνκερ A1 η τρίτη κορυφή εμφανίζεται σαφώς ισχυρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του κλίνκερ B2, καθώς στο κλίνκερ B2 η ποσότητα του διαθέσιμου ανυδρίτη υπολείπεται σημαντικά της στοιχειομετρικά απαιτούμενης για την πλήρη ενυδάτωση του διαθέσιμου γελιμίτη.



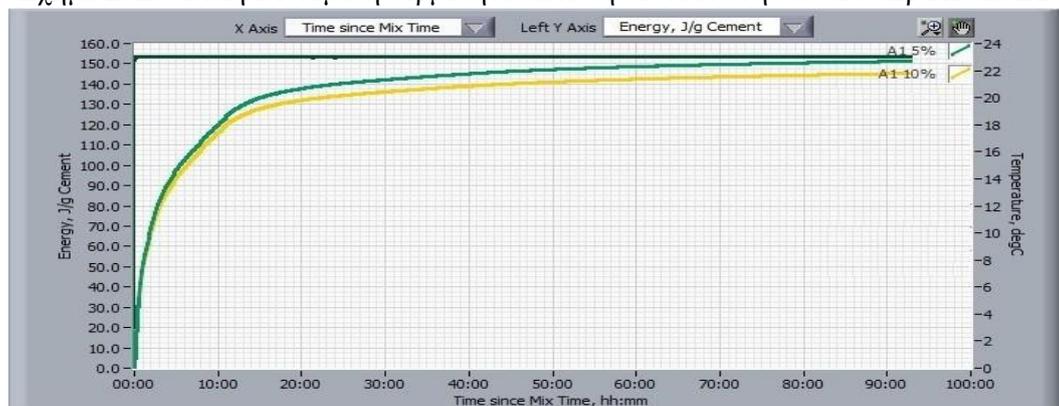
Σχήμα 1. Καμπύλη ροής θερμότητας ενυδατωμένων κλίνκερ κατά τις πρώτες ώρες ενυδάτωσης

Θερμότητα ενυδάτωσης κλίνκερ και τσιμέντων

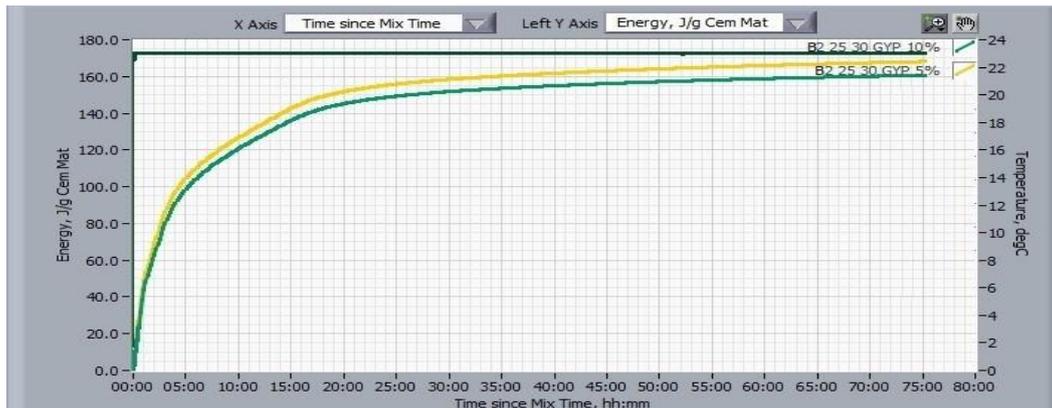
Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η συνολική εκλυόμενη θερμότητα από την ενυδάτωση των κλίνκερ A1 και B2, χωρίς προσθήκη γύψου. Το κλίνκερ B2 παρουσίασε αυξημένη συνολική εκλυόμενη θερμότητα (~180J/g) σε σχέση με το κλίνκερ A1 (140J/g). Κατά την προσθήκη γύψου, το κλίνκερ A1 παρουσίασε τη μέγιστη συνολική εκλυόμενη θερμότητα για ποσοστό προσθήκης 5% που αποτελεί ένδειξη του βέλτιστου ρυθμού ενυδάτωσης για το εξεταζόμενο διάστημα. Η προσθήκη 5% γύψου αύξησε τη συνολική εκλυόμενη θερμότητα στα 150J/g, ενώ περαιτέρω προσθήκη γύψου (10%) επέφερε μείωση κατά 5J/g. Η ενυδάτωση του κλίνκερ B2 με προσθήκη 5% και 10% γύψου σε καμία περίπτωση δε συνεισέφερε θετικά στο ρυθμό ενυδάτωσης του κλίνκερ αφού και στις δύο περιπτώσεις οδήγησε σε μείωση της συνολικά εκλυόμενης θερμότητας. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στα σχήματα 2 και 3.



Σχήμα 2. Συνολική εκλυόμενη θερμότητα κατά την ενυδάτωση των κλίνκερ A1 και B2



Σχήμα 3. Συνολική εκλυόμενη θερμότητα κατά την ενυδάτωση μιγμάτων του κλίνκερ A1 με 5% και 10% γύψο



Σχήμα 4. Συνολική εκλυόμενη θερμότητα κατά την ενυδάτωση μιγμάτων του κλίνκερ B2 με 5% και 10% γύψο

3.5.Αξιολόγηση των μηχανικών αντοχών

Όλα τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν παρουσίασαν έντονη διόγκωση ήδη από την πρώτη ημέρα ωρίμανσης με αποτέλεσμα να μη μπορεί να αξιολογηθεί η αντοχή τους σε θλίψη. Η συμπεριφορά τους αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της υψηλής τιμής του μοριακού λόγου $C\dot{S}/C_4A_3\dot{S}$ των δύο κλίνκερ. Ο λόγος αυτός «M» εκφράζει τη διαστασιολογική σταθερότητα του θειοαργλικού κλίνκερ κατά την ενυδάτωση. Οι τυπικές τιμές του μοριακού λόγου “M” για θειοαργλικά κλίνκερ με ιδιότητες ταχείας πήξης και ξήρανσης, κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1,5. Μοριακοί λόγοι $M > 1,5$ χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διογκούμενων και self-stressing θειοαργλικών τσιμεντών^[26-29]. Συγκεκριμένα για το κλίνκερ A1 ο λόγος έχει τιμή $M=1,61$ και για το κλίνκερ B2 είναι $M=3,50$. Το κλίνκερ B2, επαληθεύοντας τα προηγούμενα, παρουσίασε σημαντικά πιο έντονη διόγκωση σε σχέση με το A1.



Εικόνα 2. Διογκωμένα δοκίμια κλίνκερ A1 και B2

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία εστιάστηκε στην αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών μεθόδων κλινκεροποίησης στη σύσταση και τις ιδιότητες τερνεσιτικών-βελιτικών-θειοαργλικών κλίνκερ με παράλληλη αξιοποίηση ελληνικών βιομηχανικών παραπροϊόντων ως πρώτες ύλες. Ο σχηματισμός τερνεσίτη βρέθηκε να συνδέεται άμεσα με τη μέθοδο κλινκεροποίησης, καθώς και η δομή και η δραστηκότητα του τελικού κλίνκερ. Τα κλίνκερ που παράγονται μέσω σύνθετου προφίλ έγνησης, υιοθετώντας μια διαδικασία αργής ψύξης ως δεύτερο στάδιο κλινκεροποίησης, παρουσιάζουν πιο ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή και αυξημένη δραστηκότητα κατά τις πρώτες τουλάχιστον ώρες ενυδάτωσης. Φαίνεται επίσης, ότι ο τερνεσίτης αποτελεί μια δραστηκή φάση όταν ενυδατώνεται εντός ενός θειοαργλικού συστήματος με αυξημένη δραστηκότητα έναντι του βελίτη.

Δε μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τις μηχανικές αντοχές των σχηματιζόμενων κλίνκερ και τσιμέντων λόγω της έντονης διόγκωσης και αποσάθρωσης που παρουσίασαν. Στη συνέχεια της έρευνας εξετάζονται εναλλακτικά μίγματα φαρινών με στόχο τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του κλίνκερ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θέλουν να απευθύνουν ευχαριστίες προς τον Δρ. Αντώνιο Στρατάκη από τη σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη συνεισφορά του στη διεξαγωγή των ορυκτολογικών αναλύσεων XRD-Rietveld και τον Δρ. Ιωάννη Καρατάσιο από το Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» για τη συνεισφορά του στη διεξαγωγή των αναλύσεων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας SEM/EDS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. Hanein, M.S. Imbabi, F.P. Glasser, M.N. Bannerman, “Lowering the carbon footprint and energy consumption of cement production: a novel calcium sulfoaluminate cement production process”, Proceedings of the 1st International Conference on Grand Challenges in Construction Materials, Los Angeles, USA, 2016.
- [2] N. Sherman, J. Beretka, L. Santoro, G.L. Valenti, “Long-term behaviour of hydraulic binders based on calcium sulfoaluminate and calcium sulfosilicate”, Cement and Concrete Research 25 (1), pp. 113-126, 1995.
- [3] E.M. Gartner, “Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements”, Cement and Concrete Research 34, pp. 1489–1498, 2004.
- [4] J.S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, E.M. Gartner, “Sustainable development and climate change initiatives”, Cement and Concrete Research 38 (2), pp. 115–127, 2008.
- [5] E. Irran, E. Tillmanns, G. Hentschel, “Ternesite, Ca₅(SiO₄)₂SO₄, a new mineral from the Ettringer Bellerberg/Eifel, Germany”, Mineralogy and Petrology 60, pp. 121-132, 1997.
- [6] M.W. Pryce, “Calcium sulphosilicate in lime-kiln wall coating”, Mineralogical Magazine 38, pp. 968-971, 1972.
- [7] Y.B. Pliego-Cuervo, F.P. Glasser, “The role of sulphates in cement clinkering: subsolidus phase relations in the system CaO–Al₂O₃–SiO₂–SO₃”, Cement and Concrete Research 9, pp. 51–56, 1979.
- [8] W. Gutt, M.A. Smith, “A new calcium silicosulphate,” Nature 210, pp. 408–409, 1966.
- [9] T. Hanein, I. Galan, F.P. Glasser, S. Skalamprinos, A. Elhoweris, M.S. Imbabi, M.N. Bannerman, “Stability of ternesite and the production at scale of ternesite-based clinkers”, Cement and Concrete Research 98, pp. 91–100, 2017.
- [10] S. Sahu, “Developments in Low energy cements”, Ceramics-Silikáty 38, pp. 191-200, 1994.
- [11] N. Ukrainczyk, N. Franković Mihelj, J. Šipušić, “Calcium Sulfoaluminate Eco-Cement from Industrial Waste”, Chemical and Biochemical Engineering Quarterly 27 (1), pp. 83-93, 2013.
- [12] F. Bullerjahn, D. Schmitt, M.B. Haha, “Effect of raw mix design and of clinkering process on the formation and mineralogical composition of (ternesite) belite calcium sulphoaluminate ferrite clinker”, Cement and Concrete Research 59, pp. 87-95, 2014.
- [13] M. Marroccoli, F. Montagnaro, M.L. Pace, A. Telesca, G.L. Valenti, “Synthesis of calcium sulfoaluminate cements from blends of coal combustion ashes with flue gas desulfurization gypsum”, Processes and Technologies for a Sustainable Energy, Ischia, Italy, 2010, doi: 10.4405/ptse2010.P1.8
- [14] M. Marroccoli, M.L. Pace, A. Telesca, G.L. Valenti, “Synthesis of Calcium

Sulfoaluminate Cements from Al₂O₃-Rich By-products from Aluminum Manufacture”, Second international Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy, 2010.

[15] S. Skalamprinos, I. Galan, T. Hanein, F. Glasser, “Enthalpy of formation of ye’elimite and ternesite”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 131, pp. 2345-2359, 2018.

[16] J. Beretka, R. Cioffi, M Marroccoli, G.L. Valenti, “Energy-saving cements obtained from chemical gypsum and other industrial wastes”, Waste Management 16, pp. 231-235, 1996.

[17] W. Dienemann, D. Schmitt, F. Bullerjahn, “Belite-Calciumsulfoaluminate-Ternesite (BCT) - A new low-carbon clinker Technology”, Cement International 11, pp. 100–109, 2013.

[18] F. Bullerjahn, M. Zajac, M.B. Haha, “CSA raw mix design: effect on clinker formation and reactivity”, Materials and Structures 48, pp. 3895–3911, 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0451- z.

[19] M.B. Haha, F. Bullerjahn, M. Zajac, “On the reactivity of ternesite” 14th ICCC, Beijing, 2015.

[20] F. Bullerjahn, D. Schmitt, M.B. Haha, B. Batog, M. Zajac, “Calcium sulfoaluminate cement with ternesite”, US 9,073,784 B2, 2015.

[21] D. Adolfsson, “Steelmaking Slags as Raw Material for Sulphoaluminate Belite Cement”, Luleå University of Technology, Department of Chemical Engineering and Geoscience, 2006.

[22] J. Strigáč, S. Sahu, M. Lopašovská, R. Ďurovčíková, V. Kovár, J. Majling, “Phase Compatibility in the system CaO-SiO₂-Al₂O₃-SO₃”, Ceramics Silikáty 42 (3), pp. 90–98, 1998.

[23] D. Gastaldi, G. Paul, L. Marchese, S. Irico, E. Boccaleri, S. Mutke, L. Buzzi, F. Canonico, “Hydration products in sulfoaluminate cements: Evaluation of amorphous phases by XRD/solid- state NMR”, Cement and Concrete Research 90, p.p. 162-173, 2016.

[24] V. Morin, G. Walenta, E. Gartner, P Termkhajornkit, I. Baco, J.M. Casabonne, “Hydration of a Belite-Calcium Sulfoaluminate-Ferrite cement : Aether™”, 13th ICCC, Madrid, 2011.

[25] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, J. Labrincha, V.M. John, “Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures”, p.p. 503-507, Woodhead Publishing, 2013.

[26] L. Zhang, “Microstructure and performance of calcium sulfoaluminate cements”, Ph.D. thesis, University of Aberdeen, 2000.

[27] F. Winnefeld, L.H.J. Martin, C.J. Müller, “Using gypsum to control hydration kinetics of CSA cements”, Construction and Building Materials 155, pp.154-163, 2017.

[28] F. Winnefeld, B. Lothenbach, “Thermodynamic modeling of hydration calcium sulfoaluminate cements blended with mineral additions”, 1st ICSC (2013), China.

[29] Chinese Standard GB 20472-2006, “Sulphoaluminate cement”.

Μελέτη της πορείας ενυδάτωσης και της αντίστασης σε περιβάλλον θειϊκών, τσιμεντών με ασβεστόυχο ιπτάμενη τέφρα.

**Ε. Μπαδογιάννης¹, Ι. Μπαλίας¹, Σ. Αντίοχος², Δ. Φραγκούλης², Κ. Κουτσοδόντης²,
Ε. Χανιωτάκης²**

¹Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 157 73, Ζωγράφου, Αθήνα

²Τμήμα Έρευνας και Ανάπτυξης Προϊόντων, Α.Ε. ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΤΙΤΑΝ, Εργοστάσιο Καμαρίου, 19200 Ελευσίνα.

Λέξεις κλειδιά: τσιμέντα ανθεκτικά σε επίθεση θειϊκών (SR), ποζολανικά τσιμέντα, ασβεστόυχο ιπτάμενη τέφρα, θερμότητα ενυδάτωσης, διόγκωση, ανθεκτικότητα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 επιτρέπει τη χρήση μόνο πυριτικής ιπτάμενης τέφρας (V) για τη σύνθεση τσιμεντών ανθεκτικών σε περιβάλλον θειϊκών (τύπου SR). Συμπληρωματικά της πειραματικής διερεύνησης της δυνατότητας ένταξης ποζολανικών τσιμεντών (CEM IV/A) που περιέχουν Ελληνική ασβεστόυχο ιπτάμενη τέφρα (W) στην κατηγορία των τσιμεντών τύπου SR, στην παρούσα εργασία μελετάται η πορεία της ενυδάτωσης τους. Παρασκευάστηκαν έξι (6) εργαστηριακά ποζολανικά τσιμέντα, με αντικατάσταση μέρους του κλίνκερ με ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης (W₁) και Πτολεμαΐδας (W₂), φυσική ποζολάνη (P) και ασβεστόλιθο (L), σε συνολικό ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ έως και 35%. Ως αναφορά χρησιμοποιήθηκαν ένα τσιμέντο τύπου I, ανθεκτικό σε θειϊκά (CEM I-SR-5) και ένα τσιμέντο τύπου CEM IV/A-SR με αντικατάσταση κλίνκερ από φυσική ποζολάνη σε ποσοστό 30%. Αρχικά μελετήθηκε η αντίσταση τους σε περιβάλλον θειϊκών, σύμφωνα με το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C 1012. Ταυτόχρονα όμως μελετήθηκε και η πορεία της ενυδάτωσης τους όσον αφορά στην θερμότητα ενυδάτωσης, στα προϊόντα της ενυδάτωσης και στα προϊόντα της επίδρασης των θειϊκών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα σύνθετα τσιμέντα με την Ελληνική ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζονται ανθεκτικά σε περιβάλλον θειϊκών καθώς στους 6 μήνες σε κανένα από αυτά δεν καταγράφηκε μεταβολή μήκους μεγαλύτερη του ορίου 0.1%. Έτσι, παρά το γεγονός ότι η περιεκτικότητα γύψου και ετρινγκίτη στις 28 ημέρες υπολογίζεται αρκετά υψηλή στα σύνθετα τσιμέντα και ανάλογα με τη σύνθεσή τους, αυτά εξακολουθούν να θεωρούνται ανθεκτικά σε περιβάλλον θειϊκών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ASTM C 1012. Μάλιστα, είναι οι σχηματιζόμενες ποσότητες γύψου και ετρινγκίτη, καθώς και η απομείωση της ποσότητας του C₃A και του Ca(OH)₂, που επιβεβαιώνουν τον βαθμό διόγκωσης κάθε τσιμεντού. Τέλος, η θερμότητα ενυδάτωσης που εκλύεται κατά την ενυδάτωση τους είναι μεν αθροιστικά σημαντική στις πρώτες ώρες της ενυδάτωσης, ωστόσο μετά τις πρώτες 3 ημέρες κινείται στα επίπεδα των τσιμεντών αναφοράς

Study on hydration progress and sulfate resistance of calcareous fly ash pozzolanic cements

E. Badogiannis¹, I. Balias¹, S. Antiohos², D. Fragoulis², K. Koutsodontis², E. Chaniotakis²

¹ Reinforced Concrete Laboratory, School of Civil Engineering NTUA, 5 Iroon Polytechniou str. 157 73 Athens

² Group R&D and Quality Department, Titan Cement Company S.A., Kamari Plant, Elefsina, Greece.

Key words: sulfate resisting cements (SR), pozzolanic cements, calcareous fly ash, hydration heat, expansion, durability

ABSTRACT: According to EN1971 -1, siliceous fly ash is only allowed to be used for the production of sulfate resisting cements (SR type). In addition to the experimental investigation on the potential use of Greek calcareous fly ash (W) for the production of pozzolanic cements (CEM IV/A), the current paper discusses the hydration progress of these cements. Thus, six (6) pozzolanic cements were produced, in which clinker was replaced with fly ash from Megalopolis (W₁) or from Ptolemaida (W₂), natural pozzolan (P) and limestone (L), at levels up to 35%. As reference cements, a type I sulfate resisting cement (CEM I-SR-5) and a pozzolanic cement CEM IV/A-SR were used in which clinker was replaced by 30 % natural pozzolana. Initially, it was examined whether the produced cements fulfill the sulfate resistance requirements of ASTM C 1012. Hydration progress was also evaluated, as far as hydration heat and products were concerned, before and after the sulfate resistance test. The results indicate that Greek fly ashes of high CaO content, can replace the clinker in order to produce pozzolanic SR cements, since all the cements after a 6-month exposure period, performed expansion below the standard's threshold of 0.1%. Therefore, despite the fact that in these pozzolanic cements and in correspondence to its composition, significant amounts of ettringite and gypsum were traced after 28 days of exposure, they could be still considered SR cements, as they conform to ASTM C 1012 requirements. Besides, the level of the detected amounts of gypsum and ettringite, as well as the decrease of C₃A and Ca(OH)₂ contents, verified the expansion level of each cement. Finally, the cumulative hydration heat of the pozzolanic cements although considerable in the first hours, after a 3-day period was similar to that of the reference SR cements.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δράση των θειϊκών είναι από τις πιο επιθετικές περιβαλλοντικές δράσεις οι οποίες επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των κατασκευών από σκυρόδεμα. Κατασκευές όπως προβλήτες, γέφυρες, θεμέλια και αγωγοί από σκυρόδεμα, καθόλη τη διάρκεια της ζωής τους εκτίθενται στην προσβολή θειϊκών. Η δράση θειϊκών στο σκυρόδεμα συμβαίνει όταν το σκυρόδεμα είναι σε επαφή με πηγή θειϊκών ιόντων, όπως τα υπόγεια ύδατα, το έδαφος ή το νερό της βροχής. Η επίδραση των θειϊκών ιόντων εκδηλώνεται με διόγκωση και ρηγμάτωση του σκυροδέματος, συνοδευόμενη από θρυμματισμό και εν τέλει απώλεια αντοχής (Menéndez et al, 2013).

Η προσβολή του τσιμέντου και του σκυροδέματος από τα θειϊκά ιόντα, μπορεί να οφείλεται στην εξωτερική δράση θειϊκών ιόντων του περιβάλλοντος. Μπορεί επίσης να εμφανιστεί εσωτερικά από το μηχανισμό του μεθυστέρου σχηματισμού ετρινγκίτη (Delayed Ettringite Formation-DEF). Η αυξημένη συγκέντρωση θειϊκών ιόντων στο εξωτερικό περιβάλλον, μπορεί να συμβαίνει είτε φυσιολογικά (θαλάσσιο περιβάλλον, έδαφος) είτε ως συνέπεια κάποιας διαταραχής (περιβαλλοντική μόλυνση). Η αυξημένη συγκέντρωση θειϊκών ιόντων

στο εσωτερικό του σκυροδέματος μπορεί να συμβεί λόγω των συστατικών του (Mehta et al, 2006).

Δύο παράγοντες θεωρούνται ως οι σημαντικότεροι οι οποίοι καθορίζουν την αντίσταση του σκυροδέματος στη δράση των θειικών: η χημική σύσταση του τσιμέντου και η διαπερατότητα του σκυροδέματος. Ειδικότερα, έχει αναγνωριστεί ότι ο έλεγχος της σύνθεσης του τσιμέντου και συγκεκριμένα της περιεκτικότητάς του σε αργιλικό τριασβέστιο (C_3A), καθορίζει την αντίσταση του στην προσβολή θειικών (Menéndez et al, 2013). Για παράδειγμα, παρόλο που και στα σύνθετα ποζολανικά τσιμέντα που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, ποζολάνη ή σκωρία, σχηματίζονται μονοθειικά ενυδατωμένα άλατα, δεν διατίθεται αρκετό Al_2O_3 για τον περαιτέρω μετασχηματισμό τους σε διογκούμενες φάσεις. Σε αυτά τα τσιμέντα, το Al_2O_3 δεσμεύεται σε προϊόντα ενυδάτωσης όπως ο υδροταλκίτης ή υδρογρανάτης και έτσι δεν υπάρχει δυνατότητα υποκατάστασης Ca^{2+} από τη δομή του C-S-H, προς το σχηματισμό μονοθειικών αλάτων. Επιπλέον, λόγω των ποζολανικών αντιδράσεων, η διαθεσιμότητα του $Ca(OH)_2$ είναι περιορισμένη και έτσι δεν είναι εφικτός ο εκ νέου σχηματισμός γύψου, που θα αντιδράσει με τα μονοθειικά για σχηματισμό δευτερογενούς ετρινγκίτη (Gollor et al, 1996). Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 (Πιν. 2), εκτός από τα τσιμέντα με χαμηλό ποσοστό C_3A , και τα σκωριοσιμέντα, προδιαγράφει ως τσιμέντα ανθεκτικά σε θειικά (SR) και τα ποζολανικά τσιμέντα, τα οποία μπορούν να περιέχουν μεταξύ άλλων και ιπτάμενη τέφρα. Ωστόσο, για την παρασκευή τους προβλέπεται η χρήση πυριτικής (siliceous fly ash) και όχι ασβεστούχου (calcareous fly ash) ιπτάμενης τέφρας.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι στο πλαίσιο της διερεύνησης της δυνατότητας ένταξης ποζολανικών τσιμέντων με Ελληνική ιπτάμενη τέφρα ασβεστούχου σύστασης στην κατηγορία των τσιμέντων τύπου SR, να μελετηθεί και να ερμηνευτεί η πορεία ενυδάτωσης τους σε περιβάλλον θειικών. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) διαφορετικές εργαστηριακές συνθέσεις ποζολανικών τσιμέντων με ανάμιξη συγκεκριμένης αναλογίας πρώτων υλών έτσι ώστε οι συνθέσεις να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου για τα ποζολανικά τσιμέντα (CEM IV) ανθεκτικά σε θειικά. Τα τσιμέντα μαζί με 2 τσιμέντα αναφοράς τύπου SR εκτέθηκαν σε περιβάλλον θειικών. Μελετήθηκε η αντίσταση των τσιμέντων στο περιβάλλον θειικών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1012 και τα προϊόντα ενυδάτωσης τους εντός διαλύματος θειικών. Ταυτόχρονα μελετήθηκε η θερμότητα ενυδάτωσης παστών από τα τσιμέντα που παρασκευάστηκαν.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Στον Πίνακα 1, δίνονται οι χημικές αναλύσεις όλων των πρώτων υλών, ενώ στον Πίνακα 2, η ορυκτολογική ανάλυση του κλίνκερ που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προγενέστερη μελέτη (Κορομηλάς, 2015), για την παρασκευή των ποζολανικών τσιμέντων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι κλίνκερ (K_1 , K_2), φυσική ποζολάνη (P), ασβεστόλιθος (L), γύψος (G) καθώς και δύο ιπτάμενες τέφρες W_1 και W_2 , διαφορετικής χημικής σύστασης.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση (%) κ.β. πρώτων υλών

	Κλίνκερ (K ₁)	Κλίνκερ (K ₂)	Ασβ/θος (L)	Γύψος (G)	I.T. (W ₁)	I.T. (W ₂)	Ποζολάνη (P)
SiO ₂	20.55	21.24	8.24	0.99	49.55	31.67	74.86
Al ₂ O ₃	4.85	4.43	0.83	0.99	17.64	13.12	11.19
Fe ₂ O ₃	3.73	4.68	0.52	0.01	8.85	5.06	1.29
CaO	64.78	65.17	49.97	32.37	13.78	33.78	1.79
MgO	3.51	1.19	0.47	0.99	2.77	4.53	0.21
K ₂ O	0.57	0.89	0.17	0.00	1.78	0.89	3.99
Na ₂ O	0.12	0.18	0.01	0.00	0.59	0.38	2.49
TiO ₂	0.25	0.21	0.03	-	0.84	0.58	-
SO ₃	1.28	0.92	0.09	43.75	2.28	6.95	0.10
Cl	0.03	0.04	0.00	-	-	-	-
LOI	0.33	1.04	39.66	20.88	1.94	3.04	4.08

Πίνακας 2. Ορυκτολογική σύσταση (%) κ.β. και δείκτες των δύο κλίνκερ

	Κλίνκερ (K ₁)	Κλίνκερ (K ₂)
C ₃ S	74.17	70.66
C ₂ S	6.77	10.42
C ₃ A	6.96	4.02
C ₄ AF	12.09	14.89
LSF	0.99	0.96
S _M	2.40	2.30
A _M	1.30	0.95

Ο συνολικός αριθμός των τσιμέντων που χρησιμοποιήθηκαν προς μελέτη είναι οκτώ (8). Στον Πίνακα 3 δίνονται οι συνθέσεις των τσιμέντων καθώς και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή τους. Όπως έχει αναφερθεί (Κορομηλάς, 2015), οι αναλογίες των πρώτων υλών επιλέχθηκαν κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του EN 197-1, που αφορούν στα τσιμέντα ανθεκτικά σε περιβάλλον θειικών, τύπου SR και έτσι προέκυψαν δύο (2) τσιμέντα αναφοράς που μπορούν να θεωρηθούν ως τσιμέντα τύπου SR, CEM I-SR-5 και CEM IV/A-SR. Μελετήθηκαν επίσης έξι (6) ποζολανικά τσιμέντα με ιπτάμενη τέφρα τα οποία κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες με βάση το είδος της I.T. Για κάθε ομάδα, χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 30%, 20% και 10%. Το ποσοστό του ασβεστόλιθου διατηρήθηκε και για τις έξι εργαστηριακές συνθέσεις σταθερό στο 5%, ενώ τα ποσοστά της γύψου (G) και της φυσικής ποζολάνης (P) υπολογίστηκαν έτσι ώστε το άθροισμα όλων των θειικών να μην υπερβαίνει το 3.50%.

Η λεπτότητα και το ειδικό βάρος των τσιμέντων των εργαστηριακών συνθέσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Επιπλέον αναφέρεται (Κορομηλάς, 2015) ότι και τα οκτώ (8) τσιμέντα που παρασκευάστηκαν εργαστηριακά, ικανοποιούν όλες τις σχετικές απαιτήσεις του προτύπου EN 197-1 αναφορικά με τη δοκιμή ποζολανικότητας, τη θλιπτική αντοχή και τον χρόνο αρχής και τέλους πήξης, προκειμένου να ενταχθούν στα τσιμέντα ανθεκτικά σε περιβάλλον θειικών.

Πίνακας 3. Κωδικοποίηση και αναλογίες (% κ.β.) α' υλών των τσιμέντων (Κορομηλάς, 2015)

α/α	Κωδικός τσιμέντου	K ₁	K ₂	G	P	W ₁	W ₂	L
1	CEM I	-	91.00	4.50	-	-	-	4.50
2	CEM IV/A P-30	62.10	-	4.50	28.40	-	-	5.00
3	CEM IV/A W ₁ -30	63.00	-	3.10	-	28.90	-	5.00
4	CEM IV/A W ₁ -20	62.70	-	3.60	9.50	19.20	-	5.00
5	CEM IV/A W ₁ -10	62.40	-	4.00	19.10	9.50	-	5.00
6	CEM IV/A W ₂ -30	65.00	-	-	-	-	30.00	5.00
7	CEM IV/A W ₂ -20	64.10	-	1.40	9.50	-	20.00	5.00
8	CEM IV/A W ₂ -10	63.10	-	2.90	19.00	-	10.00	5.00

Πίνακας 4. Ειδική επιφάνεια και ειδικό βάρος τσιμέντων (Κορομηλάς, 2015)

α/α	Κωδικός τσιμέντου	Ειδική επιφάνεια (cm ² /g)	Ειδικό βάρος
1	CEM I	3000	3.18
2	CEM IV/A P-30	4000	2.96
3	CEM IV/A W ₁ -30	4710	2.98
4	CEM IV/A W ₁ -20	4180	2.96
5	CEM IV/A W ₁ -10	4090	2.94
6	CEM IV/A W ₂ -30	5940	3.09
7	CEM IV/A W ₂ -20	5490	2.98
8	CEM IV/A W ₂ -10	4775	2.91

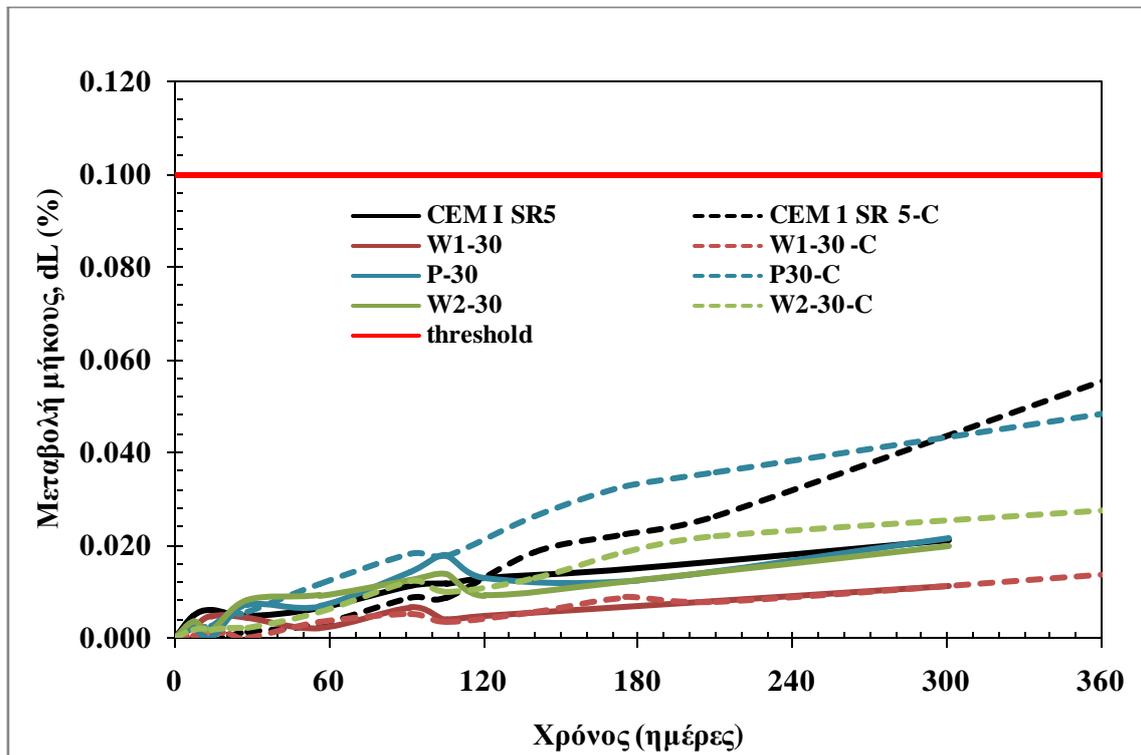
Η ανθεκτικότητα των τσιμέντων στο περιβάλλον θειικών μελετήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1012. Για κάθε τσιμέντο παράχθηκαν τέσσερα επιμήκη πρίσματα ορθογωνικής διατομής, διαστάσεων 25×25×285 (mm) και τρία κυβικά διαστάσεων 50×50×50 (mm). Η σύνθεση των πρισμάτων πραγματοποιήθηκε με βάση το πρότυπο ASTM C 305. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρασκευής του κονιάματος για κάθε σύνθεση, τα δοκίμια σε μήτρες τοποθετήθηκαν στο θάλαμο συντήρησης για 24h. Στη συνέχεια ξεκαλουπώθηκαν και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή νερού σε θερμοκρασία 23±2 °C. Τα κυβικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να διαπιστωθεί πότε τα δοκίμια θα έχουν αναπτύξει ικανοποιητική αντοχή (>20 MPa ±5 MPa), ώστε να εμβαπτιστούν σε διάλυμα θειικού νατρίου Na₂SO₄ συγκέντρωσης 50 g/L. Μετρήσεις μεταβολής του μήκους των πρισμάτων πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 490, πριν την εμβάπτιση μετά το πέρας της 1ης, 2ης, 3ης, 4ης, 8ης, 13ης, 15^{ης}, 20^{ης} και 30^{ης} εβδομάδας από τη στιγμή που τα πρίσματα εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα θειικού νατρίου.

Παράλληλα με την παρασκευή των κονιαμάτων παρασκευαστήκαν και πάστες τσιμέντων από όλες τις συνθέσεις με αναλογία w/c = 0,5 σε κύβους των 25*25*25 (mm) τα οποία εμβαπτίστηκαν στο ίδιο διάλυμα θειικών και ταυτόχρονα με τα πρίσματα των κονιαμάτων. Σε κάθε μέτρηση μεταβολής μήκους σύμφωνα με το πρότυπο απομακρύνονταν ένας κύβος πάστας στην αντίστοιχη ηλικία έκθεσης στο περιβάλλον θειικών, στον οποίο γινόταν διακοπή ενυδάτωσης και ξήρανση υπό κενό για 24 ώρες. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X (XRD) με σκοπό την ταυτοποίηση νέων κρυσταλλικών φάσεων και κυρίως τον ποσοτικό προσδιορισμό των δευτερογενώς σχηματιζόμενων ετρινγκίτη και γύψου. Επίσης πραγματοποιήθηκε θερμοβαρυτομετρική ανάλυση (TGA), για τον ποσοτικό προσδιορισμό επίσης ένυδρων φάσεων εξαιτίας της ενυδάτωσης και της έκθεσης σε περιβάλλον θειικών.

Τέλος σε πάστες όλων των τσιμέντων και για w/c = 0.48, μετρήθηκε η θερμότητα ενυδάτωσης μέχρι και τις 3 ημέρες, με χρήση της διάταξη Calmetrix I-Cal HPC.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Σχήμα 1 εμφανίζεται για κάθε σύνθεση, ο μέσος όρος της ποσοστιαίας μεταβολής μήκους για κάθε πλήθος (6) πρισμάτων, στο χρόνο (ημέρες). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίνονται και με αντίστοιχα προγενέστερα (Κορομηλάς, 2015), τα οποία αφορούν στα ίδια τσιμέντα, τα οποία εκτέθηκαν σε περιβάλλον θειϊκών μετά από περίοδο ωρίμανσης 90 ημερών. Οι μετρήσεις αυτές απεικονίζονται με καμπύλες διακεκομμένης γραμμής και φέρουν επιπλέον την ένδειξη C.



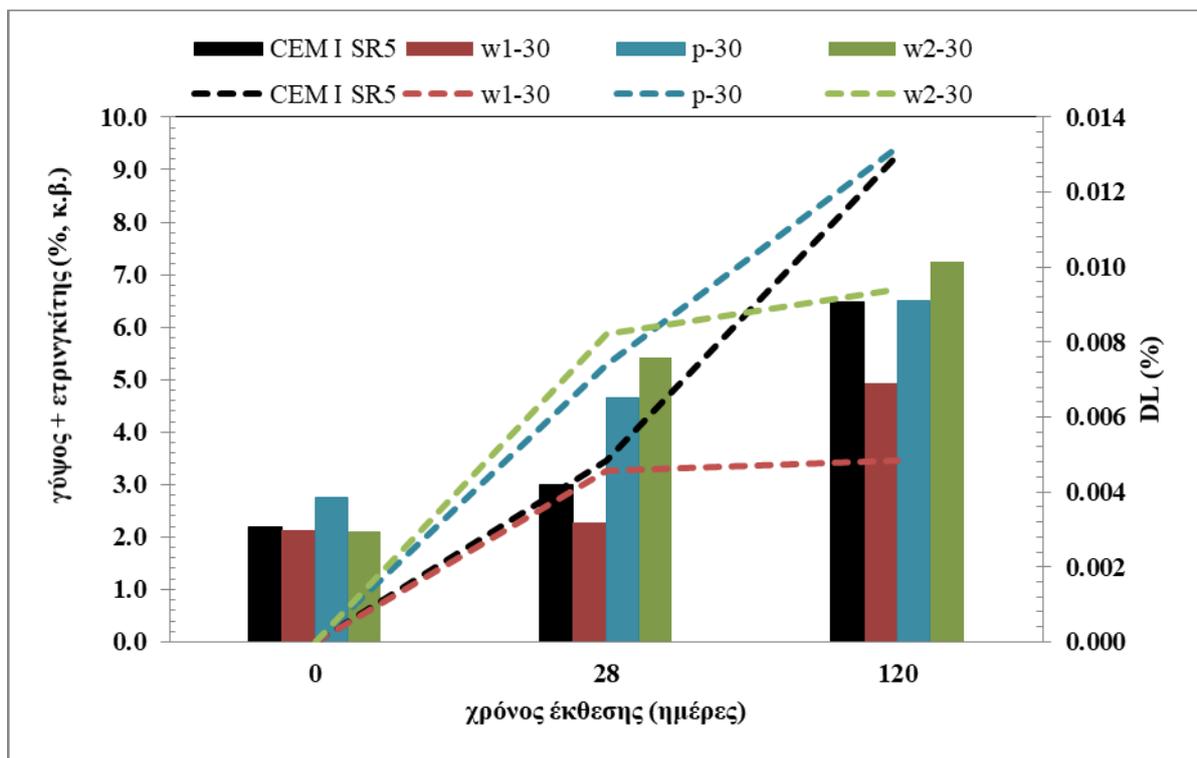
Σχήμα 1. Μέσος όρος μεταβολών μήκους έξι (6) πρισμάτων ανά σύνθεση τσιμέντου, στο χρόνο (ημέρες) και σύγκριση με τα αποτελέσματα προγενέστερης μελέτης (Κορομηλάς, 2015).

Παρά τις όποιες διακυμάνσεις, καταγράφεται σαφώς μια αυξητική τάση στη μεταβολή του μήκους των δοκιμίων. Συνεπώς, σταδιακά με την πάροδο του χρόνου τα πρίσματα επιμηκύνονται, φαινόμενο που μπορεί να αποδοθεί στον αναμενόμενο δευτερογενή σχηματισμό ετρινγκίτη και γύψου. Επιπλέον, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων διόγκωσης δοκιμίων που ωρίμασαν για 90 ημέρες με αυτά της τρέχουσας εργασίας, παρατηρείται ότι για το τσιμέντο CEM I SR5 και ιδιαίτερο για το τσιμέντο P30 (τύπου CEM IV/A), η ωρίμανση 90 ημερών δεν λειτούργησε ευεργετικά στον περιορισμό της διόγκωσης. Σε κάθε περίπτωση όμως, όλα τα τσιμέντα ικανοποιούν τις απαιτήσεις του ASTM C 1012, καθώς μετά από 180 ημέρες (6 μήνες) έκθεσης, δεν καταγράφεται μεταβολή μήκους μεγαλύτερη από 0.1%.

Συγκρίνοντας τα τσιμέντα μεταξύ τους, παρατηρείται ότι παραμένει η τάση κατά την οποία το τσιμέντο W1-30 παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά στο περιβάλλον θειϊκών, καταγράφοντας τη μικρότερη διόγκωση. Επίσης, όσον αφορά στα τσιμέντα αναφοράς, τύπου CEM I SR5-SR και CEM IV/A-SR, φαίνεται ότι έχουν παρόμοια συμπεριφορά στο περιβάλλον θειϊκών, αναφορικά με τη διόγκωσή τους, ανεξαρτήτως του χρόνου ωρίμανσης πριν την έκθεση.

Αναφορικά με την επίδραση του ποσοστού προσθήκης, τα αποτελέσματα που αναφέρονται σε προγενέστερη ανακοίνωση (Κορομηλάς, 2015) επιβεβαιώνονται και στη παρούσα μελέτη, όπου καταγράφονται αντίστοιχα αποτελέσματα.

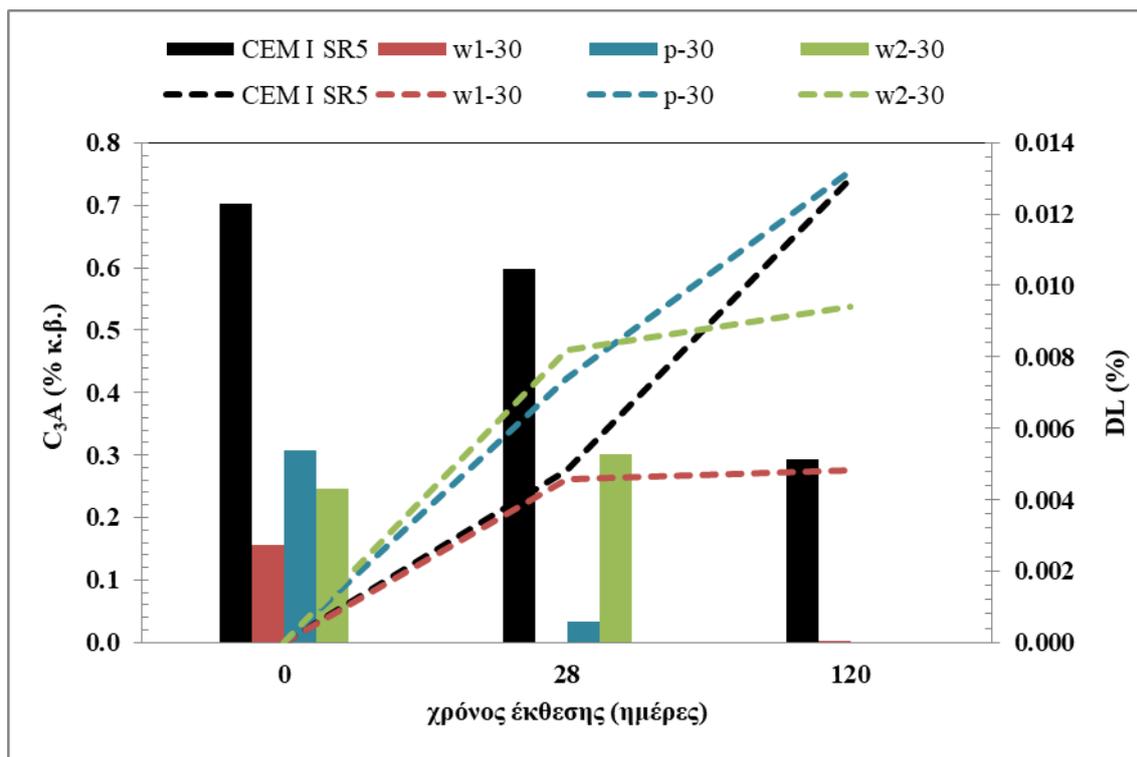
Στο Σχήμα 2, συσχετίζεται για τα τσιμέντα με το μέγιστο ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ (30%), το επίπεδο διόγκωσης (διακεκομμένες γραμμές) με το άθροισμα των ποσοστών ετρινγκίτη και γύψου (ράβδοι), όπως αυτά εκτιμήθηκαν από τα σχετικά τους ακτινοδιαγράμματα μέσω της μεθόδου Rietveld, κατά την είσοδο και μετά από παραμονή σε διάλυμα θειϊκών για 28 και 120 ημέρες.



Σχήμα 2. Συσχέτιση ποσοστού γύψου και ετρινγκίτη με το ποσοστό διόγκωσης των τσιμέντων με υψηλό ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ και των τσιμέντων αναφοράς.

Από το Σχήμα 2 γίνεται σαφής η πολύ καλή συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ του επιπέδου διόγκωσης και των ποσοστών ετρινγκίτη και γύψου. Ειδικά μετά από έκθεση 120 ημερών στο διάλυμα θειϊκών και για τα τσιμέντα τύπου CEM I SR5-SR και CEM IV/A-SR όπου καταγράφεται το μεγαλύτερο ποσοστό διόγκωσης, καταγράφεται επίσης υψηλό ποσοστό συγκέντρωσης γύψου και ετρινγκίτη. Αντίθετα, αναφορικά με το τσιμέντο W2-30, το υψηλότερο συγκριτικά ποσοστό γύψου και ετρινγκίτη σε σχέση με τα τσιμέντα αναφοράς, δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη υψηλότερη διόγκωση. Ωστόσο συγκριτικά με το W1-30, επιβεβαιώνεται η τάση σύμφωνα με την οποία, ο σχηματισμός μεγαλύτερης ποσότητας ετρινγκίτη και γύψου, συνοδεύεται από υψηλότερο βαθμό διόγκωσης.

Στο Σχήμα 3, συσχετίζεται επίσης για τα τσιμέντα με το μέγιστο ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ (30%), το επίπεδο διόγκωσης με το ποσοστό του διαθέσιμου C₃A, όπως αυτό εκτιμήθηκε από τα σχετικά τους ακτινοδιαγράμματα και μέσω της μεθόδου Rietveld, κατά την είσοδο τους σε διάλυμα θειϊκών και μετά από παραμονή τους για 28 και 120 ημέρες. Δεδομένης της ύπαρξης C₃A και μετά τις 28 ημέρες έκθεσης, ερμηνεύεται η αυξητική πορεία στη διόγκωση του CEM I και W2-30. Μάλιστα στο τελευταίο η διόγκωση κινείται σε υψηλά επίπεδα, καθώς υπάρχει ακόμα διαθέσιμο C₃A.



Σχήμα 3. Συσχέτιση ποσοστού κ.β. C₃A με το % διόγκωσης τσιμέντων με υψηλό ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ και τσιμέντων αναφοράς.

Στον Πίνακα 5, δίνονται τα αποτελέσματα της θερμοβαρυτομετρικής ανάλυσης όσον αφορά στην παραγωγή και τη σχετική μεταβολή του % κ.β. του Ca(OH)₂. Εκτός από το γεγονός ότι η κατανάλωση Ca(OH)₂ σχετίζεται με την ποζολανική δραστηριότητα των προσθέτων, σχετίζεται και με την παραγωγή γύψου και ετρινγκίτη, καθώς πολλοί ερευνητές (Gollor et al 1996, Sahmaran et al, 2007) επισημαίνουν ότι η υψηλή συγκέντρωση Ca(OH)₂ συντελεί σε αυξημένο σχηματισμό των εν λόγω κρυσταλλικών φάσεων των θειϊκών και συνεπώς σε αυξημένη διόγκωση.

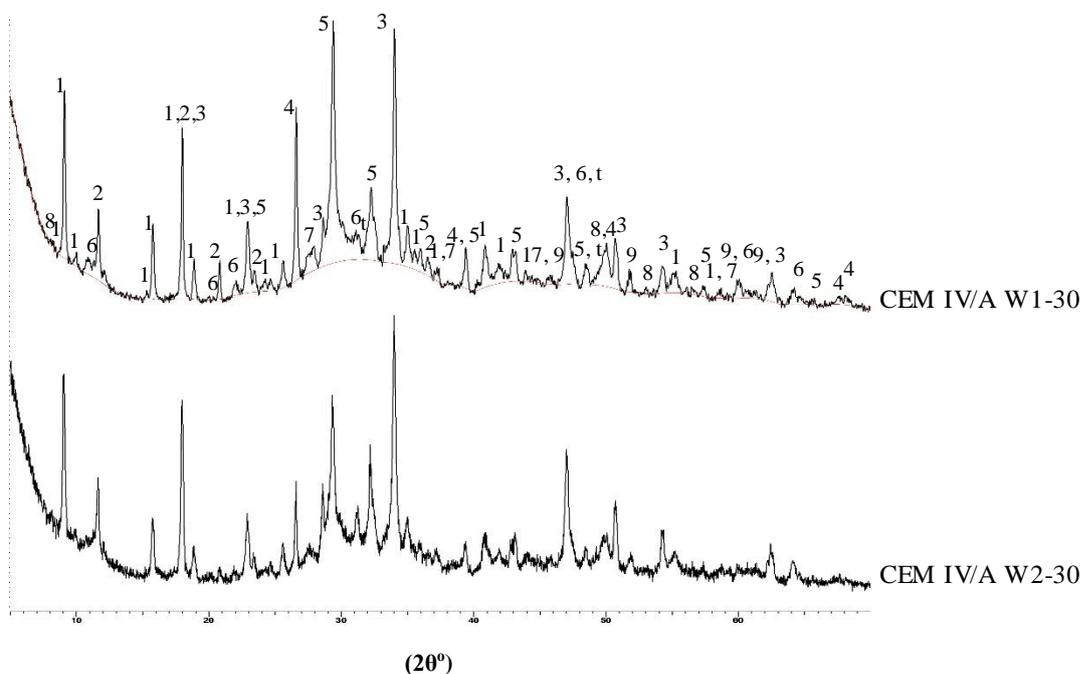
Πίνακας 5. Περιεκτικότητα και σχετική μεταβολή % κ.β. Ca(OH)₂ σε διάφορες ηλικίες έκθεσης σε περιβάλλον θειϊκών, βάσει ανάλυσης TGA.

	% κ.β. Ca(OH) ₂			Μεταβολή % κ.β. Ca(OH) ₂	
	0 ημ.	28 ημ.	120 ημ.	28 ημ.	120 ημ.
CEM I	0.153	0.172	0.211	0.018	0.057
CEM IV/A W1-30	0.121	0.108	0.132	-0.014	0.011
CEM IV/A P-30	0.132	0.144	0.129	0.012	-0.004
CEM IV/A W2-30	0.135	0.147	0.159	0.011	0.023

Η συγκέντρωση ετρινγκίτη και γύψου μπορεί να συσχετιστεί με την διαθεσιμότητα του Ca(OH)₂. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5, στις 28 ημέρες έκθεσης για όλα τα τσιμέντα, πλην του CEM IV/A W1-30, υπάρχει περίσσεια Ca(OH)₂ συνεπώς η παραγωγή ετρινγκίτη και γύψου θεωρείται αναμενόμενη. Η υψηλή κατανάλωση που εμφανίζει το τσιμέντο CEM IV/A W1-30, εφόσον δεν μεταφράζεται σύμφωνα και με τα αποτελέσματα σε αυξημένη διόγκωση, χρήζει διερεύνησης.

Στις 120 ημέρες έκθεσης σε περιβάλλον θειικών, η διαθεσιμότητα του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, συνεχίζει να είναι θετική για όλα τις πάστες τσιμέντων πλύν του CEM IV/A P-30, συνεπώς αναμένεται επιπλέον παραγωγή ετρινγκίτη και γύψου. Η αρνητική διαθεσιμότητα του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ στην πάστα τσιμέντου CEM IV/A P-30, ενώ φαίνεται να υποδηλώνει την επιβράδυνση της παραγωγής φάσεων θειικών, δεν φαίνεται να σηματοδοτεί την λήξη της διόγκωσης, γεγονός το οποίο επίσης χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

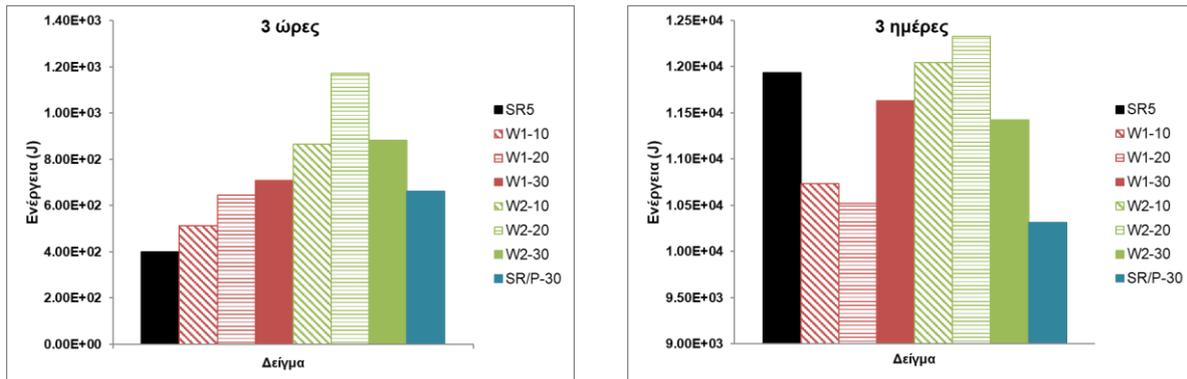
Έτσι, προκειμένου να αποδοθεί η κατανάλωση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ στη δημιουργία ετρινγκίτη και γύψου, πρέπει να μελετηθεί και η ποζολανική δραστηριότητα των τσιμέντων. Στο Σχήμα 4, δίνονται ενδεικτικά τα ακτινογραφήματα των παστών τσιμέντων CEM IV/A W1-30, και CEM IV/A W2-30, μετά από 120 ημερών έκθεση σε περιβάλλον θειικών. Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, καταγράφονται ποζολανικές φάσεις στην πάστα του τσιμέντου CEM IV/A W1-30. Κυρίως όμως η παρατηρούμενη ύπαρξη background στην περιοχή $2\theta = 25 - 40^\circ$, υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφων κρυσταλλικών φάσεων ως αποτέλεσμα της ποζολανικής δραστηριότητας της τέφρας W1. Φαίνεται ότι στην περίπτωση της πάστας τσιμέντου CEM IV/A W1-30, η κατανάλωση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ εκτός του ότι είναι μικρότερη συγκριτικά από την κατανάλωση στην πάστα του τσιμέντου CEM IV/A W2-30, αξιοποιήθηκε και στην παραγωγή επιπλέον ποζολανικών φάσεων, περιορίζοντας το σχηματισμό ετρινγκίτη και γύψου.



Σχήμα 4. Ακτινοδιαγράμματα XRD, παστών τσιμέντων CEM IV/A W1-30, και CEM IV/A W2-30, μετά από 120 ημερών έκθεσή τους σε περιβάλλον θειικών (1: Ετρινγκίτης, 2: Γύψος, 3: Πορτλαντίτης, 4: Χαλαζίας, 5: Ασβεσίτης, 6: C_4AH , 7: C_2S , 8: C_4AH_{19} , 9: C_3S , t: toberomorite).

Στο Σχήμα 5 δίνεται η αθροιστική θερμότητα ενυδάτωσης παστών τσιμέντων με υψηλό ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ (30%) και των τσιμέντων αναφοράς (CEM I SR5-SR και CEM IV/A-SR), στις 3 ώρες και στις 3 ημέρες. Η ανάπτυξη της θερμότητας ενυδάτωσης των παστών τσιμέντων, είναι μεγαλύτερη για τα τσιμέντα με IT W2, καθώς αυτή διαθέτει υψηλό ποσοστό ελεύθερας ασβέστου, fCaO. Τα τσιμέντα με I.T. W2 ενυδατώνονται ταχέως και η θερμότητα ενυδάτωσης είναι σημαντική από τις πρώτες 3 ώρες, εξαιτίας της υδρόλυσης του fCaO. Στη συνέχεια, μετά την πρώτη ημέρα η επίδραση του fCaO, υποσκελίζεται από την

επίδραση της αραίωσης που έχει η προσθήκη της Ι.Τ. Έτσι μετά τις 3 ημέρες, όλα τα τσιμέντα αναπτύσσουν μικρότερη ή παραπλήσια θερμότητα ενυδάτωσης από τα τσιμέντα αναφοράς.



Σχήμα 5. Αθροιστική θερμότητα ενυδάτωσης τσιμέντων με υψηλό ποσοστό αντικατάστασης κλίνκερ και τσιμέντων αναφοράς, στις 3 ώρες και στις 3 ημέρες.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία είναι τα εξής:

- Αποδεικνύεται ικανοποιητική η αντίσταση των ποζολανικών τσιμέντων έναντι της προσβολής θειικών, ανεξαρτήτως της ηλικίας ωρίμανσης πριν την έκθεση. Συγκεκριμένα, κονιάματα τσιμέντων εκτιθέμενα σε περιβάλλον θειικών, τόσο από την στιγμή της απαιτούμενης αντοχής που προδιαγράφεται όσο και μετά από 90 ημέρες ωρίμανσης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των έξι (6) μηνών, παρουσιάζουν αύξηση μήκους πολύ μικρότερη από το όριο που θέτει το σχετικό πρότυπο.
- Τα ποσοστά συγκέντρωσης γύψου και ετρινγκίτη που εκτιμώνται στις πάστες μετά από έκθεση τους σε περιβάλλον θειικών αιτιολογούν απόλυτα την κατάταξη των τσιμέντων ως προς το βαθμό διόγκωσή τους. Στα τσιμέντα αναφοράς CEM I SR5-SR και CEM IV/A-SR στα οποία καταγράφεται και το μεγαλύτερο ποσοστό γύψου και ετρινγκίτη, καταγράφεται επίσης και η μεγαλύτερη διόγκωση.
- Η συνεχιζόμενη διόγκωση των τσιμέντων μετά τις 28 ημέρες έκθεσης, αιτιολογείται εκτός των άλλων από την ύπαρξη διαθέσιμου C₃A. Έτσι, καθώς στα τσιμέντα αναφοράς υπάρχει διαθέσιμο C₃A, η διόγκωση συνεχίζεται με μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με τα υπόλοιπα τσιμέντα.
- Η διαφοροποίηση στη διόγκωση των τσιμέντων μετά τις 28 ημέρες έκθεσης, μπορεί να αποδοθεί στις αντίστοιχες διαφοροποιήσεις που καταγράφονται αναφορικά με την κατανάλωση του Ca(OH)₂. Φαίνεται μάλιστα, ότι η ποζολανική δραστηριότητα των προσθέτων, μπορεί να αναστείλει τον σχηματισμό των φάσεων του ετρινγκίτη και της γύψου.
- Αναφορικά με τη θερμότητα ενυδάτωσης, φαίνεται ότι η προσθήκη ασβεστούχας Ι.Τ. επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη της θερμότητας ενυδάτωσης στις πρώτες ώρες. Ωστόσο μετά την παρέλευση των πρώτων ημερών, η αθροιστική θερμότητα ενυδάτωσης σχεδόν εξισώνεται για όλες τις συνθέσεις.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς οφείλουν να ευχαριστήσουν τους κκ. Κατσιώτη Μ. και Πιστοφίδη Ν. για τις διευκολύνσεις που τους παρέιχαν ως προς της περαίωση των διατρεχόντων πειραμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTM C1012-04 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution
- ASTM C109/C109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or (50 mm) Cube Specimens)
- ASTM C305-99 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency
- ASTM C490 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete
- ASTM C595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements
- EN 197-1, «Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα», 2000
- EN 196 Part-1 Determination of Strength
- EN 196 Part-2 Chemical Analysis of Cement
- EN 196 Part-3 Determination of Setting Time and Soundness
- EN 196 Part-5 Pozzolanicity Test for Pozzolanic Cements
- EN 196 Part-6 Determination of Fineness
- EN 450 Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria
- Gollop, R.S., Taylor, H.F.W. (1996). Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack IV. Reactions of a slag cement paste with sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement Concrete Research*, Vol. 26, No. 7, pp 1013–1028.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. (3rd Edition), New York, The McGraw - Hill Companies, pp 159-162
- Menéndez, E., Matschei, T., Glasser F.P., (2013). Sulfate Attack of Concrete, *Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments*, Edited by Alexander, M. Bertron, A., De Belie, N., RILEM State-of-the-Art Reports 10, 2013, pp 7-74.
- Sahmaran, M., Kasap, O., Duru, K., Yaman, I.O. (2007). Effects of mix composition and water–cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. *Cement Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 59–167.
- Β. Κορομηλάς, Ε. Μπαδογιάννης, Σ. Αντίοχος, Ε. Χανιωτάκης, Σ. Τσιβιλής. Αξιοποίηση ασβεστούχου ιπτάμενης τέφρας στην παρασκευή ποζολανικών τσιμέντων ανθεκτικών σε θειικά, 4^ο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ, Θεσσαλονίκη, 11-12 Ιουνίου 2015.

Επίδραση αργιλοπυριτικών υλικών στις ιδιότητες αλκαλικά ενεργοποιημένων κονιαμάτων με βάση την ιπτάμενη τέφρα

Φ. Κεσικίδου, Ε. Γεωργόπουλος, Σπ. Ψαλτούλης, Στ. Κονοπίση, Μ. Στεφανίδου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: αλκαλική ενεργοποίηση, ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα, περλίτης, πηλός, ιξώδες, φυσικομηχανικές ιδιότητες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η αλκαλική ενεργοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα, είναι μια εναλλακτική λύση για την παραγωγή προϊόντων δόμησης χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικού ίχνους. Τα τελευταία χρόνια η ελληνική ιπτάμενη τέφρα έχει εξετασθεί ως προς τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της ως αλκαλικά ενεργοποιημένη κονία. Στα πλεονεκτήματα ανήκουν οι αυξημένες αντοχές και η ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και η διάβρωση από οξέα. Ωστόσο, το αυξημένο ιξώδες και η χαμηλή εργασιμότητα της κονιάς απαιτούν βελτίωση προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε δομικά προϊόντα. Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η επίδραση της προσθήκης αργιλοπυριτικών κονιών, όπως είναι τα παραπροϊόντα περλίτη και ο πηλός, σε αλκαλικά ενεργοποιημένα κονιάματα ιπτάμενης τέφρας. Ελέγχθηκαν οι ιδιότητες των νωπών κονιαμάτων όπως ιξώδες, εργασιμότητα και περιεκτικότητα αέρα, καθώς επίσης και τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων αυτών.

Influence of aluminosilicate binders on the properties of alkali-activated fly ash mortars

F. Kesikidou, E. Georgopoulos, Sp. Psaltoulis, St. Konopisi, M. Stefanidou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: alkali-activation, calcareous fly ash, perlite, clay, viscosity, physicochemical properties

Abstract: Alkali-activation of industrial by-products, such as fly ash, is an alternative to concrete products with low-cost construction and low environmental footprint. In recent years, Greek fly ash has been tested for its advantages and disadvantages as an alkali activated binder. The advantages include increased levels of strength, resistance to high temperatures and acid resistance. However, the increased viscosity and low workability of the binder require improvement in order to be used in construction. In this paper, the addition of aluminosilicate binders, such as perlite and clay on the properties of alkali activated fly ash mortars was investigated. Viscosity, workability and air content of the mortars at the fresh state were measured. Physical and mechanical characteristics were also determined at the ages of 7 and 28 days.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος και μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας τα τελευταία χρόνια. Τα οφέλη από την αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου από παραπροϊόντα (όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα, οι σκωρίες κλπ) είναι πέρα από περιβαλλοντικά, και οικονομικά λόγω του χαμηλού τους κόστους. Προς αυτήν την κατεύθυνση στρέφονται όλο και περισσότεροι ερευνητές με στόχο την αξιοποίηση των υλικών αυτών (Liapis, 2018), (Στεφανίδου, 2015), (Σίδερης, 2005), (Γκαλμπένης, 2009).

Η αλκαλική ενεργοποίηση αποτελεί μία ακόμη μέθοδο για την εκμετάλλευση των υλικών αυτών βελτιώνοντας παράλληλα τις ιδιότητές τους. Περιλαμβάνει μία ετερογενή χημική αντίδραση μεταξύ στερεών αργιλοπυριτικών οξειδίων και αλκαλικού διαλύματος πυριτίου σε συνθήκες υψηλής αλκαλικότητας και ήπιας θερμοκρασίας, δίνοντας από άμορφες μέχρι ημικρυσταλλικές πολυμερικές δομές που αποτελούνται από δεσμούς Si–O–Al και Si–O–Si (Provis, 2014), (Dimas, 2009). Τα τελικά προϊόντα που προκύπτουν έχουν πολύ καλές μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες και μπορούν να βρουν εφαρμογές στην κατασκευή (Parayianni, 2014), (Parayianni, 2018).

Τα τελευταία χρόνια η ελληνική ιπτάμενη τέφρα έχει εξετασθεί ως προς τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της ως αλκαλικά ενεργοποιημένη κονία. Στα πλεονεκτήματα ανήκουν οι αυξημένες αντοχές και η ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και η διάβρωση από οξέα. Ωστόσο, το αυξημένο ιξώδες και η χαμηλή εργασιμότητα της κονίας απαιτούν βελτίωση προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε δομικά προϊόντα. Στην εργασία αυτή διερευνάται η επίδραση αργιλοπυριτικών υλικών όπως ο περλίτης και ο πηλός στις ιδιότητες αλκαλικά ενεργοποιημένων κονιαμάτων με βάση την τέφρα. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε το ιξώδες, η εργασιμότητα και η περιεκτικότητα σε αέρα των κονιαμάτων σε νωπή κατάσταση. Προσδιορίστηκαν επίσης οι ιδιότητες των σκληρυμένων κονιαμάτων στις 7 και 28 ημέρες (καμπτική και θλιπτική αντοχή, πορώδες, ειδικό βάρος και συρρίκνωση).

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Χαρακτηρισμός υλικών

Για την παραγωγή των κονιαμάτων ως πρώτες ύλες χρησιμοποιήθηκαν ιπτάμενη τέφρα από τον ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου στην Πτολεμαΐδα, διογκωμένος περλίτης από την εταιρεία ΠΕΡΛΙΤ Α.Ε. και πηλός. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι χημικές ιδιότητες των υλικών και ο έλεγχος του δείκτη ποζολανικότητας σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C593-95. Ως αδρανή χρησιμοποιήθηκε άμμος ποταμού (πυριτική) κοκκομετρίας (0-4) mm.

Πίνακας 1. Χαρακτηρισμός υλικών (% κ.β.)

Κονία	Περλίτης	Ιπτάμενη Τέφρα	Πηλός
Na ₂ O	3.02	0.92	1.54
K ₂ O	3.07	1.14	3.08
CaO	2.93	22.58	1.51
MgO	0.45	1.87	0.7
Fe ₂ O ₃	1.8	5.08	0.2
Al ₂ O ₃	15.74	17.85	16.36
SiO ₂	67.49	46.83	73.5
A.Π.%	4.65	2.92	3.08
Cl ⁻	0.02	0.01	0.05
NO ³⁻	<0.01	<0.01	0.02
SO ₄ ²⁻	0.01	4.41	0.02
Ειδικό βάρος (g/ml)	2.437	2.438	2.374
Λεπτότητα άλεσης	<100μm	<75μm	<100μm
pH	8.92	13.75	8.75
Pozzolanicity index 28d (MPa)	7.94>4.1	8.44>4.1	0.64<4.1

Από τη χημική ανάλυση των κονιών φαίνεται ότι ο περλίτης με περιεκτικότητα 67% σε οξειδία του πυριτίου και δείκτη ποζολανικότητας 7.94 (>4.1 όπως ορίζει ο κανονισμός) είναι ένα υλικό με ποζολανικές ιδιότητες. Η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασβεστόχα (CaO = 22.58) σύμφωνα με το πρότυπο EN450-1. Είναι υλικό που διαθέτει υδραυλικό αλλά και ποζολανικό χαρακτήρα (8.44MPa), όπως φαίνεται και από το δείκτη ποζολανικότητας που είναι διπλάσιος από την απαίτηση του κανονισμού. Τέλος, ο πηλός παρά τη μεγάλη του περιεκτικότητα σε οξειδία του πυριτίου δεν χαρακτηρίζεται ως ποζολανικό υλικό.

2.2. Ανάμιξη και ιδιότητες νωπών κονιαμάτων

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις συνθέσεις έτσι ώστε να ελεγχθούν τα μηχανικά, φυσικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά των αλκαλικώς ενεργοποιημένων κονιαμάτων. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι αναλογίες των συνθέσεων.

Πίνακας 2. Αναλογίες των συνθέσεων (μέρη βάρους)

Συνθέσεις	Ιπτάμενη τέφρα	Περλίτης	Πηλός	Άμμος	Υγρά/Κονία	Ρευστοποιητής (% κ.β. κονιών)
F	1	-	-	3	0.5*	3
AF	1	-	-	3	0.5	3
AFDS	0.5	0.5	-	3	0.5	3
AFC	0.5	-	0.5	3	0.5	3

*μόνο νερό

Σχεδιάστηκε μία σύνθεση αναφοράς (F) χωρίς ενεργοποίηση με λόγο νερού/κονία ίσο με 0.5 και την προσθήκη 3% (κ.β. της κονίας) ρευστοποιητή προκειμένου να διατηρηθεί ο λόγος κάτω από 0.6. Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν τρεις αλκαλικώς ενεργοποιημένες συνθέσεις, μία με τέφρα (AF), μία με αντικατάσταση της τέφρας κατά 50% με περλίτη (AFDS) και μία με αντικατάσταση της τέφρας κατά 50% με πηλό (AFC). Σε όλες τις συνθέσεις ο λόγος υγρών/κονία διατηρήθηκε σταθερός στο 0.5. Στις συνθέσεις με αλκαλική ενεργοποίηση (AF, AFDS, AFC) χρησιμοποιήθηκε διάλυμα καυστικού νατρίου (NaOH 10M) 20% + νερό 80%. Μετά από 10 λεπτά ανάδευση στον αναμικτήρα, μετρήθηκαν η εργασιμότητα των κονιαμάτων, σύμφωνα τη μέθοδο της τράπεζας εξάπλωσης (EN 1015-3), το ιξώδες (ICAR Rheometer) και η περιεκτικότητα σε αέρα (ASTM C185 - 15a). Οι ιδιότητες των νωπών συνθέσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Ιδιότητες νωπών κονιαμάτων

Συνθέσεις	Ιξώδες (Pa.s)	Εξάπλωση (cm)	Περιεκτικότητα σε αέρα (%)	Συνθήκες περιβάλλοντος
F	-	11.5	4.5	38% RH, 19°C
AF	-	11	4.8	39% RH, 20°C
AFDS	110.5	14.9	4.4	39% RH, 20.2°C
AFC	79.5	11.9	9.2	40% RH, 20.3°C

Όσον αφορά στο ιξώδες των συνθέσεων, στις συνθέσεις της ιπτάμενης τέφρας με και χωρίς αλκαλική ενεργοποίηση το όργανο δεν έδωσε αποτέλεσμα λόγω του πολύ υψηλού ιξώδους του μίγματος. Αντιθέτως, η αντικατάσταση της τέφρας με περλίτη μείωσε το ιξώδες του κονιάματος (110.5Pa.s) και αύξησε την εργασιμότητα από τα 11.0cm στα 14.9cm. Επιπλέον, η αντικατάσταση της τέφρας κατά 50% με πηλό (AFC) μείωσε ακόμη περισσότερο το ιξώδες (79.5Pa.s) χωρίς ωστόσο να βελτιώσει αισθητά την εργασιμότητα (11.9cm). Αυτό οφείλεται πιθανά στη συγκράτηση μέρους του νερού από τα συστατικά του πηλού. Η περιεκτικότητα σε

αέρα των κονιαμάτων κυμαίνεται από 4.4 έως 4.8% με εξαίρεση τη σύνθεση με τον πηλό που η περιεκτικότητα καταγράφηκε σε 9.2%. Ο εγκλωβισμός του αέρα στο νωπό μίγμα με πηλό, πιθανά οφείλεται στη μορφολογία των συστατικών που είναι πιο γωνιώδη και χονδρόκοκκα σε σχέση με τις άλλες κόνιες.

Μετά την ανάμειξη και τον έλεγχο των νωπών ιδιοτήτων, τα κονιάματα καλουπώθηκαν σε μήτρες (40x40x160) mm και διατηρήθηκαν για 24 ώρες σε δύο διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης (25°C και 40°C). Μετά το ξεκαλούπωμα ακολούθησε συντήρηση σε υγρές λινάτσες μέχρι τον έλεγχό τους.

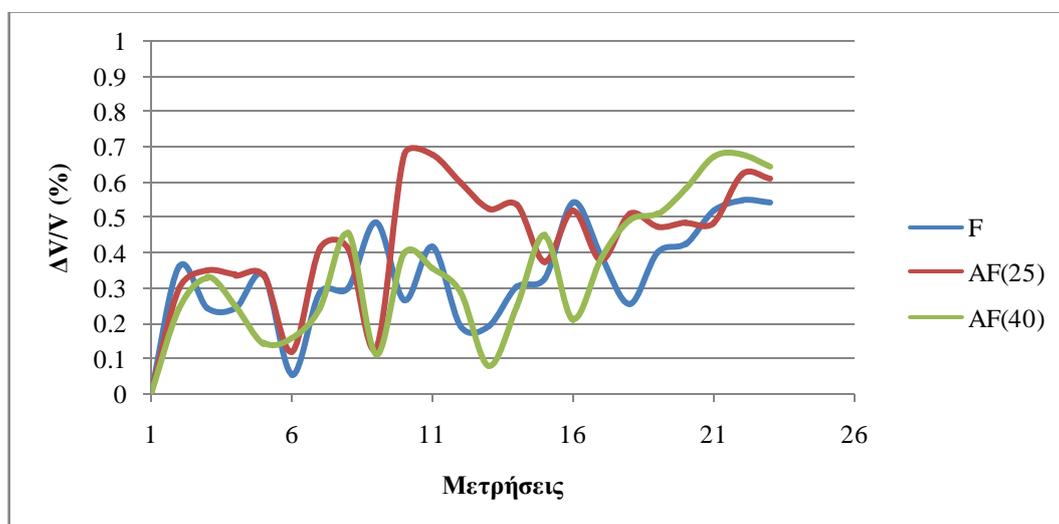
2.3. Φυσικά χαρακτηριστικά

Σε ηλικία 7 και 28 ημέρες προσδιορίστηκε το πορώδες των κονιαμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο RILEM CPC 11.3 (Πίνακας 4). Επιπλέον, έγινε έλεγχος συρρίκνωσης των δοκιμίων για τις πρώτες 28 ημέρες, όπου τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε θάλαμο με σταθερές συνθήκες 20°C και 60%RH. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στα Διάγραμμα 1 και 2.

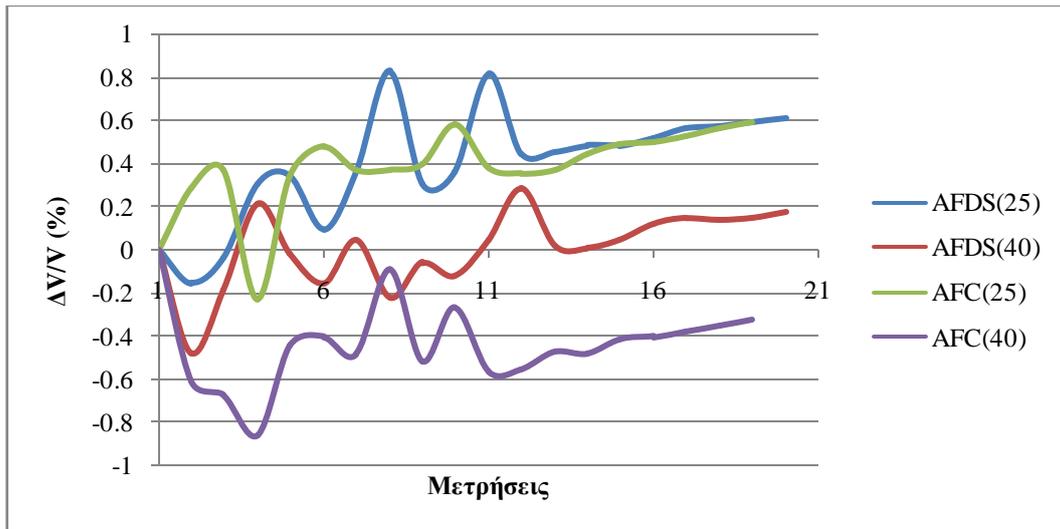
Πίνακας 4. Πορώδες και ειδικό βάρος των συνθέσεων

Συνθέσεις	Πορώδες (%)		Ειδικό βάρος	
	7 ημέρες	28 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες
F	8.90	6.56	1.94	1.95
AF(25)	9.09	5.40	1.92	2.07
AF(40)	7.11	5.90	1.98	2.03
AFDS(25)	9.09	5.52	1.95	2.04
AFDS(40)	5.45	5.71	2.04	2.03
AFC(25)	8.21	5.73	2.02	2.05
AFC(40)	7.99	5.26	2.07	2.06

Το πορώδες όλων των συνθέσεων μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η προσθήκη του αλκαλικού ενεργοποιητή δεν φαίνεται να αλλάζει αισθητά την τιμή του. Αντιθέτως, η θέρμανση στους 40°C μειώνει την τιμή τους πορώδους, στις 7 ημέρες, κατά 20% για τη σύνθεση AF, κατά 40% για τη σύνθεση με τον περλίτη (AFDS) και μόλις 2% για τη σύνθεση με τον πηλό (AFC). Στις 28 ημέρες το πορώδες των ενεργοποιημένων δοκιμίων είναι παραπλήσιο ανεξάρτητα του τρόπου συντήρησης και του είδους των κονιών. Ανάλογες είναι και οι τιμές του ειδικού βάρους των δοκιμίων, οι οποίες κυμαίνονται από 1.94-2.07.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή όγκου συνθέσεων με τέφρα

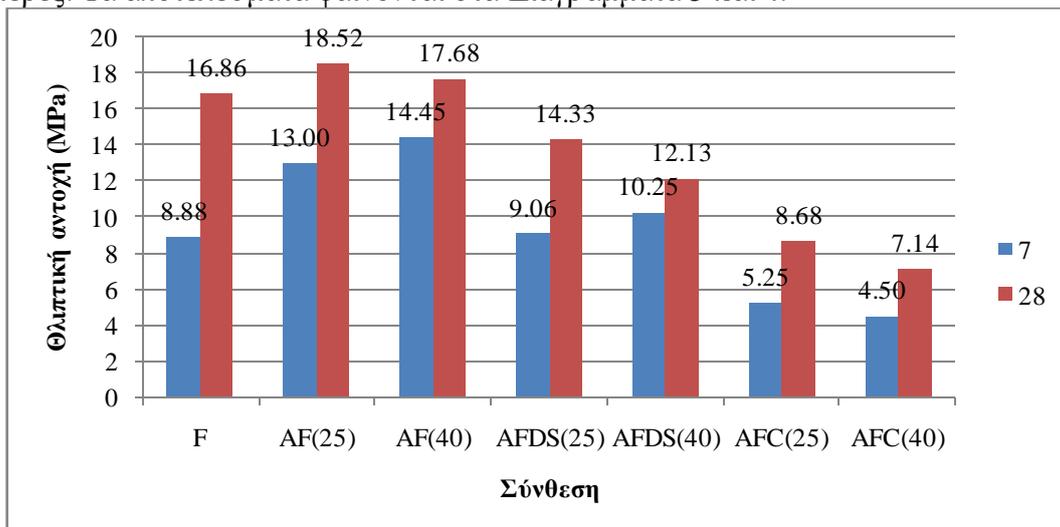


Διάγραμμα 2. Μεταβολή όγκου συνθέσεων με περλίτη και πηλό

Από τα διαγράμματα μεταβολής όγκου φαίνεται ότι οι συνθέσεις με τέφρα παρουσιάζουν μια μικρή διόγκωση (<0.7%). Η μεταβολή αυτή δεν φαίνεται να επηρεάζεται αισθητά από την προσθήκη του ενεργοποιητή. Αντιθέτως, στις συνθέσεις με περλίτη και πηλό η μεταβολή αυτή είναι ελάχιστα μεγαλύτερη (<1%), ωστόσο όλες οι συνθέσεις φαίνεται να σταθεροποιούνται νωρίτερα (16^η μέτρηση). Σε γενικές γραμμές οι μεταβολές όγκου των συνθέσεων είναι αποδεκτές χωρίς να παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι συνθέσεις με τα μικρότερα ποσοστά περιεκτικότητας σε αέρα (F και AFDS) έχουν πιο σταθερή συμπεριφορά και η ωρίμανση στους 40°C οδηγεί σε ακόμη μικρότερες μεταβολές.

2.4. Μηχανικά χαρακτηριστικά

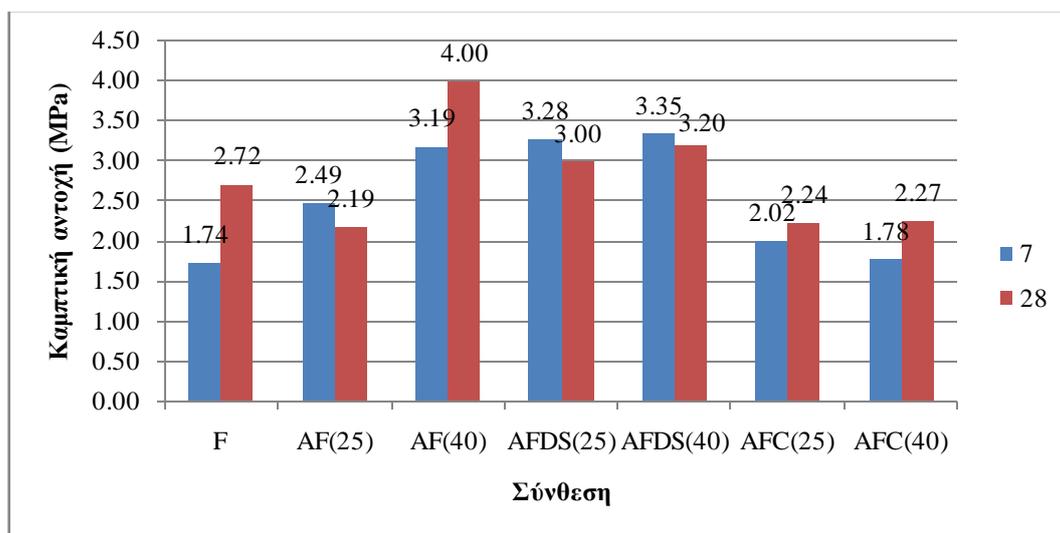
Τα δοκίμια ελέγχθηκαν σε θλίψη και κάμψη σύμφωνα με το πρότυπο EN1015-11 στις 7 και 28 ημέρες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Διαγράμματα 3 και 4.



Διάγραμμα 3. Θλιπτική αντοχή κονιαμάτων στις 7 και 28 ημέρες

Από την θλιπτική αντοχή των δοκιμίων φαίνεται ότι η προσθήκη του αλκαλικού ενεργοποιητή αυξάνει την αντοχή κατά 46% στις 7 ημέρες. Η αντικατάσταση της ιπτάμενης τέφρας από περλίτη και πηλό δείχνει να μειώνει την αντοχή σε θλίψη των συνθέσεων κατά

30% στις 7 ημέρες. Όσον αφορά στις διαφορετικές θερμοκρασίες ωρίμανσης δε φαίνεται να προσδίδει κάτι περισσότερο στις αντοχές η συντήρηση στους 40°C. Υπάρχει μία μικρή αύξηση στις 7 ημέρες της τάξης του 10% για τη σύνθεση του περλίτη, η οποία όμως δεν φαίνεται να συνεχίζεται στις 28 ημέρες. Οι τιμές αυτές συμφωνούν με τις τιμές του πορώδους, όπου παρατηρείται μια μείωση στις πρώτες 7 ημέρες για τις συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκε θέρμανση, η οποία δεν συνεχίστηκε στις 28 ημέρες. Παράλληλα, σε όλες τις συνθέσεις παρουσιάζεται μια αύξηση της αντοχής με την πάροδο του χρόνου, κάτι που επιβεβαιώνει τον υδραυλικό χαρακτήρα της τέφρας.



Διάγραμμα 3. Καμπτική αντοχή κονιαμάτων στις 7 και 28 ημέρες

Για τον έλεγχο σε κάμψη φαίνεται πως η προσθήκη του αλκαλικού ενεργοποιητή στις 7 ημέρες αυξάνει την αντοχή για όλες τις συνθέσεις με τις καλύτερες αντοχές να παρατηρούνται για τη σύνθεση με τέφρα και ωρίμανση στους 40°C και τις συνθέσεις με την προσθήκη περλίτη να ακολουθούν.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοπτικά, φαίνεται ότι η προσθήκη περλίτη ή πηλού φαίνεται να βελτιώνει την εργασιμότητα και να μειώνει το ιξώδες των κονιαμάτων, μειώνοντας όμως παράλληλα τις αντοχές. Οι συνθέσεις με αντικατάσταση της ιπτάμενης τέφρας από περλίτη είχαν ωστόσο μικρότερη μείωση στη θλιπτική τους αντοχή (περίπου 10%) σε σχέση με αυτές που είχαν πηλό. Η ωρίμανση για 24 ώρες στους 40° C δεν βελτιώνει αισθητά τα επίπεδα των αντοχών, φαίνεται όμως να ευνοεί τη σταθερότητα όγκου των κονιαμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Liapis A., Anastasiou E., Papachristoforu M., Papayanni I. (2018) Feasibility study and criteria for EAF slag utilization in concrete products. J. of Sust. Metal. March 4, 1, 68-76.
- Στεφανίδου Μ., Γιαννιτσόπουλος Χ., Κωνσταντινίδης Γ. (2015) Ιδιότητες και τεχνικές αναβάθμισης περλίτη για δομική χρήση, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ, 11-12 Ιουνίου 2015, Θεσσαλονίκη.
- Σίδερης Κ. Κ., Βίτσα Δ., Παυλοπούλου Ι., Τσιλιακούδης (2005) Ν. Χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων για την παρασκευή σκυροδέματος, 24-26 Νοεμβρίου 2005, Θεσσαλονίκη.

- Γκαλμπένης Χ.-Τ., Τσίμας Σ. (2009) Εναλλακτικές πρώτες ύλες στη βιομηχανία τσιμέντου για την παραγωγή κλίνκερ, 1-3 Ιουνίου, Αιανή, Κοζάνη.
- Provis J. L., van Deventer J. S. J. (Eds.) (2014) Alkali Activated Materials : State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM, Springer, Netherlands.
- Dimas D, Giannopoulou Z I., Papias Z D. (2009) “Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology”, Journal of Materials Science, vol. 44, no 14, 3719-3730.
- Papayianni I, Konopisi S, Datsiou K and Kesikidou F (2014) Products of alkali-activated calcareous fly ash and glass cullet. Int. J. Res. in Eng. and Technology 03 (13), 43-51.
- Papayianni I., Konopisi S., Kesikidou F (2018) Physico-mechanical properties and durability aspects of alkali-activated calcareous fly ash/slag mortars. Key Engineering Materials, Vol. 761, 87-91.

Αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των αλκαλικώς ενεργοποιημένων κονιαμάτων με βάση την ιπτάμενη τέφρα

Στ. Κονοπίσι, Φ. Κεσικίδου, Ι. Παπαγιάννη

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: αλκαλική ενεργοποίηση, ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα, σκωρία κάδου, υαλόθραυσμα, ανθεκτικότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στη βιομηχανία σκυροδέματος υπό το πρίσμα της βιωσιμότητας, η έρευνα για τα ανόργανα πολυμερή έχει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς στερεά απόβλητα πλούσια σε αργιλοπυριτικά όπως ιπτάμενες τέφρες, σκωρίες και ανακυκλώσιμο υαλόθραυσμα μπορεί να χρησιμοποιηθούν ευρέως στη διεργασία της αλκαλικής ενεργοποίησης. Ένα από τα προβλήματα που παρεμποδίζουν την ευρεία χρήση αυτών των υλικών είναι η έλλειψη επαρκών δοκιμών ανθεκτικότητας και μακροπρόθεσμων δεδομένων απόδοσης. Η παρούσα εργασία συμβάλλει σε ζητήματα ανθεκτικότητας αλκαλικώς ενεργοποιημένων κονιαμάτων βασισμένων σε ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα (CFA) σε ανάμιξη με σκωρία κάδου (LFS) και τσιμέντο CEM II42.5 (PC) σε διάφορα ποσοστά, και με προσθήκη υαλοθραύσματος ως αδρανές. Ο έλεγχος της ανθεκτικότητας των αλκαλικώς ενεργοποιημένων κονιαμάτων τέφρας γίνεται σε σύγκριση με τσιμεντοκονίαμα (C) χαμηλών απαιτήσεων, με διπλάσιο λόγο νερού/κονία σε σχέση με ένα πρότυπο τσιμεντοκονίαμα. Αρχικά προσδιορίστηκαν οι φυσικο-μηχανικές ιδιότητες όλων των κονιαμάτων και στη συνέχεια δοκίμια από αυτά εκτέθηκαν σε κύκλους ύγρανσης - ξήρανσης, ψύξης - απόψυξης, διείδυσης χλωριόντων από θαλασσινό νερό, σε υψηλές θερμοκρασίες και σε διάλυμα θεικού οξέος, ακολουθώντας πρότυπα ή μεθοδολογίες της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.

Assessment of durability of alkali-activated fly ash mortars

St. Konopisi, F. Kesikidou, I. Papayianni

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: alkali-activation, calcareous fly ash, ladle furnace slag, glass cullet, durability

Abstract: Under the prism of sustainability in concrete industry research on inorganic polymers attracts great interest since rich in aluminosilicates solid wastes such as fly ashes, slags and recycled aggregates can be widely used for alkali activation. One of the reasons that hinder the widespread of these products is the lack of adequate durability tests and long term performance data. This paper contributes to durability issues of alkali activated mortars based on Calcareous Fly Ash (CFA) in mixtures with steel Ladle Furnace Slag (LFS) and Portland Cement CEM II42.5 (PC) at differ percentages by mass. Glass cullet and siliceous sand were used as aggregates. The durability of alkali-activated fly ash mortars is tested against the durability of cement mortar (C) with an equal water/binder ratio. Physico-mechanical properties were determined before mortars' exposure to specific test conditions related to durability. The mortars were tested in wet-dry cycling, freezing-thawing, chloride penetration, at elevated temperatures and sulfuric acid attack by following standards or test methodologies known from literature.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προοπτική της χρήσης αλκαλικώς ενεργοποιημένων προϊόντων σκυροδέματος με βάση τα βιομηχανικά απόβλητα, όπως οι ιπτάμενες τέφρες και οι σκωρίες, είναι επωφελής για το περιβάλλον, τόσο λόγω της ουσιαστικής μείωσης των εκπομπών CO₂ (που παράγεται κατά την παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου Portland) όσο και για την εξάλειψη της εναπόθεσης των αποβλήτων στο έδαφος. Επιπλέον, αυξάνεται η προστιθέμενη αξία της εκμετάλλευσής τους. Τα τεχνικά οφέλη και η αποδοτικότητα κόστους καθιστούν τα προϊόντα από ανόργανο πολυμερές σκυρόδεμα ελκυστικά για την αγορά. Μερικά από τα τεχνικά πλεονεκτήματα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για αυτά τα προϊόντα, είναι η αντοχή στη φωτιά ακόμη και σε υψηλότερες θερμοκρασίες [1] από εκείνες των 700-800 °C στις οποίες υπόκειται βλάβη το συμβατό σκυρόδεμα, η αντοχή στη διείσδυση χλωριόντων [2] και στην προσβολή από θειικό οξύ [3], η σχετικά καλή αντοχή σε κύκλους ψύξης - απόψυξης [4] καθώς και η καλή πρόσφυση και η χαμηλή συρρίκνωσή τους [5].

Ωστόσο υπάρχουν πολλά εμπόδια, κυρίως όσον αφορά στην παγκόσμια αποδοχή αυτής της τεχνολογίας γεωπολυμερισμού στην κατασκευαστική βιομηχανία [6] και στην ευκολία διείσδυσης στην αγορά αυτών των νέων προϊόντων, όπως η έλλειψη σχετικών κανονισμών και επαρκών στοιχείων σχετικά με την ανθεκτικότητά τους.

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η παροχή πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά την ανθεκτικότητα των αλκαλικώς ενεργοποιημένων κονιαμάτων που προέρχονται από ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα (CFA) σε διάφορες αναλογίες αυτής με σκωρία κάδου (LFS) και τσιμέντο Portland (PC). Οι δύο εναλλακτικές συνδυαστικές κονιές CFA και LFS είναι κατάλοιπα από τοπικές βιομηχανίες που δεν καλύπτονται από ευρωπαϊκό κανονιστικό πλαίσιο. Ωστόσο, οι μεγάλες ποσότητες αυτών (περίπου 10 εκατομμύρια τόνοι τέφρας ετησίως και 1 εκατομμύριο τόνοι σκωρίας) επιβαρύνουν το περιβάλλον. Το υαλόθραυσμα που προέρχεται από ανακύκλωση γυαλιού, προστέθηκε ως αδρανές σε μια προσπάθεια μεγιστοποίησης της χρήσης των εγχώριων στερεών αποβλήτων.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Χαρακτηρισμός και ανάμιξη υλικών

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της ιπτάμενης τέφρας (CFA) από τον ΑΗΣ του Αγίου Δημητρίου Πτολεμαΐδας, της σκωρίας κάδου (LFS) από την ΣΙΔΕΝΟΡ, του τσιμέντου CEM Π42.5 (PC) και του ανακυκλώσιμου γυαλιού που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των αλκαλικώς ενεργοποιημένων κονιαμάτων παρατίθενται στον Πίνακα 1. Ως αδρανή χρησιμοποιήθηκαν υαλόθραυσμα και πυριτική άμμος κοκκομετρίας (0-4) mm σε αναλογία μάζας 60:40 αντίστοιχα. Ο αλκαλικός ενεργοποιητής αποτελείται από διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, NaOH και διάλυμα πυριτικού νατρίου, Na₂SiO₃, συγκεκριμένης σύστασης και αναλογίας.

Πίνακας 1. Φυσικοχημικές ιδιότητες των πρώτων υλών (% κ.β.)

Κονία	Ιπτάμενη Τέφρα (CFA)	Σκωρία κάδου (LFS)	Τσιμέντο Π42.5 (PC)	Υαλόθρασμα
SiO ₂	35.70	38.78	25.84	73.53
Al ₂ O ₃	11.08	1.74	5.67	0.79
CaO	36.78	39.18	59.19	10.12
MgO	3.21	3.33	1.53	3.58
Fe ₂ O ₃	5.07	2.19	3.23	0.90
K ₂ O	0.91	0.04	0.89	0.22
Na ₂ O	0.44	0.63	0.84	9.57
SO ₃	5.08	0.12	1.24	0.50
A.Π.%	0.59	11.4	2.81	0.29
Cl	0.01	0.04		
CaO _f	9.41	1.59	2.52	-
pH	12.36	13.29	>13	-
Ειδικό βάρος (g/ml)	2.373	2.587	3.100	2.525
Λεπτότητα άλεσης (συγκρ. 45 mm)	35	22	2	-

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι αναλογίες και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των συνθέσεων. Τα δοκίμια των κονιαμάτων ωρίμασαν σε μεταλλικές μήτρες στους 25 °C για 2 ημέρες και συντηρήθηκαν σε περιβάλλον 20 °C και RH=95 ± 5 % έως την ηλικία των 28 ημερών.

Πίνακας 2. Αναλογίες και σύσταση των συνθέσεων σε γραμμάρια (g)

Συνθέσεις	Ιπτάμενη τέφρα (CFA)	Σκωρία κάδου (LFS)	Τσιμέντο Π42.5 (PC)	Άμμος	Γυαλί	Αλκαλικός ενεργοποιητής	Υγρά/Κονία
C	-	-	500	600	900	350*	0.70*
CFA 100	500	-	-	600	900	330	0.66
CFA:LFS 80:20	400	100	-	600	900	320	0.64
CFA:LFS 50:50	250	250	-	600	900	280	0.56
CFA:C 80:20	400	-	100	600	900	300	0.60

*νερό

2.2 Φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά

Δύο τύποι δοκιμίων παρήχθησαν: πρίσματα 40x40x160 mm και κύβοι διαστάσεων 50x50x50 mm για τις ανάγκες των διαδικασιών δοκιμής. Τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των πρισματικών και των κυβικών κονιαμάτων δίνονται στους Πίνακες 3 και 4, αντίστοιχα. Τα δοκίμια ελέγχθηκαν σε θλίψη και κάμψη σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 στις 7, 28 και 90 ημέρες. Σε ηλικία 28 ημέρες προσδιορίστηκε το pH και το πορώδες των κονιαμάτων

σύμφωνα με τη μέθοδο RILEM CPC 11.3, ενώ μετρήθηκε και η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων για τον προσδιορισμό της συνεκτικότητας του υλικού (UPV).

Πίνακας 3. Φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά πρισματικών κονιαμάτων

Δοκίμια (40X40X160) mm	Θλιπτική αντοχή (MPa)			Καμπτική αντοχή (MPa)			pH	Πορώδες (%)	UPV (km/s)
	7ημ	28ημ	90ημ	7ημ	28ημ	90ημ			
C	8.75	23.22		2.69	3.32		13.2	6.5	4.26
CFA 100	9.27	11.18	16.12	4.06	6.55	6.28	12.33	13.56	3.96
CFA:LFS 80:20	12.94	13.07	20.85	4.46	4.37	3.82	12.55	8.65	3.83
CFA:LFS 50:50	11.25	16.63	19.13	3.23	7.82	4.58	13.02	10.27	4.26
CFA:C 80:20	12.89	17.76	24.38	4.45	5.73	6.08	13.06	8.8	4.19

Πίνακας 4. Φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά κυβικών κονιαμάτων 28 ημερών

Δοκίμια (50X50X50) mm 28 ημερών	Θλιπτική αντοχή (MPa)	UPV (km/s)
C	23.00	4.15
CFA 100	15.78	3.21
CFA:LFS 80:20	31.51	3.33
CFA:LFS 50:50	24.83	3.68
CFA:C 80:20	24.01	3.79

Όπως φαίνεται στους Πίνακες 3 και 4, υπάρχει μια συνεχής ανάπτυξη αντοχής έως τις 90 ημέρες. Η βέλτιστη τιμή θλιπτικής αντοχής καταγράφεται στην ηλικία των 90 ημερών για τις συνθέσεις των πρισματικών δοκιμίων CFA:LFS 80:20 και CFA:C 80:20. Δεδομένου ότι τα δοκίμια αποθηκεύτηκαν σε κλιματικό θάλαμο με RH $95 \pm 5\%$ και θερμοκρασία 20°C έως τις 28 ημέρες μετά τη σκλήρυνσή τους στους 25°C , φαίνεται ότι εκτός από το μηχανισμό της αλκαλικής ενεργοποίησης, ο υδραυλικός και ο ποζολανικός χαρακτήρας των συνδετικών κονιών συμβάλλει και εξελίσσεται παράλληλα. Αυτοί οι δύο μηχανισμοί στην περίπτωση της CFA έχουν μελετηθεί σε προηγούμενες εργασίες [7] [8].

2.3 Δοκιμές ανθεκτικότητας

Τα αλκαλικά ενεργοποιημένα κονιάματα υποβλήθηκαν σε διαδικασίες δοκιμών σύμφωνα με πρότυπα ή γνωστές μεθοδολογίες. Όλες οι δοκιμές έγιναν σε κονιάματα ηλικίας 28 ημερών και ήταν οι εξής: κύκλοι ύγρανσης - ξήρανσης, ψύξης – απόψυξης με βάση ASTM C666, διείδυσης χλωριόντων από θαλασσινό νερό, έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και σε διάλυμα θεικού οξέος. Μία σύντομη περιγραφή κάθε διαδικασίας ακολουθεί:

- Κύκλοι ύγρανσης - ξήρανσης σε απεσταγμένο νερό: 2 ημέρες εμβάπτιση στο νερό, 2 ημέρες έκθεση στους 40°C . Προσδιορισμός απώλειας μάζας (%) και θλιπτικής αντοχής στους 0, 50 και 100 κύκλους.
- Κύκλοι ψύξης – απόψυξης: 4 ώρες παραμονή στους $-18 \pm 2^\circ\text{C}$, 4 ώρες στους $4 \pm 2^\circ\text{C}$ σε νερό. Μέτρηση της απώλειας μάζας, της θλιπτικής αντοχής και της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων UPV, μετά από 0, 21 και 49 κύκλους.
- Κύκλοι ύγρανσης - ξήρανσης σε θαλασσινό νερό: 8 ώρες παραμονή σε θαλασσινό νερό, 16 ώρες ξήρανση στους 40°C . Μέτρηση απώλειας μάζας, διείδυσης χλωριόντων βασιζόμενη στο Nordtest NT Build 443 και αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων.
- Έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες: στους 200°C , 400°C , 600°C και 800°C ανά 2 ώρες. Προσδιορισμός της απώλειας μάζας (%), της UPV και της αντοχής σε θλίψη.

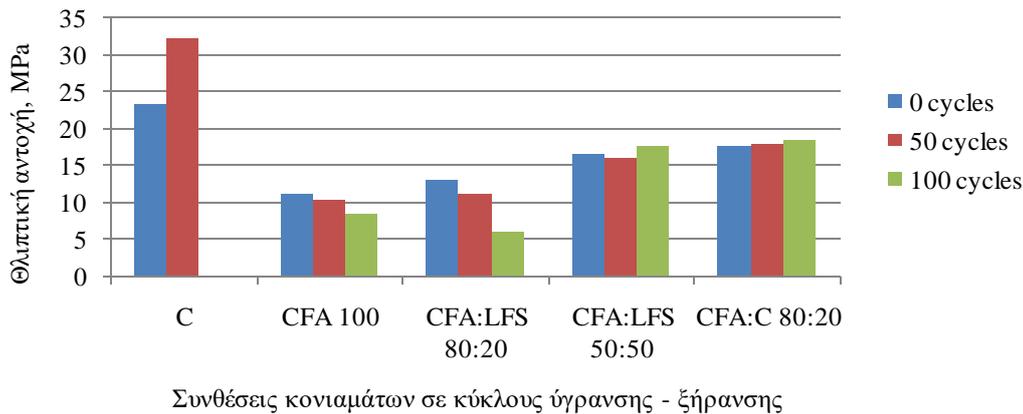
- Αντίσταση στο θειικό οξύ: εμφάνιση σε διάλυμα H₂SO₄ (5% κ.β.). Προσδιορισμός της UPV, της θλιπτικής αντοχής και της (%) απώλειας αυτής στις 0, 28 και 90 ημέρες μετά την προσβολή.

2.3.1 Κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης

Οι μετρήσεις της απώλειας μάζας (%) των κονιαμάτων των 28 ημερών μετά από 50 και 100 κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης σε σχέση με το αρχικό υλικό στους 0 κύκλους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5, ενώ στο Διάγραμμα 1 δίνεται η αντοχή σε θλίψη των συνθέσεων στους παραπάνω κύκλους. Κάθε μέτρηση αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή τριών δοκιμίων.

Πίνακας 5. Απώλεια μάζας (%) κονιαμάτων μετά από κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης

Δοκίμια (40X40X160) mm 28 ημερών	Απώλεια μάζας (%) σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης	
	50 κύκλοι	100 κύκλοι
C	1.79	
CFA 100	1.15	3.86
CFA:LFS 80:20	0.90	4.63
CFA:LFS 50:50	0.72	2.10
CFA:C 80:20	0.20	1.41



Διάγραμμα 1. Θλιπτική αντοχή κονιαμάτων μετά από κύκλους ύγρανσης - ξήρανσης

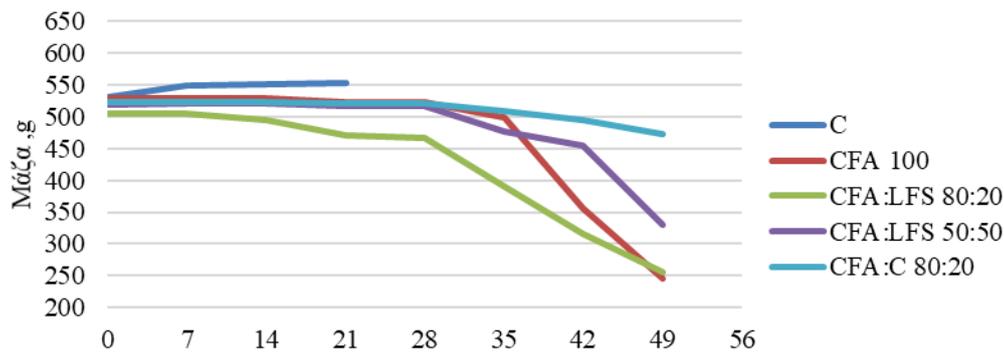
Η συμπεριφορά μεταξύ των αλκαλικά ενεργοποιημένων κονιαμάτων που βασίζονται στην CFA σε κύκλους ύγρανσης - ξήρανσης θα μπορούσε να χαρακτηριστεί πολύ καλή, αφού μετά από 100 κύκλους η αντοχή σε θλίψη των κονιαμάτων (εκτός από τη σύνθεση CFA:LFS 80:20) δεν έχει μειωθεί και η απώλεια μάζας είναι επίσης χαμηλή. Η αντοχή των κονιαμάτων σε κύκλους ύγρανσης - ξήρανσης ήταν καλή με χαμηλή απώλεια μάζας 1-2% μετά από 50 κύκλους και ως 4-5% μετά από 100 κύκλους.

2.3.2 Ψύξη - απόψυξη

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων 28 ημερών μετά από κύκλους ψύξης - απόψυξης και υποδεικνύεται η πτώση της αντοχής. Η απώλεια μάζας (σε g) δίδεται στο Διάγραμμα 2.

Πίνακας 6. Φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά κονιαμάτων μετά από κύκλους ψύξης - απόψυξης

Δοκίμια (40X40X160) mm 28 ημερών	Θλιπτική αντοχή (MPa)			UPV (km/s)		
	0	21	49	0	21	49
	κύκλοι	κύκλοι	κύκλοι	κύκλοι	κύκλοι	κύκλοι
C	23.22	22.55		4.26	3.65	
CFA 100	11.18	2.97	1.95	3.96	1.23	-
CFA:LFS 80:20	13.07	2.45	1.89	3.83	1.15	-
CFA:LFS 50:50	16.63	12.11	3.51	4.26	1.72	-
CFA:C 80:20	17.76	9.55	8.32	4.19	1.93	1.03



Συνθέσεις κονιαμάτων σε κύκλους ψύξης - απόψυξης

Διάγραμμα 2. Απώλεια μάζας κονιαμάτων μετά από κύκλους ψύξης - απόψυξης

Από τον Πίνακα 6 και το Διάγραμμα 2 φαίνεται ότι οι συνθέσεις CFA:LFS 50:50 και CFA:C 80:20 διατηρούσαν το 50% έως 75% της θλιπτικής αντοχής τους μέχρι τους 21 κύκλους, αλλά μετά από 49 κύκλους καταγράφηκε σημαντική μείωση αντοχής και απώλειας μάζας για τα κονιάματα με βάση την CFA. Η καθαρή σύνθεση τσιμέντου C, έδειξε μια πολύ μικρή μεταβολή μάζας (περίπου 3%) και αντοχής μετά από 21 κύκλους ψύξης - απόψυξης.

2.3.3 Κύκλοι ύγρυνσης – ξήρανσης σε θαλασσινό νερό

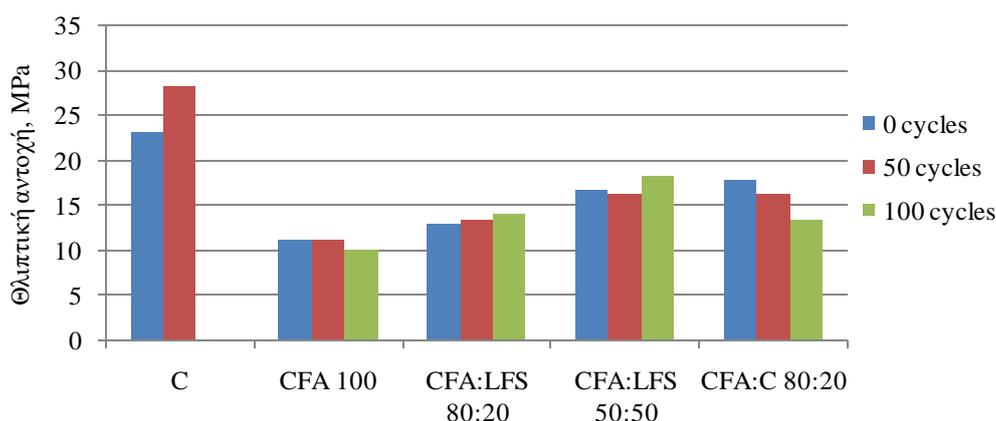
Η απώλεια μάζας (σε g) των δοκιμίων των 28 ημερών που εμβαπτίστηκαν σε κύκλους ύγρυνσης – ξήρανσης σε θαλασσινό νερό παρουσιάζεται στον Πίνακα 7, ενώ οι μεταβολές της αντοχής στη θλίψη απεικονίζονται στο Διάγραμμα 3. Η περιεκτικότητά τους σε χλωριόντα σε βάθος διείσδυσης 15 mm από την εκτιθέμενη επιφάνεια των δοκιμίων, προσδιορίστηκε με αναλυτικές μεθόδους και συμπεριλαμβάνεται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 7. Απώλεια μάζας κονιαμάτων μετά από κύκλους ύγρυνσης - ξήρανσης σε θαλασσινό νερό

Δοκίμια (40X40X160) mm 28 ημερών	Απώλεια μάζας (σε g)	
	Κύκλοι ύγρυνσης-ξήρανσης σε θαλασσινό νερό	
	50 κύκλοι	100 κύκλοι
C	0.002	
CFA 100	0.010	0.025
CFA:LFS 80:20	-0.001	0.009
CFA:LFS 50:50	-0.002	0.003
CFA:C 80:20	-0.009	-0.006

Πίνακας 8. Συγκέντρωση χλωριόντων (% κ.β.) σε 15 mm βάθος διείσδυσης

Δοκίμια (40X40X160) mm 28 ημερών (βάθος διείσδυσης 15 mm)	Ολικά Cl (% κ.β.)	Ελεύθερα Cl (% κ.β.)
C	0.48	0.32
CFA 100	0.61	0.55
CFA:LFS 80:20	0.73	0.68
CFA:LFS 50:50	0.54	0.41
CFA:C 80:20	0.52	0.39



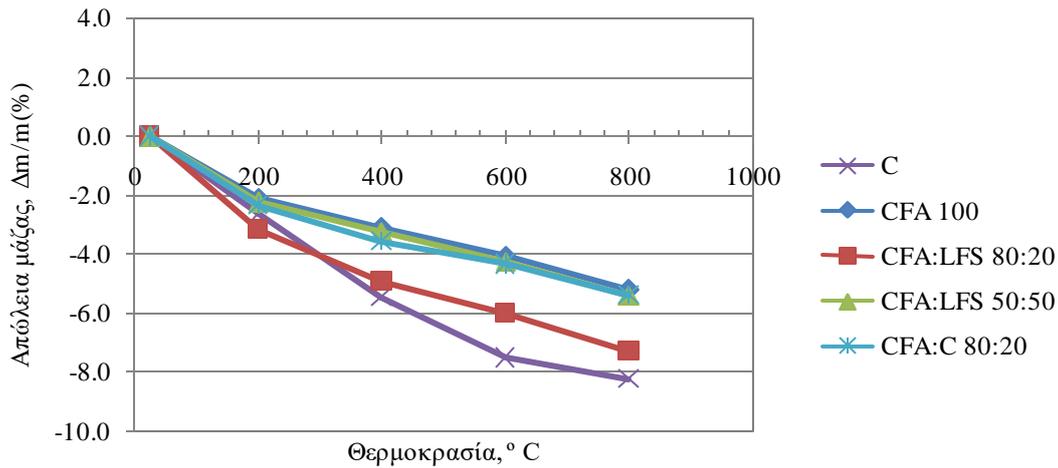
Συνθέσεις κονιαμάτων σε κύκλους ύγρανσης - ξήρανσης σε θαλασσινό νερό

Διάγραμμα 3. Θλιπτική αντοχή κονιαμάτων μετά από κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης σε θαλασσινό νερό

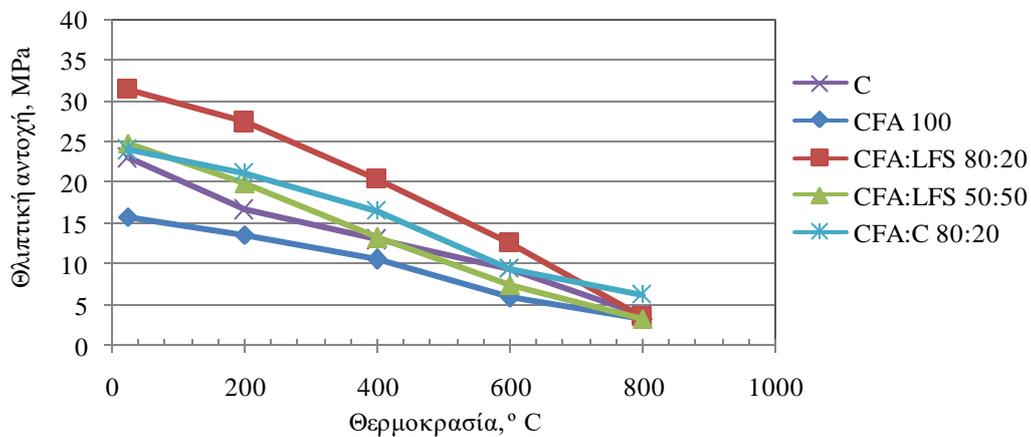
Όλες οι συνθέσεις με βάση την CFA έδωσαν καλά αποτελέσματα στο θαλασσινό νερό με μικρή μεταβολή της αντοχής και διατήρηση της συνεκτικότητάς τους. Έως και τους 100 κύκλους ύγρανσης - ξήρανσης σε θαλασσινό νερό (που περιέχει 3,5% κ.β. NaCl) τα κονιάματα με βάση την CFA δεν παρουσίασαν σημαντική μεταβολή στη θλιπτική τους αντοχή ή στην απώλεια μάζας τους. Σε συνθέσεις όπως CFA:LFS 80:20 και CFA:LFS 50:50 καταγράφηκε αύξηση της αντοχής των δοκιμίων μετά από τους 100 κύκλους. Φυσικά, τα κονιάματα με βάση την CFA έχουν χαμηλότερη ικανότητα αντοχής γύρω στο ένα τρίτο από το κονίαμα τσιμέντου. Η περιεκτικότητα σε ολικά χλωριόντα (% κ.β.), σε βάθος διείσδυσης 15 mm από την εκτεθειμένη επιφάνεια, είναι υψηλότερη σε όλα τα αλκαλικά ενεργοποιημένα κονιάματα της CFA σε σύγκριση με το αμιγές τσιμεντοκονίαμα C. Οι μικρότερες συγκεντρώσεις διείσδυσης των ολικών χλωριόντων, που εμφανίζουν τα κονιάματα από τσιμέντο έναντι εκείνων που παρασκευάστηκαν από τέφρα πιθανόν να οφείλεται στο μικρότερο πορώδες αυτών και την καλύτερη συνεκτικότητα του υλικού. Στις υπόλοιπες συνθέσεις τέφρας φαίνεται ότι το υψηλότερο ποσοστό πορώδους σε σχέση με αυτά του τσιμέντου οδηγεί σε μεγαλύτερα ποσοστά ελεύθερων χλωριόντων στο δίκτυο του υλικού.

2.3.4 Έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες

Η απώλεια μάζας στα κυβικά δοκίμια διαστάσεων 50x50x50 mm των κονιαμάτων μετά από έκθεσή τους στους 200, 400, 600 και 800 °C φαίνεται στο Διάγραμμα 4, ενώ η μείωση θλιπτικής αντοχής και της UPV δίνονται στο Διάγραμμα 5 και στον Πίνακα 9.



Διάγραμμα 4. Απώλεια μάζας (%κ.β.) κονιαμάτων μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες



Διάγραμμα 5. Θλιπτική αντοχή κονιαμάτων μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες

Πίνακας 9. Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων στα κονιάματα μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες

Δοκίμια (50X50X50) mm 28 ημερών	UPV (km/s)				
	25°C	200°C	400°C	600°C	800°C
C	4.15	4.01	3.92	2.84	1.85
CFA 100	3.21	3.07	2.92	1.8	1.1
CFA:LFS 80:20	3.33	3.23	3.1	2.05	1.1
CFA:LFS 50:50	3.68	3.35	3.14	1.88	1.08
CFA:C 80:20	3.79	3.25	3.01	1.95	1.2

Από τα διαγράμματα της απώλειας μάζας (Διάγραμμα 4) και αντοχής (Διάγραμμα 5) φαίνεται ότι η συμπεριφορά των κονιαμάτων βασιζόμενων σε CFA κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες (στους 200, 400, 600 και 800 °C) είναι ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπόψη ότι περιείχαν αδρανή γυαλιού που επηρεάζονται έντονα από τη θερμοκρασία. Μέχρι τη θερμοκρασία των 400 °C η εναπομένουσα θλιπτική αντοχή αυτών μετά κυμαίνεται στο 65-

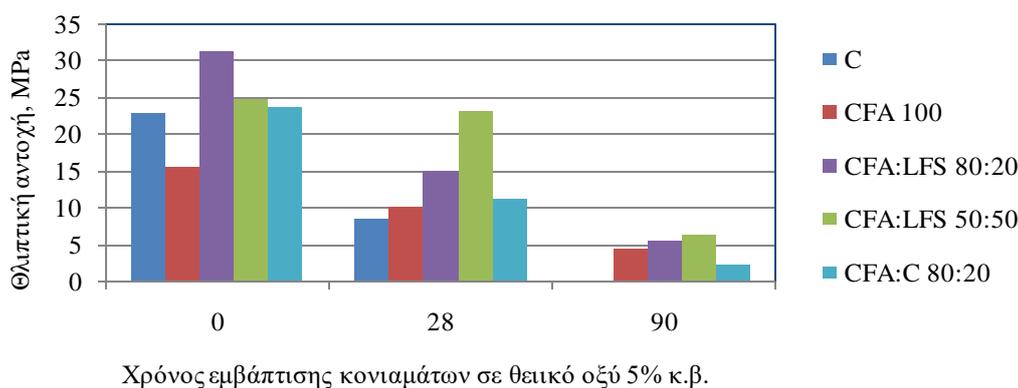
70% της αρχικής. Μετά την έκθεση στους 800 °C, τα δοκίμια απώλεσαν το 80% περίπου της αντοχής. Στον Πίνακα 9, αποτιμάται η σταδιακή μείωση της συνεκτικότητας του υλικού των δοκιμών τέφρας, που ως τους 400°C είναι σχεδόν παρόμοια αυτής του κονιάματος C.

2.3.5 Αντίσταση στο θειικό οξύ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων UPV, της αντοχής σε θλίψη και του ποσοστού (%) μείωσής της, έπειτα από την έκθεση των δοκιμών σε περιβάλλον θειικού οξέος (H₂SO₄ 5% κ.β.) παρατίθενται στον Πίνακα 10 και στο Διάγραμμα 6. Η δοκιμή έγινε σε κονιάματα ηλικίας 28 ημερών.

Πίνακας 10. Φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά κονιαμάτων μετά από έκθεση σε θειικό οξύ

Δοκίμια (50X50X50) mm 28 ημερών	UPV (km/s)			Θλιπτική αντοχή (MPa)			Απώλεια θλιπτικής αντοχής (%)	
	0ημ	28ημ	90ημ	0ημ	28ημ	90ημ	28ημ	90ημ
C	4.15	2.48		23.00	8.71		-62.1	
CFA 100	3.21	2.13	-	15.78	10.24	4.72	-35.1	-70.1
CFA:LFS 80:20	3.33	2.65	1.92	31.51	15.22	5.58	-51.7	-82.3
CFA:LFS 50:50	3.68	2.98	1.63	24.83	23.31	6.58	-6.1	-73.5
CFA:C 80:20	3.79	2.35	-	24.01	11.42	2.44	-52.4	-89.8



Διάγραμμα 6. Θλιπτική αντοχή κονιαμάτων μετά από εμφάνιση σε θειικό οξύ

Με βάση τον Πίνακα 10 και το Διάγραμμα 6 φαίνεται ότι τα αλκαλικά ενεργοποιημένα κονιάματα παρουσιάζουν σχετικά καλή αντίσταση στην προσβολή με διάλυμα H₂SO₄ 5% κ.β. Μετά από εμφάνιση των ενεργοποιημένων δοκιμών στο οξύ για σχεδόν ένα μήνα, καταγράφηκε πτώση αντοχής 50% περίπου σε σχέση με την αρχική (εκτός της CFA:LFS 50:50 που σχεδόν την διατήρησε) ενώ το τσιμεντοκονίαμα έχασε το 62% της αρχικής. Μετά από 90 ημέρες αυτή η πτώση ήταν μεγαλύτερη (>70%). Η φθορά του υλικού σε όλες τις συνθέσεις είναι προφανής λόγω της έντονης αντίδρασης του θειικού οξέος με κρυσταλλικές ασβεστιτικές φάσεις καθώς και με άμορφες φάσεις τύπου C-S-H σχηματίζοντας άλατα ασβεστίου (π.χ. με εναπόθεση γύψου). Επιπρόσθετα, στα αλκαλικά ενεργοποιημένα κονιάματα προκαλείται θραύση των δεσμών Si-O-Al με περαιτέρω αποδόμηση του αργιλοπυριτικού γεωπολυμερικού πλέγματος που οδηγεί σε μείωση της συνεκτικότητας και πτώσης της αντοχής.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αλκαλικά ενεργοποιημένα κονιάματα εκτέθηκαν σε μια σειρά μεθόδων δοκιμών που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας κονιαμάτων/σκυροδεμάτων με βάση το τσιμέντο. Αν και η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων ηλικίας 28 ημερών ήταν σχετικά χαμηλή (12-18 MPa) η ανθεκτικότητα τους κατά την επαναλαμβανόμενη έκθεση ακόμη και σε επιθετικές συνθήκες των εφαρμοζόμενων μεθόδων δοκιμής ήταν πολύ καλή. Είναι γεγονός ότι χρειάζεται επιπλέον πειραματική εργασία για να προσδιοριστούν τα όρια αντοχής που απαιτούνται για την αντίσταση σε κάθε συγκεκριμένη κλάση έκθεσης σύμφωνα με το EN 206 Manual of Concrete. Με βάση αυτή την ερευνητική εργασία αλλά και την διεθνή βιβλιογραφία, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι μέχρι τώρα τα αποτελέσματα είναι πολύ ενθαρρυντικά για τα αλκαλικά ενεργοποιημένα υλικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Natali Murri, A., Rickard, W.D.A., Bignozzi, M.C., Van Riessen, A. (2013) High temperature behaviour of ambient cured alkali-activated materials based on ladle slag, *Cement and Concrete Research*, Vol. 43, pp 51-61.
2. Puertas, F., Mejía de Gutierrez, R., Fernandez-Jimenez, A., Delvasto, S., Maldonado, J. (2002) Alkaline cement mortars. Chemical resistance to sulfate and seawater attack, *Materiales de Construcción*, Vol.52, pp 55-71.
3. Monteiro, P.J.M. (2006) Scaling and saturation laws for the expansion of concrete exposed to sulfate attack, *Proceedings of National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 103, No. 31, pp 11467-11472.
4. Bilek, V., Szklorzova, H. (2009) Freezing and thawing resistance of alkali-activated concretes for the production of building elements. In: Malhotra, V.M., (ed.) *Proceedings of 10th CANMET/ACI Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, supplementary papers, Seville, Spain, pp. 661-670.
5. Provis J. L., van Deventer J. S. J. (Eds.) (2014) *Alkali Activated Materials : State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM, Springer, Netherlands.
6. Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Van Deventer, J. S. J. (2007) The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp 1590-1597.
7. Papayianni, I., Konopisi S. (2012) Study on Geopolymerization of High Lime Fly Ashes, *Proceedings of 8th Int. Conference Concrete in the Low Carbon Era*, Dundee, UK. pp. 519-533.
8. Papayianni I., Konopisi S., Kesikidou F. (2018) Physico-mechanical properties and durability aspects of alkali-activated calcareous fly ash/slag mortars. *Key Engineering Materials*, Vol. 761, 87-91.

Διερεύνηση των χαρακτηριστικών της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και της σκωρίας μεταλλακτών σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος

Κ. Εξάρχου, Φ. Κεσικίδου, Ε. Αναστασίου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: σκωρία σιδηρονικελίου, βιώσιμη αξιοποίηση, σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου, σκωρία μεταλλακτών, φυσικές ιδιότητες, χημικές ιδιότητες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τις τελευταίες δεκαετίες ένα από τα κυριότερα προβλήματα της Ελληνικής βιομηχανίας σιδηρονικελίου είναι η διάθεση των παραπροϊόντων που προκύπτουν κατά την μεταλλουργική διαδικασία. Οι ιδιότητες των σκωριώνσιδηρονικελίου ποικίλλουν και εξαρτώνται από τη διαδικασία παραγωγής τους. Για αυτόν τον σκοπό, δημιουργήθηκαν και εξετάστηκαν δοκίμια από διαφορετικές συνθέσεις. Αυτά αποτελούνταν από σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου και μεταλλακτών, αμφότερες προερχόμενες από το εργοστάσιο της ΛΑΡΚΟ ΓΜΜ. Α.Ε., καθώς και από φυσικά αδρανή. Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε μια σειρά ελέγχων προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή, η συρρίκνωση, ο χρόνος πήξης και η ανθεκτικότητά του. Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου αποδείχθηκε ότι υστερεί σε σχέση με τη σκωρία μεταλλακτών κατά τη χρήση της μεμονωμένα, χωρίς να συνδυαστεί με κάποιο άλλο αδρανές ή πρόσμικτο. Η συγκεκριμένη έρευνα απέδειξε ότι με την κατάλληλη σύνθεση τα παραπροϊόντα της βιομηχανίας σιδηρονικελίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές επιλύοντας τα οικονομικά και περιβαλλοντικά ζητήματα που ανακύπτουν από την απόθεσή τους σε χερσαίους και θαλάσσιους αποδέκτες.

Investigation of the characteristics of electric furnace slag and of converter slag in cement specimens

K. Exarchou, F. Kesikidou, E. Anastasiou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: Ferronickel, slag, Electric arc furnace slag, Converter slag, Concrete specimens

ABSTRACT: During the last decades one of the main problems of the Greek ferronickel industry is the distribution of the byproducts that outcome from the metallurgical process. The properties of ferronickel slags vary according to the processes that generate them. This paper aims to prove whether the utilization of these two byproducts in structures is feasible. In order to achieve this, different types of concrete specimens were made consisting of EAF slag and converter slag, both taken from LARCO's factory, and natural aggregates. Each mixture was tested for several parameters such as its strength, its shrinking, its time of set as well as for its durability. The EAF slag did not perform as well as the converter slag when it was used as single aggregate. This experimental work proves that with the appropriate composition the ferronickel industry byproducts can be used in concrete structures in order to avoid their deposition in the sea which causes severe environmental issues.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σιδηρονικέλιο αποτελεί μια από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στη μεταλλοβιομηχανία. Στην Ελλάδα τα κυριότερα κοιτάσματα του συγκεκριμένου μεταλλεύματος βρίσκονται στην Εύβοια, τη Βοιωτία, τη Φθιώτιδα και την Καστοριά. Από το 1952 ξεκίνησε η κατεργασία των σιδηρονικελιούχων πετρωμάτων, η οποία συστηματοποιήθηκε το 1963, με την ίδρυση της «Ανώνυμης Ελληνικής Μεταλλευτικής και Μεταλλουργικής Εταιρείας Λαρύμνης, ΛΑΡΚΟ ΑΕ»(Ζευγολής κ.α., 1999). Στις εγκαταστάσεις της πραγματοποιείται πυρομεταλλουργική επεξεργασία του αρχικού μεταλλεύματος, προκειμένου να προκύψει το εμπορικά διαθέσιμο προϊόν με την επιθυμητή περιεκτικότητα σε Νί. Η προαναφερόμενη διαδικασία περιλαμβάνει την κατεργασία του υλικού σε ηλεκτρικούς κλιβάνους και μεταλλάκτες. Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτουν δυο παραπροϊόντα, η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου και η σκωρία μεταλλακτών.

Δεδομένου του μεγάλου όγκου μεταλλευμάτων που επεξεργάζεται το εργοστάσιο της ΛΑΡΚΟ ΓΜΜ. Α.Ε. στη Λάρυμνα, οι ποσότητες των προαναφερθέντων σκωριών δεν είναι διόλου αμελητέες. Ένα μικρό μέρος τους διατίθεται προς αξιοποίηση. Ωστόσο, το μεγαλύτερο ποσοστό αποτίθεται σε κοντινούς υδάτινους και χερσαίους αποδέκτες(Τζεβελέκου, 2004). Η απόρριψη των σκωριών στο περιβάλλον δημιουργεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, επηρεάζοντας το τοπικό οικοσύστημα. Αξίζει να αναφερθεί ότι το ζήτημα που προκύπτει έχει και οικονομικές προεκτάσεις, καθώς η εμπορική διάθεση των συγκεκριμένων παραπροϊόντων θα μπορούσε να αποφέρει σημαντικά κέρδη στην ΛΑΡΚΟ ΓΜΜ. Α.Ε.

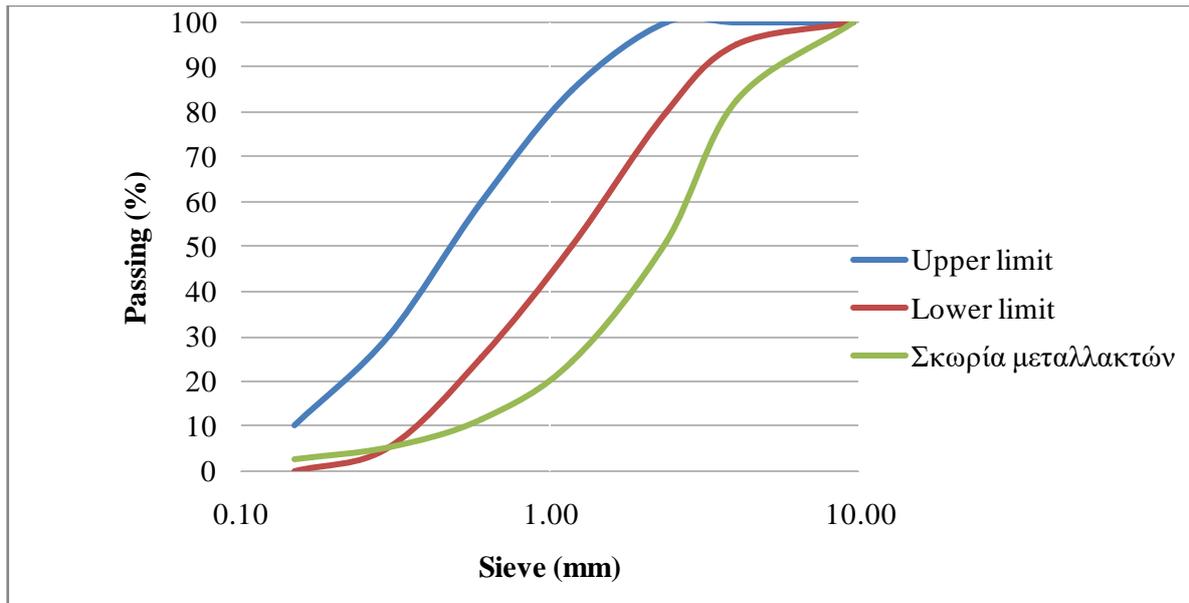
Τις τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιήθηκαν ορισμένες έρευνες για την εξεύρεση ενός βιώσιμου τρόπου αξιοποίησης των δυο υλικών. Οι ερευνητές εστιάζουν στον προσδιορισμό των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των σκωριών ηλεκτρικού κλιβάνου και μεταλλακτών και τη δυνατότητα χρήσης τους στο σκυρόδεμα (Papachristoforu, 2018).

Η παρούσα εργασία εστιάζει στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών (φυσικών και χημικών) της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και μεταλλακτών και την καταλληλότητα της χρήσης τους ως αδρανή σκυροδέματος. Δημιουργήθηκαν και ελέγχθηκαν τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων με αντικατάσταση των φυσικών αδρανών από αδρανή σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και σκωρίας μεταλλακτών.

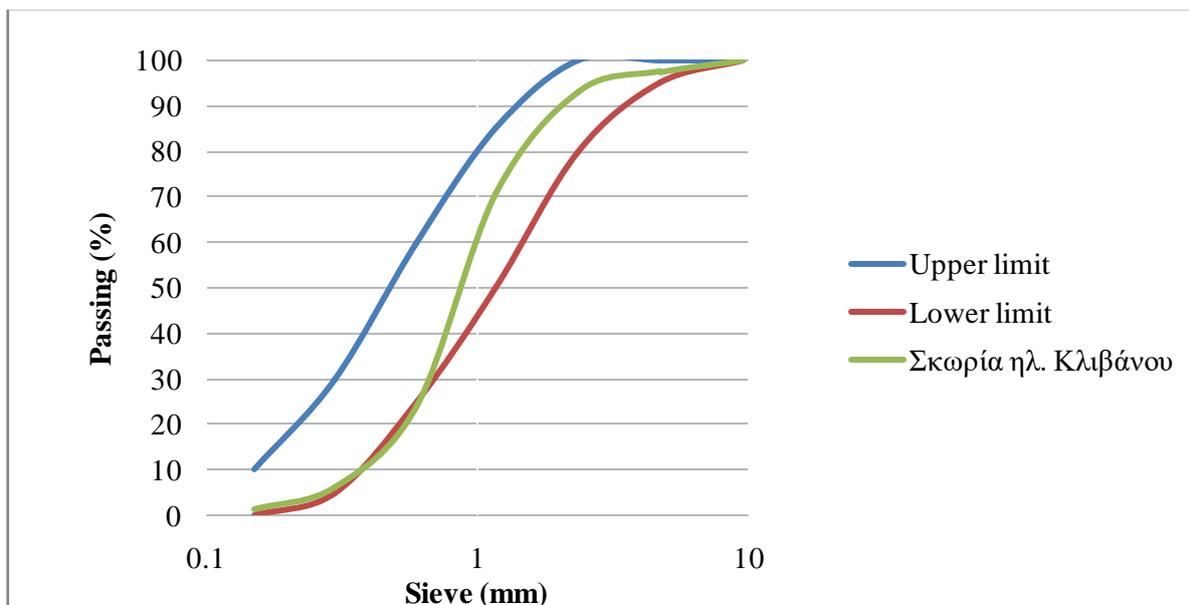
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Μέθοδοι και υλικά

Αρχικά προσδιορίστηκε η κοκκομετρία των σκωριών με βάση το Αμερικάνικο Πρότυπο ASTM C33-03. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα 1 και 2. Επιπλέον, έγινε έλεγχος εκπλυσιμότητας των αδρανών σύμφωνα με το πρότυπο EN 12457-2 στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του ΕΜΠ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.



Διάγραμμα 1. Κοκκομετρική καμπύλη δείγματος σκωρίας μεταλλακτών



Διάγραμμα 2. Κοκκομετρική καμπύλη δείγματος σκωρίας Ηλεκτρικού κλιβάνου

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το 50% περίπου της σκωρίας μεταλλακτών έχει μέγεθος κόκκου μικρότερο από 2,36 mm. Ενώ, στα κόσκινα 1,18 mm και 0,6 mm διέρχονται το 24% και το 11% του δείγματος. Από την ερμηνεία του γραφήματος προκύπτει ότι το 90% περίπου της σκωρίας Η/Κ έχει μέγεθος κόκκου μικρότερο από 2,36 mm. Μάλιστα το 70% του δείγματος είναι μικρότερο από 1,18 mm. Τέλος, το 24% της σκωρίας Η/Κ διέρχεται από το κόσκινο των 0,6 mm.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα δοκιμών εκπλυσιμότητας δειγμάτων σύμφωνα με EN 12457-2 (L/S=10 L/kg)

ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ (mg/kg)	ΟΡΙΟ ΑΔΡΑΝΩ N	ΟΡΙΟ ΜΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥ- ΝΩΝ	ΟΡΙΟ ΕΠΙΚΙΝΔΥ -ΝΩΝ	1 Σκωρία μεταλλακτών	2 Σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου
As	0,5	2	25	0,12	<0,10
Ba	20	100	300	<0,10	0,20
Cd	0,04	1	5	<0,02	0,06
Cr	0,5	10	70	<0,10	<0,10
Cu	2	50	100	<0,02	0,04
Hg	0,01	0,2	2	<0,01	<0,01
Mo	0,5	10	30	<0,10	<0,10
Ni	0,4	10	40	0,25	0,39
Pb	0,5	10	50	<0,02	<0,02
Sb	0,06	0,7	5	<0,05	<0,05
Se	0,1	0,5	7	<0,05	<0,05
Zn	4	50	200	<0,01	<0,01
Cl-	800	15 000	25 000	709	532
F-	10	150	500	<3,00	<3,00
SO ₄ ²⁻	1 000	20 000	50 000	115,2	181,1
TDS	4 000	60 000	100 000	1540	2220
pH				8,336	8,884
Αγωγιμότητα (μS/cm)				278	405

Από τα αποτελέσματα του τεστ εκπλυσιμότητας βαρέων μετάλλων φαίνεται ότι και οι δύο σκωρίες είναι εντός των ορίων των αδρανών και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα.

Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις. Αναλυτικότερα, για την αποτελεσματικότερη μελέτη των ιδιοτήτων των δυο υλικών αποφασίστηκε η ολική αντικατάσταση των αδρανών του μείγματος με την εκάστοτε σκωρία. Οι σκωρίες προέρχονται από το εργοστάσιο παραγωγής σιδηρονικελίου της ΛΑΡΚΟ ΓΜΜ Α.Ε. στη Λάρυμνα Φθιώτιδας. Για την πρώτη σύνθεση, η οποία αποτέλεσε και τη σύνθεση αναφοράς (σύνθεση R), χρησιμοποιήθηκε πρότυπη άμμος. Για τη δεύτερη και την τρίτη έγινε χρήση σκωρίας μεταλλακτών (σύνθεση C) και Ηλεκτρικού κλιβάνου (σύνθεση EAF) αντίστοιχα. Τέλος, λόγω της αυξημένης απαίτησης σε νερό της σύνθεσης EAF, δημιουργήθηκε και μια σειρά δοκιμών με συνδυασμό σκωρίας Ηλεκτρικού κλιβάνου και ασβεστολιθικού φίλλερ (Σύνθεση EAFf). Για την παραγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM I42.5. Οι αναλογίες των συνθέσεων φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων (μέρη βάρους)

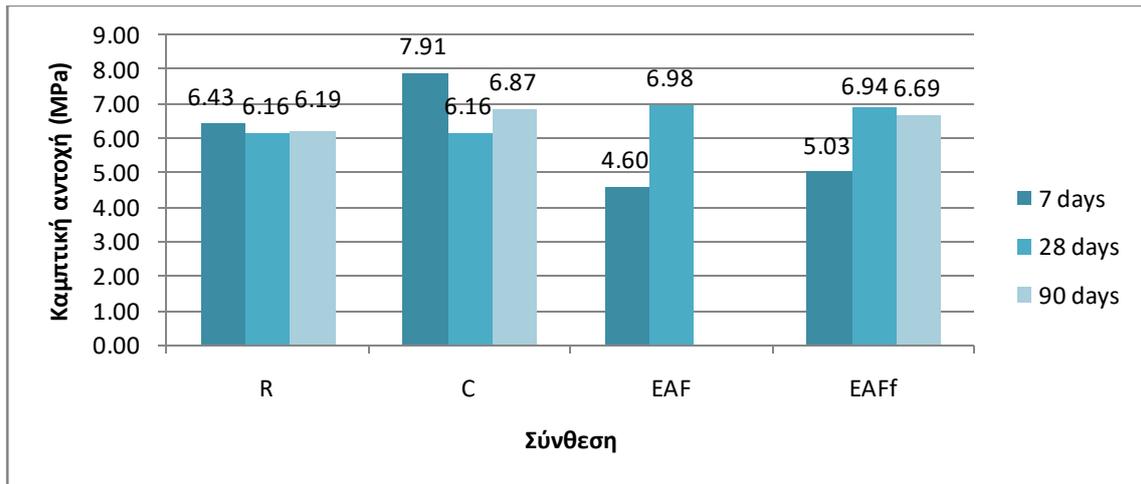
Σύνθεση	Κωδ.	Τσιμέντο	Αδρανή	N/K	Εξάπλωση (cm)
Αναφοράς	R	1	3	0,5	17
Σκωρία Μεταλλακτών	C	1	3	0,38	15,5
Σκωρία Ηλεκτρικού κλιβάνου	EAF	1	3	0,56	15,5
Σκωρία Ηλεκτρικού κλιβάνου +φίλλερ	EAFf	1	3 (10% αντικατάσταση με φίλλερ)	0,56	16

Παρασκευάστηκαν δοκίμια κονιαμάτων διαστάσεων (40x40x160) mm ακολουθώντας το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN196-1. Ο λόγος νερού/κονία προσδιορίστηκε με στόχο την κατάλληλη εργασιμότητα ($16\pm 1\text{cm}$) σύμφωνα με τον έλεγχο της τράπεζας εξάπλωσης (EN1015-3). Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε θάλαμο με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας (20°C , 95%RH) μέχρι τον έλεγχό τους. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά (αντοχή σε κάμψη και θλίψη), η συρρίκνωση των δοκιμίων στις πρώτες 28 ημέρες και διερευνήθηκε η ανθεκτικότητά τους σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης σε θαλασσινό νερό και νερό βρύσης. Τέλος, προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή επίδραση των σκωριών στο χρόνο πήξης των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε έλεγχος του χρόνου πήξης σε πάστες τσιμέντου με νερό από την έκπλυση των αδρανών σύμφωνα με το EN 1744-6.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

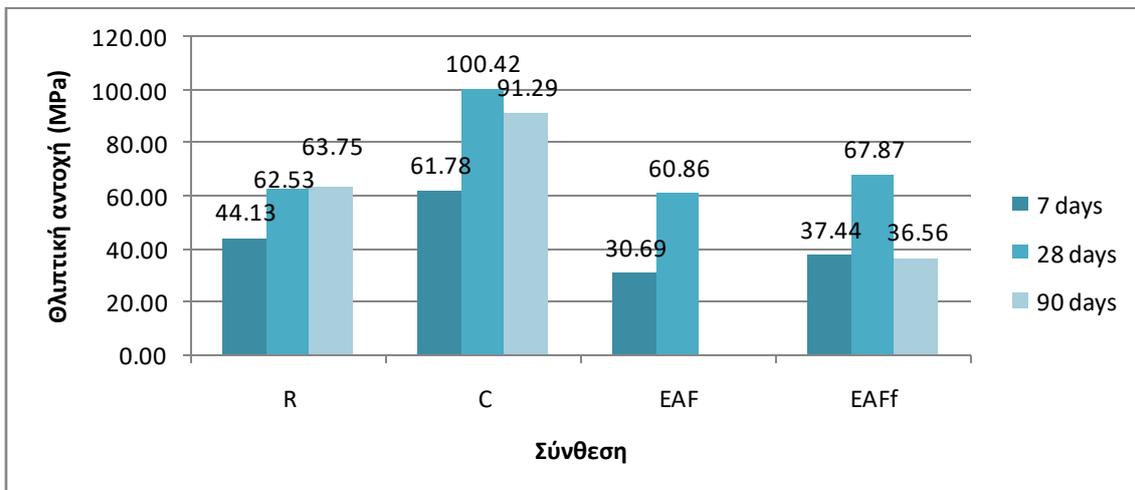
3.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής των τσιμεντοκονιαμάτων πραγματοποιήθηκε δοκιμή σε κάμψη στις 7,28 και 90 ημέρες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3. Φαίνεται ότι η αντικατάσταση των αδρανών με αδρανή σκωρίας μεταλλακτών (C) αυξάνει την αντοχή κατά 18% στις 7 ημέρες. Αντιθέτως, η σύνθεση με τα αδρανή σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (EAF) οδήγησε σε μείωση της κατά 28% σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς (R). Η αντικατάσταση της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου με 10% ασβεστολιθικό φίλλερ (EAFf) βελτίωσε την καμπτική αντοχή κατά 8% τις πρώτες 7 ημέρες.



Διάγραμμα3. Συγκριτικά αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη 7,28,90 ημερών

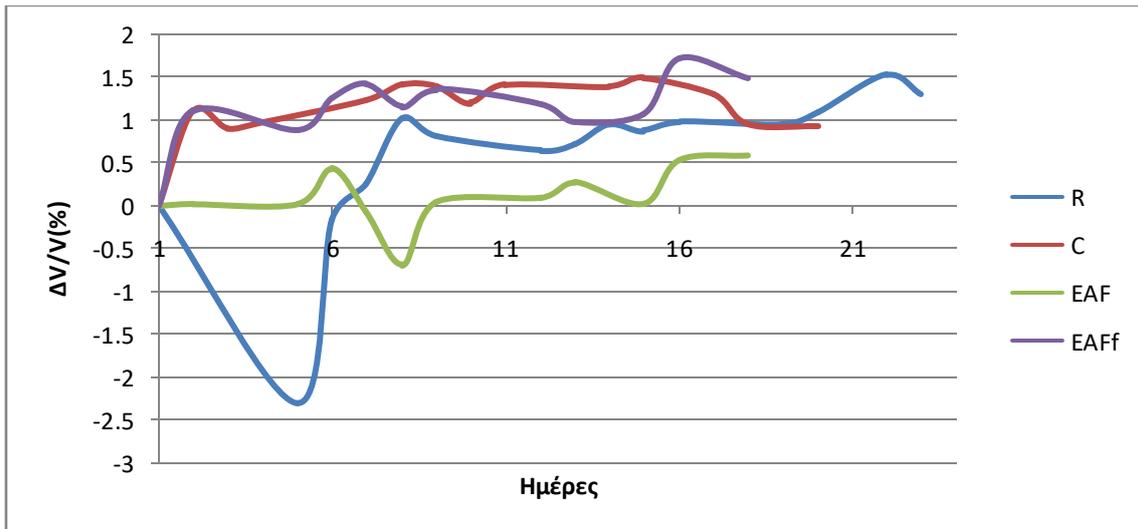
Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων για τις 7, 28 και 90 ημέρες. Είναι φανερό ότι η σύνθεση με τα αδρανή σκωρίας μεταλλακτών (C) πέτυχε τις υψηλότερες τιμές, αυξημένες κατά 17% στις 7 ημέρες σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς, ενώ στις 90 ημέρες η αντοχή σε θλίψη φτάνει τα 91 MPa. Η σύνθεση με τη σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου (EAF) παρουσίασε και πάλι μείωση της αντοχής κατά 30% συγκριτικά με το κονίαμα αναφοράς R, ενώ η αντικατάστασή της με φύλλερ στη σύνθεση EAFf οδήγησε σε μια βελτίωση της αντοχής κατά 15%.



Διάγραμμα4. Συγκριτικές θλιπτικές αντοχές 7,28,90 ημερών

3.2. Συστολή ξήρανσης

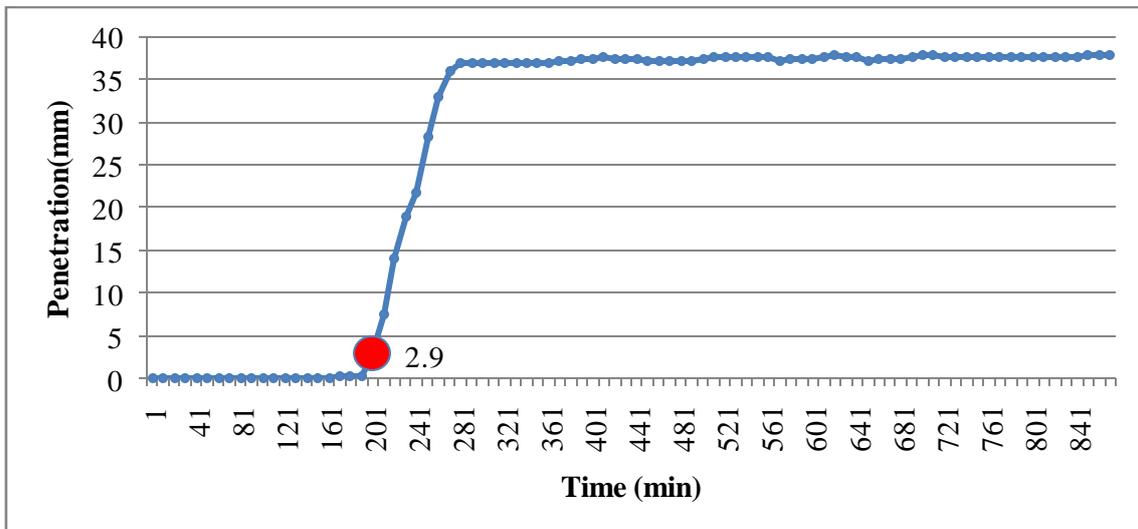
Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέτρησης της συρρίκνωσης των συνθέσεων για τις πρώτες ημέρες μέχρι τη σταθεροποίησή τους. Όπως φαίνεται, η σύνθεση αναφοράς παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διακύμανση, ενώ οι συνθέσεις με τη χρήση σκωριοαδρανών σταθεροποιούνται πιο γρήγορα. Ωστόσο, παρατηρείται ότι υπάρχει διόγκωση και όχι συρρίκνωση (<1,5%) για τις συνθέσεις με αδρανή σκωρίας.



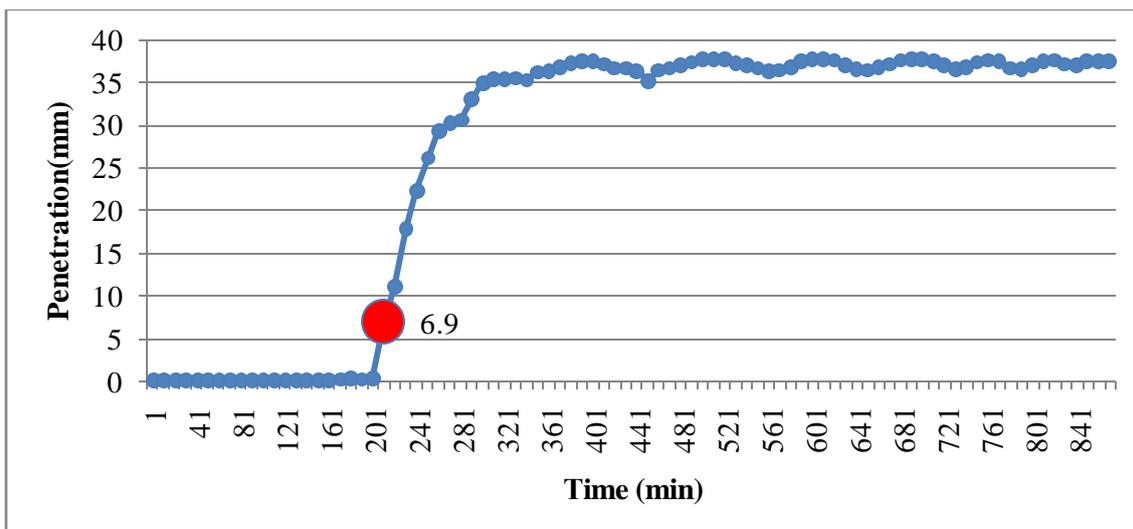
Διάγραμμα 5. Μεταβολή όγκου συνθέσεων

3.5. Δοκιμή VICAT

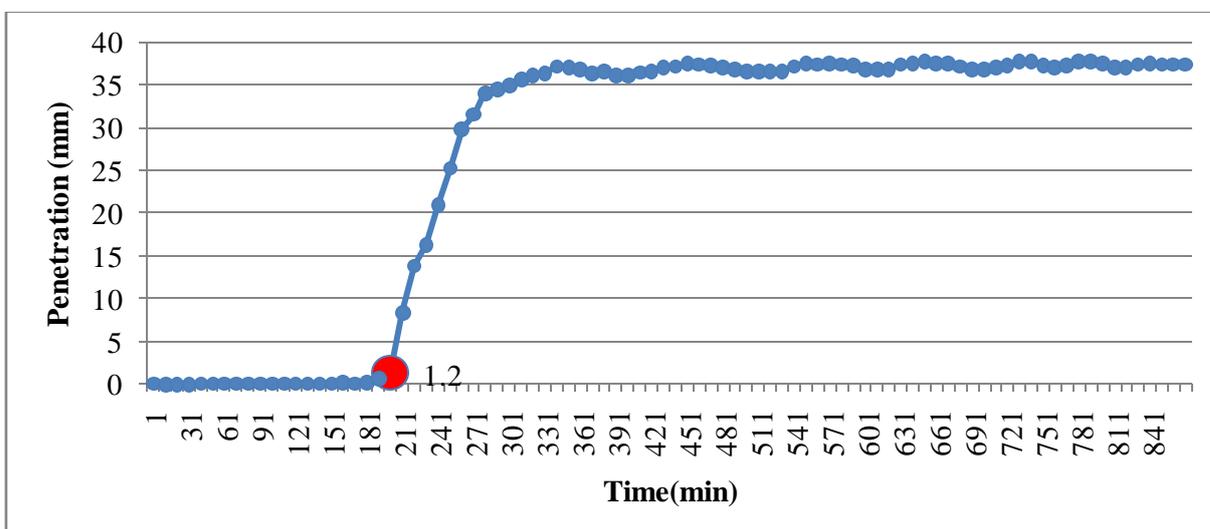
Από τη διενέργεια της δοκιμής VICAT, με χρήση της αυτόματης συσκευής, προσδιορίστηκε ο χρόνος αρχικής πήξης σε πάστες τσιμέντου που δημιουργήθηκαν με νερό από την έκπλυση των αδρανών των δύο σκωριών. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον EN 196-3, ενώ για τη δημιουργία των εκχυλισμάτων ακολουθήθηκε το πρότυπο EN 1744-6:2006. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Διαγράμματα 6-8.



Διάγραμμα 6. Δυσέδση βελόνας VICAT συναρτήσει χρόνου(σύνθεση αναφοράς)



Διάγραμμα7. Διείσδυση βελόνας συσκευής VICAT συναρτήσει του χρόνου(Σύνθεση σκωρίας Ηλεκτρικού κλιβάνου)

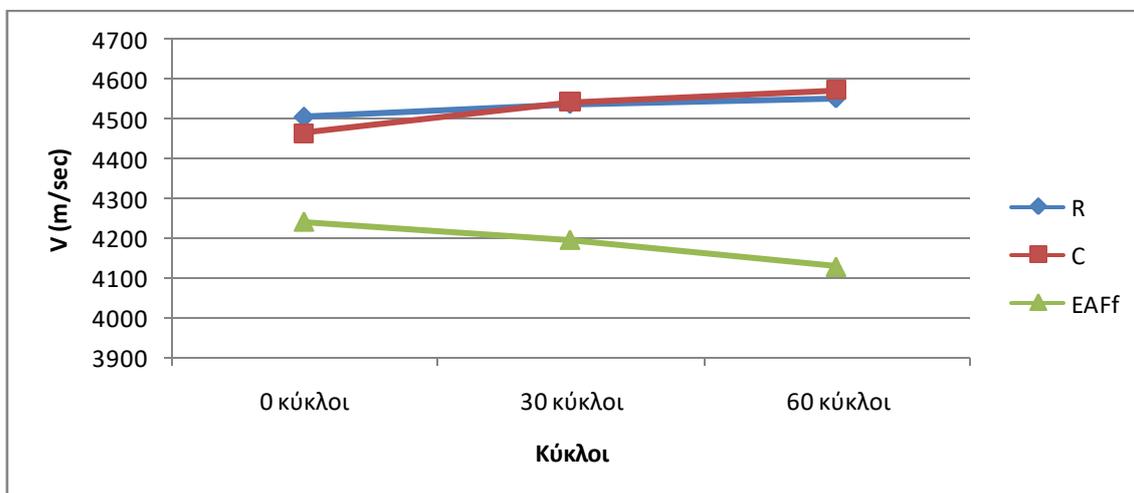


Διάγραμμα8. Διείσδυση βελόνας συσκευής VICAT συναρτήσει του χρόνου (Σύνθεση σκωρίας Μεταλλακτών)

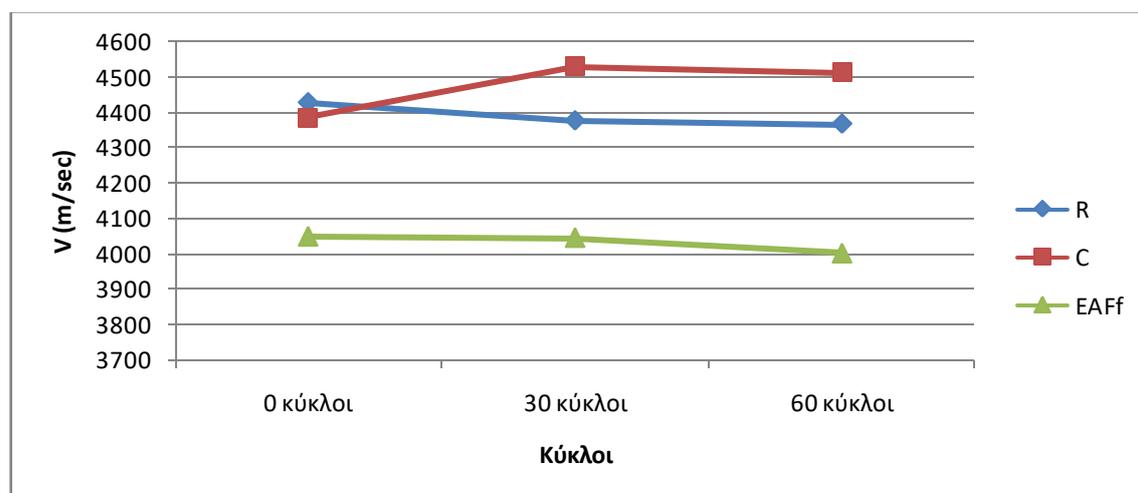
Από τα Διαγράμματα 5-7 προκύπτει ότι ο χρόνος αρχικής πήξεως της τσιμεντοκονίας για την σύνθεση αναφοράς προέκυψε στα **201 min**, όταν η διείσδυση της βελόνας ήταν **2,9 mm**. Αντίστοιχα για την σύνθεση με νερό από την έκπλυση σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου προέκυψε στα **211 min**, όταν η διείσδυση της βελόνας ήταν **6,9 mm**, ενώ για την σύνθεση σκωρίας μεταλλακτών προέκυψε στα **201 min**, όταν η διείσδυση της βελόνας ήταν **1,2 mm**. Σύμφωνα με τον **EN 1744-6:2006** ορίζεται ο δείκτης A , προκειμένου να εκφραστεί η επιρροή του εκχυλίσματος των αδρανών στον αρχικό χρόνο πήξης της τσιμεντοκονίας. Προέκυψε, για τη σύνθεση με τη σκωρία μεταλλακτών $A_M=0$, άρα ο αρχικός χρόνος πήξης της τσιμεντοκονίας **δεν επηρεάζεται** από τη χρήση της σκωρίας στο τσιμεντοκονίαμα. Στη τσιμεντόπαστα που δημιουργείται με χρήση της σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου παρατηρείται αρνητική τιμή του A , $A_{H/K}=-10$. Αυτό σύμφωνα με την παράγραφο 10 του προτύπου υποδεικνύει μια πολύ μικρή **καθυστέρηση της πήξης** εξαιτίας της χρήσης **σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου**.

3.6. Έλεγχος ανθεκτικότητας σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης

Οι συνθέσεις υποβλήθηκαν σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης και τα αποτελέσματα των μεταβολών στη δομή τους παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 9 και 10. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 60 κύκλοι (1 κύκλος = 24 ώρες).



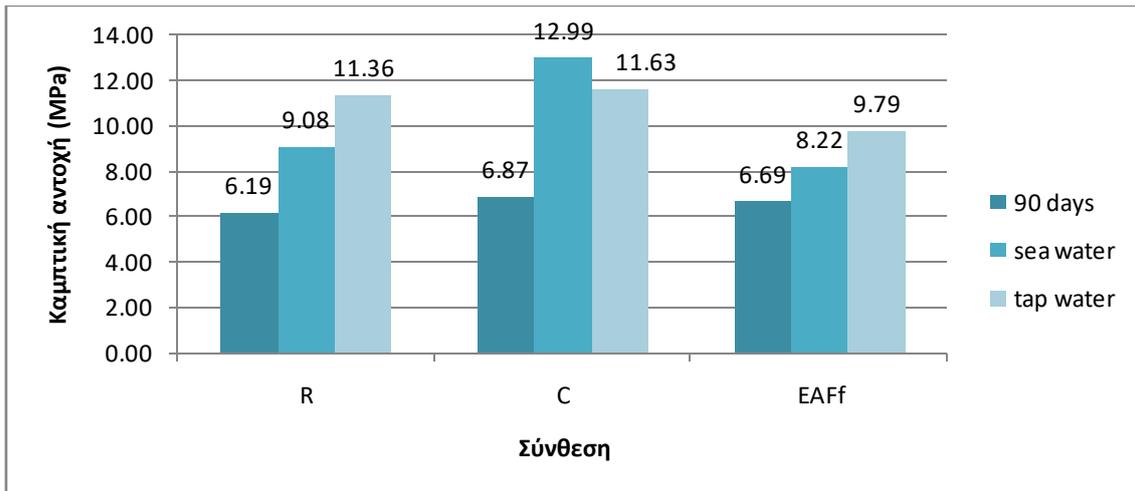
Διάγραμμα 5. Ταχύτητες υπερήχων συνθέσεων βυθισμένων σε πόσιμο νερό



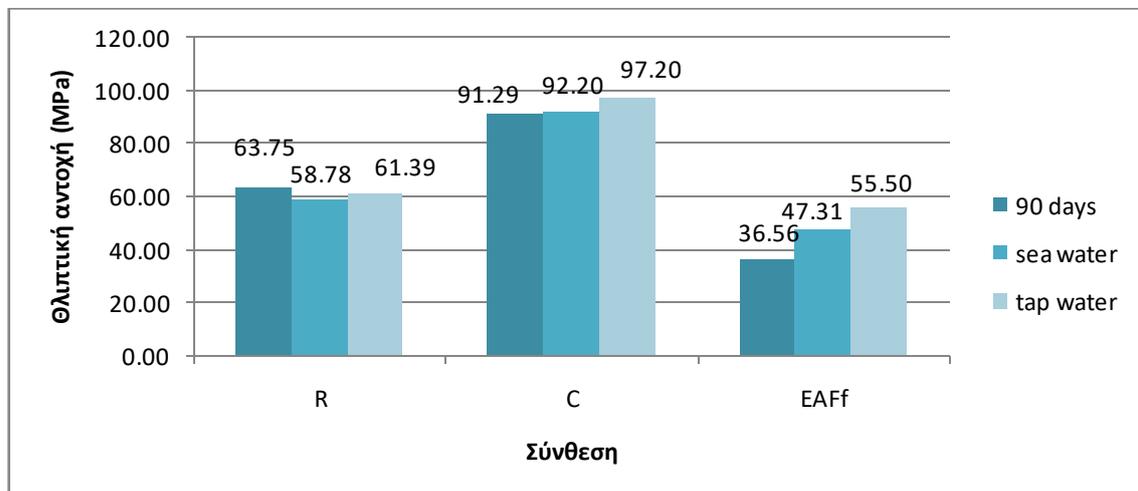
Διάγραμμα 6. Ταχύτητες υπερήχων συνθέσεων βυθισμένων σε θαλασσίνο νερό

Παρατηρείται ότι στα δοκίμια που ήταν κατασκευασμένα με σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου υπάρχει μια μείωση της ταχύτητας διέλευσης, τόσο σε αυτά που υποβλήθηκαν σε κύκλους με πόσιμο όσο και με θαλασσίνο νερό. Αντίθετα, αυτά που κατασκευάστηκαν με σκωρία μεταλλικών παρουσιάζουν μια αύξηση της ταχύτητας διέλευσης με το πέρας των κύκλων, ο ρυθμός αύξησης της οποίας μειώνεται με την επανάληψή τους.

Μετά το πέρας των κύκλων τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε έλεγχο καμπτικής και θλιπτικής αντοχής με στόχο να εξετασθεί πιθανή απώλεια αντοχής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα 10 και 11. Δεν παρατηρείται μείωση της αντοχής, αντιθέτως, υπάρχει μια μικρή αύξηση στα αποτελέσματα της θλίψης, η οποία είναι ακόμη μεγαλύτερη για την κάμψη.



Διάγραμμα 10. Καμπτική αντοχή συνθέσεων μετά από κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης



Διάγραμμα 11. Θλιπτική αντοχή συνθέσεων μετά από κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να διερευνηθούν πλήρως οι ιδιότητες της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και της σκωρίας μεταλλακτών, που αποτελούν παραπροϊόντα της βιομηχανίας παραγωγής σιδηρονικελίου, πραγματοποιήθηκε μια έρευνα με δυο κύριους άξονες. Από την μελέτη προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου εμφάνισε αυξημένες απαιτήσεις σε νερό, κατά τη χρήση της σε δοκίμια τσιμεντοκονιάματος σε σχέση με τη σκωρία μεταλλακτών.
- Σύμφωνα με τις κοκκομετρικές καμπύλες των δύο υλικών το κλάσμα της σκωρίας Η/Κ περιέχει μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού σε αντίθεση με αυτό της σκωρίας μεταλλακτών.
- Οι αντοχές που εμφάνισε η σκωρία μεταλλακτών, κυρίως σε θλίψη, είναι ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες της ηλεκτρικού κλιβάνου.
- Σε ότι αφορά το χρόνο αρχικής πήξης του τσιμεντοκονιάματος φαίνεται να μην επηρεάζεται από τη χρήση των σκωριών.
- Οι συνθέσεις δεν φαίνεται να επηρεάζονται από την έκθεσή τους σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ζευγώλης, Μ., Γαϊτάνος, Γ., Κοντός, Γ. 1999. Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΩΝ ΣΚΩΡΙΩΝ ΣΤΗ Γ. Μ. & Μ. ΑΕ ΛΑΡΚΟ
- Τζεβελέκου, Θ. 2004. Ανάπτυξη μεθόδου ανακύκλωσης και παραγωγής νέων υλικών με αναγωγική τήξη κονέων συστημάτων αντιρρύπανσης βιομηχανίας παραγωγής σιδηρονικελίου. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών
- M. Papachristoforou, E. Anastasiou A. Liapis, F. Kesikidou, Concrete weight coating for subsea pipelines using ferronickel and steel slag aggregates, Proc. of 6th International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management, 4th-7th September 2018, Chania, Greece
- ASTM C33 – 03 Standard Specification for Concrete Aggregates
- ΕΛΟΤ EN 197-1:2008 Τσιμέντο- Μέρος 1:Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα
- EN 196-1:1994 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength European Committee for Standardization BS EN 1015-3:1999 Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)
- BS EN 1744-6:2006 Tests for chemical properties of aggregates. Determination of the influence of recycled aggregate extract on the initial setting time of cement
- BS EN 196-3:2016 Methods of testing cement. Determination of setting times and soundness

Μελέτη αντοχής και ανθεκτικότητας σκυροδεμάτων με χρήση σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και σκωρίας κάδου ως αδρανή υλικά

Α. Χατζόπουλος, Κ.Κ. Σίδερης, Χ. Τάσσος

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Λέξεις κλειδιά: σκωρία κάδου, σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου, ανθεκτικότητα, αειφορία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η σκωρία είναι το κύριο βιομηχανικό απόβλητο της βιομηχανίας χάλυβα. Η παρούσα εργασία εξετάζει την αντικατάσταση συμβατικών ασβεστολιθικών αδρανών, άμμου και γαρμπιλιού, με αδρανή σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (ΣΗΚ) και αδρανή σκωρίας κάδου (ΣΚ), αντίστοιχου μεγέθους, σε διαφορετικά ποσοστά. Οι ιδιότητες που μελετήθηκαν είναι, η αντοχή σε θλίψη, η αντίσταση στην διείσδυση των χλωριόντων, το βάθος ενανθράκωσης, η αντίσταση σε κύκλους ψύξης-απόψυξης και, τέλος, οι δοκιμές για τη σταθερότητα του όγκου των σκυροδεμάτων με σκωρία. Σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, τα μείγματα με προσθήκη σκωρίας είχαν, είτε παρόμοια, είτε καλύτερη συμπεριφορά από τα μείγματα αναφοράς και στις δύο κατηγορίες αντοχής που μελετήθηκαν.

Production of durable self-compacting concrete using ladle furnace slag (LFS) as filler material.

A. Chatzopoulos, K.K. Sideris, CH. Tassos

Laboratory of Building Materials, Democritus University of Thrace

Keywords: ladle furnace slag, electric furnace slag, durability, sustainability

ABSTRACT: Slag is the main industrial waste of the steel industry. This paper examines the replacement of conventional limestone aggregates, sand and gravel, with electric furnace slag (EFS) aggregates and ladle furnace slag (LFS) aggregates, of similar size, at different rates. The properties studied are, compressive strength, resistance to chlorine penetration, carbonation depth, resistance to freeze-thaw cycles and, finally, tests for the stability of the volume of concretes with slag. In all the tests performed, the mixtures with slag aggregates had, either similar, or better results than the reference mixtures in both strength classes studied.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πιο διαδεδομένο οικοδομικό υλικό στον κόσμο είναι το σκυρόδεμα. Κατά τη διάρκεια των ετών χρήσης του έχει υποστεί πολλές αλλαγές και βελτιώσεις, αλλά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, καταβάλλονται προσπάθειες για να καταστεί φιλικό προς το περιβάλλον (Mansoeta1, 2004). Τα δομικά υλικά έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, κυρίως λόγω των φυσικών αδρανών που περιέχονται στα παραδοσιακά σκυροδέματα.

Αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να παράγουν σκυροδέματα χρησιμοποιώντας υλικά που, είτε παραμένουν αχρησιμοποίητα, είτε, ακόμη χειρότερα, μολύνουν το περιβάλλον με την εναπόθεση τους σε αυτό (Αναστασίου, 2009). Λόγω των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών (Pellegrinoeta1, 2008), ορισμένα από αυτά τα σκυροδέματα έχουν βελτιώσει τη μηχανική συμπεριφορά τους (Polancoeta1, 2011). Τα περισσότερα από αυτά τα μείγματα ταξινομούνται ως ειδικά σκυροδέματα και χρησιμοποιούνται για εργασίες όπως πεζοδρόμια, οδικές βάσεις και χωματουργικές εργασίες. Επιπλέον, η πλειοψηφία των

προηγούμενων ερευνητών ανέλυσε τη χρήση ενός μόνο τύπου αυτών των υλικών και δεν διερεύνησε την επίδραση του συνδυασμού αυτών με διαφορετικές αναλογίες, εστιάζοντας στη μηχανική απόδοση των παραγόμενων σκυροδεμάτων (Bravoetal, 2015). Σε αυτή την κατεύθυνση, το Πρότυπο EN206 (EN 206, 2013) ορίζει τη χρήση ακατέργαστων ανακυκλωμένων αδρανών έως 30% για τις πιο συνήθεις κατηγορίες αντοχής και έκθεσης. Στην παρούσα εργασία επελέγη η παραγωγή συμβατικών σκυροδεμάτων, στα οποία είχαμε αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών με γαρμπίλι ΣΗΚ και, επιπλέον, ένα μέρος της άμμου αντικαταστάθηκε, είτε με άμμο ΣΗΚ, είτε και με άμμο ΣΚ. Στη συνέχεια, έγιναν δοκιμές αντοχής και ανθεκτικότητας (Maslehuddinetal, 2003) και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες δοκιμές των σκυροδεμάτων με συμβατικά αδρανή (Aribasetal, 2014) που χρησιμοποιήθηκαν ως σκυροδέματα αναφοράς. Ένας άλλος στόχος αυτής της εργασίας είναι να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότερη χρήση του υπερρυστοποιητή, που μπορεί να αυξήσει το κόστος κατασκευής και να καταστήσει αναποτελεσματική τη χρήση της σκωρίας. Η παραγωγή χάλυβα πραγματοποιείται σε κλιβάνους βασικού οξυγόνου (BOF) καθώς και σε κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου (EAF). Στους τελευταίους παράγεται περισσότερο από το 40% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα καθώς λόγω του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας τους όλο και περισσότερες βιομηχανίες χάλυβα υιοθετούν τη χρήση τους. Η σκωρία που παράγεται από τους ηλεκτρικούς κλιβάνους (ΣΗΚ) αποτελεί το κύριο βιομηχανικό παραπροϊόν της παραγωγής χάλυβα και η παραγόμενη ποσότητα στην Ευρώπη υπολογίζεται σε περίπου 50 εκατομμύρια τόνους ετησίως (Pellegrinoetal, 2013). Η Σκωρία Κάδου (ΣΚ) ή ασβεστόχα σκωρία είναι παραπροϊόν της χαλυβουργίας και παράγεται κατά τη δεύτερη χύτευση του χάλυβα, ενώ αποτελεί εναλλακτική πηγή οξειδίου του ασβεστίου για την παραγωγή τσιμέντου.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Δέκα διαφορετικά μείγματα συμβατικού σκυροδέματος παρήχθησαν. Τα μείγματα ανήκαν στις κατηγορίες αντοχής C25/30 και C30/37, σύμφωνα με το Πρότυπο EN206-1 (ComiteEuropéennedeNormalisation, 2000). Όλα τα μείγματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τσιμέντα τύπου CEM II A-M / 32.5N και CEM II A-M/42.5N. Τα μείγματα δοκιμάστηκαν σε νωπή κατάσταση, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της EFNARC (2005). Τα χονδρόκοκκα αδρανή αποτελούνταν από θρυμματισμένο γρανίτη με μέγιστο μέγεθος 32mm. Τα λεπτόκοκκα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θραυστή ασβεστολιθική άμμος. Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου χρησιμοποιήθηκε ως ένα εναλλακτικό υλικό αντικατάστασης των αδρανών υλικών σε τέσσερα μείγματα για κάθε κατηγορία αντοχής. Στα τρία από αυτά το γαρμπίλι αντικαταστάθηκε από γαρμπίλι ΣΗΚ σε ποσοστό 50% κατ' όγκο και στο τέταρτο σε ποσοστό 100%. Στα δύο από τα τρία μείγματα, με 50% γαρμπίλι ΣΗΚ, η άμμος αντικαταστάθηκε με άμμο ΣΗΚ σε ποσοστό 30%, ενώ στο ένα από αυτά, επιπλέον 30% της άμμου αντικαταστάθηκε με άμμο ΣΚ Υψηλού εύρους, μείωσης νερού, καρβοξυλικού αιθέρα, πολυμερές πρόσμικτο προστέθηκε σε διαφορετικές δοσολογίες, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα.

Η χημική ανάλυση των τσιμέντων και των σκωριών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση τσιμέντων και σκωριών

	CEM II 32.5N	CEM II 42.5R	ΣΗΚ	ΣΚ
SiO ₂	28	23.85	10.89	6.53
Al ₂ O ₃	9	5.22	7.71	2.33
Fe ₂ O ₃	5.5	4.13	29.19	8.69
CaO	48	58.2	33.52	30.85
MgO	2.2	3.2	4.03	4.52
SO ₃	3.2	3.3	-	-
K ₂ O	1.5	0.68	0.03	-
Na ₂ O	0.5	0.32	0.1	0.13
TiO ₂	-	0.24	0.43	0.14
P ₂ O ₅	-	0.06	-	-
SrO	-	0.03	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0.02	0.34	0.13
ZnO	-	0.01	-	0.17
MnO	-	-	4.77	1.06
ειδ, βάρος (kg/m ³)	3.15	3.1	3.35	3.32

Οι αναλογίες καθώς και οι ιδιότητες των νωπών μειγμάτων παρουσιάζονται για όλα τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν στους Πίνακες 2 και 3.

Πίνακας 2. Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των σκυροδεμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

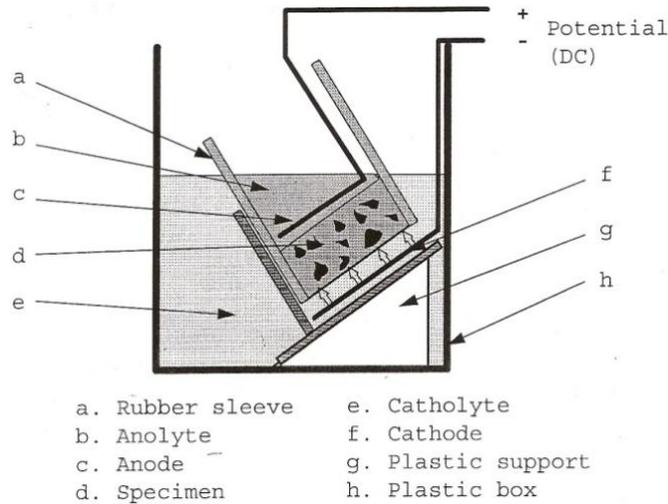
Μελέτη Σύνθεσης	C 25/30	C 25/30 50% Γ	C 25/30 100% Γ	C 25/30 50% Γ 30%ΣΗΚ	C 25/30 50% Γ 30%ΣΗΚ 30%ΣΚ
kg/m ³	M1	M2-50	M3-100	M4	M5
Τσιμέντο II 32,5	300	300	300	300	300
Τσιμέντο II 42,5	50	50	50	50	50
Γαρμπίλι	270	135	0	135	135
Γαρμπίλι ΣΗΚ	0	163	326	163	163
Σκύρα	630	630	630	630	630
Ασβεστολιθική άμμος	900	900	900	630	360
Σκωρία Κάδου	0	0	0	0,0	323,6
Άμμος ΣΗΚ	0	0	0	323,6	323,6
Νερό	180	180	180	180	180
Υπερ/της	1,42	1,08	1,42	1,67	2,17
N/T	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Κάθιση (mm)	20	18	19	19	19
Αέρας (%)	2,5	2,4	2,3	2,3	2,4

Πίνακας 3. Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των σκυροδεμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

Μελέτη Σύνθεσης	C 30/37	C 30/37 50% Γ	C 30/37 100% Γ	C 30/37 50% Γ 30%ΣΗΚ	C 30/37 50% Γ 30%ΣΗΚ 30%ΣΚ
kg/m ³	M6	M7-50	M8-100	M9	M10
Τσιμέντο Π 32,5	150	150	150	150	150
Τσιμέντο Π 42,5	200	200	200	200	200
Γαρμπίλι	270	135	0	135	135
Γαρμπίλι ΣΗΚ	0	163	326	163	163
Σκύρα	630	630	630	630	630
Ασβεστολιθική άμμος	900	900	900	630	360
Σκωρία Κάδου	0	0	0	0,0	323,6
Άμμος ΣΗΚ	0	0	0	323,6	323,6
Νερό	180	180	180	180	180
Υπερ/της	1,67	0,92	1,17	1,67	2,17
N/T	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Κάθιση (mm)	19	17	18	18	19,5
Αέρας (%)	2,2	2,0	2,1	2,0	2,0

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν κύβοι ακμής 150 και 100 χιλιοστών και κύλινδροι 60x100mm και 100x200mm. Όλα τα δείγματα συντηρήθηκαν για 28 ημέρες σε θάλαμο συντήρησης (T=20°C, RH>98%). Οι κύβοι των 150 χιλιοστών χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής σε διαφορετικές ηλικίες. Η αντίσταση σε ενανθράκωση μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια 60x100mm. Αυτοί οι μικροί κύλινδροι αρχικά συντηρήθηκαν επί 3 ημέρες στο προαναφερόμενο θάλαμο συντήρησης. Από αυτή την ηλικία και μετά τοποθετήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (σχετική υγρασία=50-60% και θερμοκρασία=20±2°C). Στην ηλικία των 28 ημερών μεταφέρθηκαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (T=20°C, σχετική υγρασία=55% , CO₂=1%). Τα δοκίμια παρέμειναν σε αυτόν τον θάλαμο για 8 εβδομάδες. Μια δεύτερη σειρά των δοκιμών εκτέθηκε μετά την ηλικία των 3 ημερών σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος όπου παρέμειναν εκτεθειμένα για 24 μήνες.

Η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων των σκυροδεμάτων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 100mm και ύψος 50mm που σχηματίζονται από τους κύλινδρους 100x200 mm. Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν όπως παραπάνω μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Ακολούθως εκτιμήθηκε ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων De σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο NT Build 492 (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Συσκευή δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων De. (NT Build 492, 1999)

Οι κύβοι ακμής 100 mm χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο πιθανής διαστολής του όγκου των αδρανών σκωρίας, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D4792 και την αντίσταση σε εναλλαγή ψύξης-απόψυξης. Αφού κόπηκαν στη μέση, τοποθετήθηκαν σε διάλυμα 3% NaCl και υποβλήθηκαν σε 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης (-14 °C και +20 °C).

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28, 90, 180 και 365 ημερών. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στους Πίνακες 4 και 5.

Πίνακας 4. Αντοχή σε θλίψη των σκυροδεμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30 (MPa)

(Mpa)	M1	M2-50	M3-100	M4	M5
fc ₂	25,2	28,5	27,6	24,8	30,8
fc ₇	30,1	34,6	35,1	34,7	42,3
fc ₂₈	39,1	41,3	44,2	47,9	59,5
fc ₉₀	44,6	48,4	51,7	54,0	63,9
fc ₁₈₀	54,1	54,4	57,8	56,5	66,7
fc ₃₆₅	58,9	60,3	62,1	62,7	70,8

Πίνακας 5: Αντοχή σε θλίψη των σκυροδεμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37 (MPa).

(Mpa)	M6	M7-50	M8-100	M9	M10
fc ₂	28,7	32,1	29,4	32,0	37,5
fc ₇	30,2	38,9	39,7	40,1	45,2
fc ₂₈	46,4	46,1	48,2	52,2	61,3
fc ₉₀	50,3	50,1	54,7	58,9	66,4
fc ₁₈₀	57,9	56,7	60,2	60,3	68,4
fc ₃₆₅	60,3	61,1	64,3	65,2	73,1

Από τις τιμές των παραπάνω πινάκων φαίνεται ότι η χρήση της ΣΗΚ ως λεπτόκοκκο και χοντρόκοκκο αδρανές προκαλεί αύξηση της αντοχής σε θλίψη σε όλες τις ηλικίες που εξετάστηκαν. Η κατάσταση αυτή φαίνεται να ενισχύεται όταν προστίθεται άμμος ΣΚ στα

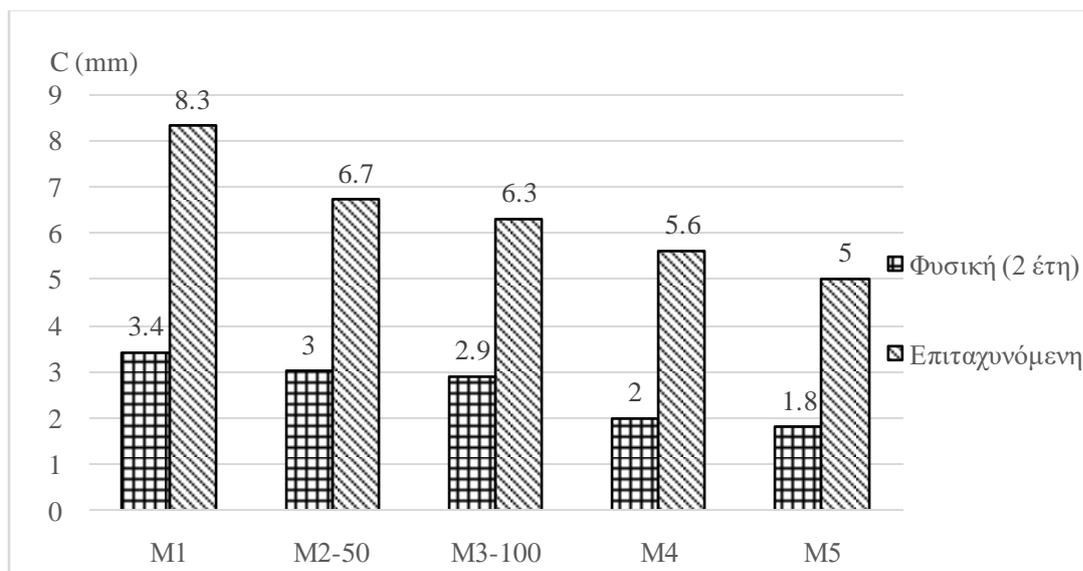
μείγματα. Έτσι, στην ηλικία των 28 ημερών όλα τα μείγματα στα οποία η ΣΗΚ χρησιμοποιήθηκε ως μερική ή ολική αντικατάσταση του ασβεστολιθικού γαρμπιλιού έχουν παρόμοια ή μεγαλύτερη αντοχή από το σκυρόδεμα αναφοράς έως και 22% (M4). Πρακτικά, φαίνεται ότι και στις δύο κατηγορίες αντοχής η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται σε μείγματα όπου η ασβεστολιθική άμμος αντικαταστάθηκε από τις άμμους ΣΗΚ και ΣΚ και το γαρμπίλι από γαρμπίλι ΣΗΚ ταυτόχρονα. Η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται έως 32% (M10) και 52% (M5) και είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή του μείγματος αναφοράς της παραπάνω κατηγορίας αντοχής (η θλιπτική αντοχή του μείγματος C35/45 στις 28 ημέρες είναι 53,3 MPa). Η αυξημένη αντοχή σε θλίψη σε σχέση με το μείγμα αναφοράς συνεχίζεται στις μεταγενέστερες ηλικίες για όλα τα μείγματα κατηγορίας αντοχής C25/30 και C30/37.

3.2 Βάθος Ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε με ψεκάσμο των φρεσκοθραυσμένων επιφανειών των δοκιμίων, με δείκτη φαινολοφθαλεΐνης, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο EN 14630 (EN14630, 2006). Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στους Πίνακες 6 και 7 και παρίσταται γραφικώς στα Σχήματα 2 και 3.

Πίνακας 6. Βάθος ενανθράκωσης (σε mm) των σκυροδεμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

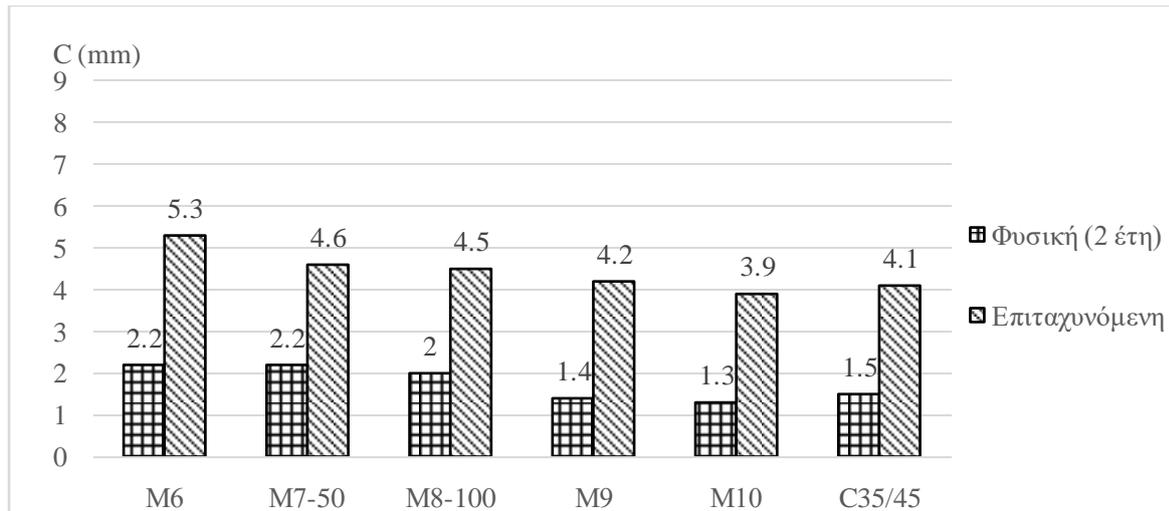
Ενανθράκωση (mm)	M1	M2-50	M3-100	M4	M5
Φυσική (2 έτη)	3,4	3	2,9	2	1,8
Επιταχυνόμενη	8,3	6,7	6,3	5,6	5



Σχήμα 2. Βάθος ενανθράκωσης (σε mm) των σκυροδεμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

Πίνακας 7. Βάθος ενανθράκωσης (σε mm) των σκυροδεμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

Ενανθράκωση (mm)	M6	M7-50	M8-100	M9	M10	C35/45
Φυσική (2 έτη)	2,2	2,2	2	1,4	1,3	1,5
Επιταχυνόμενη	5,3	4,6	4,5	4,2	3,9	4,1



Σχήμα 3. Βάθος ενανθράκωσης (σε mm) των σκυροδεμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

Αυτά τα διαγράμματα δείχνουν τη θετική επίδραση της αντικατάστασης των συμβατικών αδρανών με αδρανή ΣΗΚ και ΣΚ, δεδομένου ότι τα βάθη ενανθράκωσης των δοκιμίων που εκτέθηκαν, μειώθηκαν τόσο στη φυσική όσο και στην επιταχυνόμενη μέθοδο. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων μειώθηκε έως και 40%. (M5). Και στις δύο κατηγορίες αντοχής παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη μείωση στα σκυροδέματα στα οποία προστέθηκε άμμος ΣΚ, ενώ και πάλι οι τιμές ήταν χαμηλότερες από το μείγμα αναφοράς της παραπάνω κατηγορίας αντοχής.

3.3 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων

Οι τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων D_{cl} που μετρήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στους Πίνακες 8 και 9.

Πίνακας 8. Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_{cl} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

	M1	M2-50	M3-100	M4	M5
D_{cl} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	14,3	5,5	6,1	8,3	7,1

Πίνακας 9. Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_{cl} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

	M6	M7-50	M8-100	M9	M10	C35/45
D_{cl} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	12,5	4,6	4,8	6,9	5,4	8,2

Σε αυτό το πείραμα παρατηρούνται τα πιο εντυπωσιακά αποτελέσματα. Όλα τα μείγματα σκυριάς είχαν μεγάλη μείωση του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων, ο οποίος έχει πολύ χαμηλότερη τιμή από αυτόν στα μείγματα αναφοράς των κατηγοριών υψηλότερης αντοχής. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι η μερική αντικατάσταση του γαρμπιλιού από γαρμπίλι ΣΗΚ, μειώνει σημαντικά τη διείσδυση των χλωριδίων, καθώς τα μείγματα M2-50 και M7-50 ήταν τα πιο ανθεκτικά. Η μείωση ξεκινάει από 42% (M4) και φθάνει στο 63% (M7-50).

3.4 Ψύξη-Απόψυξη

Αυτή η μέθοδος αποτελεί παραλλαγή του προτύπου EN 12390-9 2006 όπως περιεγράφηκε στο πειραματικό πρόγραμμα. Η κύρια διαφορά είναι ότι οι κύκλοι ψύξης-απόψυξης δεν ήταν

24ωροι αλλά 48ωροι. Το ποσοστό απώλειας μάζας των δοκιμίων μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης για όλα τα σκυροδέματα παρουσιάζεται στους Πίνακες 10 και 11.

Πίνακας 10. Ποσοστιαία απώλεια βάρους των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30

	M1	M2-50	M3-100	M4	M5
% Απώλεια βάρους	27,2	20,0	20,5	10,3	9,1

Πίνακας 11. Ποσοστιαία απώλεια βάρους των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37

	M6	M7-50	M8-100	M9	M10
% Απώλεια βάρους	18,0	16,3	12,2	6,6	5,1

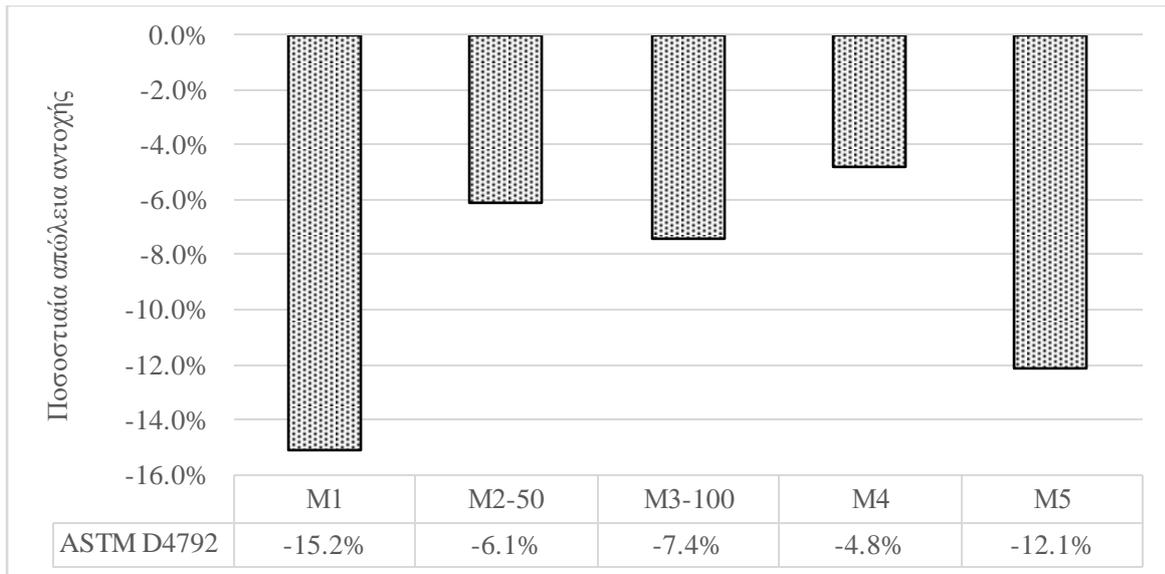


Σχήμα 4: Σύγκριση δοκιμίων M1 (αριστερά) και M5 (δεξιά) μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης

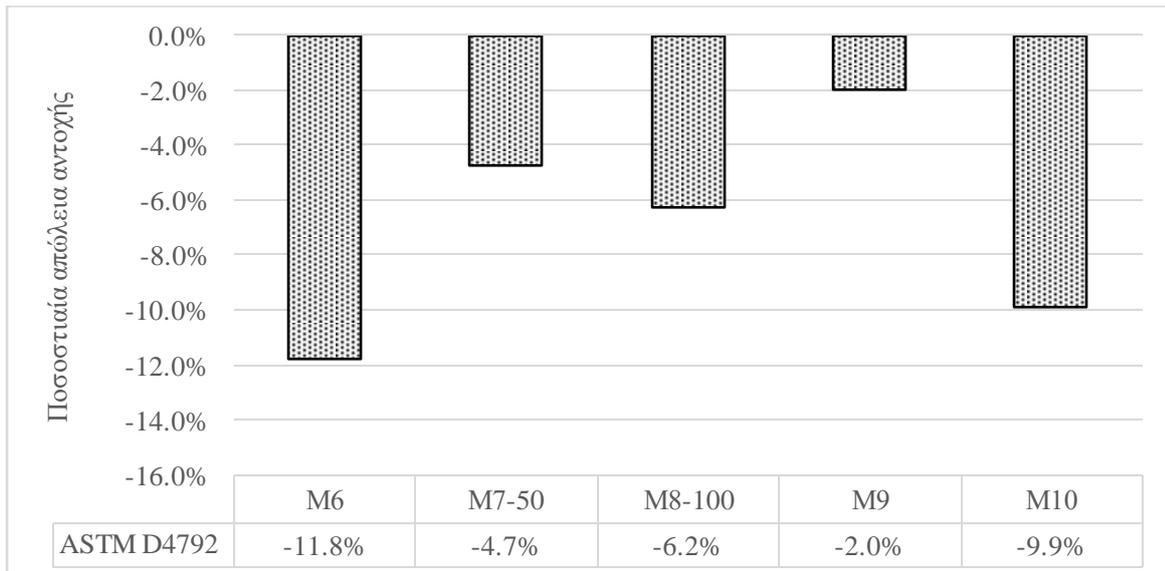
Η απώλεια μάζας των δοκιμίων που παρήχθησαν με ΣΗΚ και ΣΚ μειώθηκε και στις δύο κατηγορίες αντοχής για όλες τις τιμές αντικατάστασης των συμβατικών αδρανών. Τα λεπτόκκοκα αδρανή σκωρίας φαίνεται να συμβάλλουν περισσότερο στην παραγωγή πιο ανθεκτικών, σε αυτή τη δοκιμή, σκυροδεμάτων. Για παράδειγμα, τα μείγματα M4, M5, M9 και M10 έχουν μείωση στην απώλεια μάζας, σε σχέση με τα μείγματα αναφοράς, που ξεκινάει από 62% και φτάνει το 72%.

3.5 Αύξηση του όγκου των μειγμάτων με σκωρία – αντοχές γήρανσης

Ως αντοχή γήρανσης δοκιμίων, νοείται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής τους που υφίσταται υπό την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η δοκιμή επιταχυνόμενης γήρανσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D- 4792. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5 και 6.



Σχήμα 5. Ποσοστιαία απώλεια αντοχής μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30 μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης



Σχήμα 6. Ποσοστιαία απώλεια αντοχής μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37 μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης

Τα σκυροδέματα με αδρανή ΣΗΚ φαίνεται να επηρεάζονται ελάχιστα από τη διαδικασία αυτή. Η απώλεια αντοχής τους δεν υπερβαίνει το 7,5%. Από την άλλη, η προσθήκη της άμμου ΣΚ δρα ελαφρώς δυσμενώς ως προς τη θλιπτική αντοχή. Όμως, όλα τα μείγματα με τα συγκεκριμένα αδρανή σκωρίας συμπεριφέρθηκαν καλύτερα από τα μείγματα αναφοράς στα οποία η μείωση της αντοχής είναι μεγαλύτερη από 10%.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντικατάσταση του ασβεστολιθικούγαρμπιλιού και της άμμου με αδρανή ΣΗΚ και ΣΚ, είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή σκυροδέματος με σημαντική αύξηση της αντοχής σε όλες τις ηλικίες.

Τα μείγματα με αδρανή σκωρίας παρουσίασαν ενισχυμένη συμπεριφορά απ' ότι τα μείγματα αναφοράς, όσον αφορά τους δείκτες αντοχής και ανθεκτικότητας που ελέγχθηκαν σε αυτή

την έρευνα. Η αντίσταση έναντι της εναθράκωσης, η ανθεκτικότητα στη διείσδυση σε χλωριούχα άλατα και η αντίσταση στην ψύξη-απόψυξη βρέθηκαν να βελτιώνονται σημαντικά σε όλα τα μείγματα με ανακυκλωμένα αδρανή και στις δύο κατηγορίες αντοχής που μελετήθηκαν.

Το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης του ασβεστολιθικού γαρμπιλιού από γαρμπίλι ΣΗΚ φαίνεται να είναι 50% κατ' όγκο με ταυτόχρονη αντικατάσταση της ασβεστολιθικής άμμου με άμμο ΣΗΚ και άμμο ΣΚ σε χαμηλότερα ποσοστά (30% η κάθε μία). Τα παραγόμενα μείγματα παρουσίασαν αυξημένη αντοχή σε θλίψη και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας έως και 70% σε σύγκριση με τα μείγματα αναφοράς της ίδιας κατηγορίας αντοχής.

Συνεπώς, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα αδρανή σκωρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών με ασβεστόλιθο σε επίπεδα αντικατάστασης από 30% έως και 50% κατ'όγκο, συμβάλλοντας παράλληλα στην αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας των παραγόμενων σκυροδεμάτων.

Περαιτέρω έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για να διερευνηθούν και να εκτιμηθούν με ακρίβεια τα οφέλη - περιβαλλοντικά και οικονομικά - από τη χρήση αδρανών σκωρίας ως αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Pellegrino C., Cavagnis P., Faleschini F., Brunelli K. (2013). Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate, *Cement & Concrete Composites*, Vol 37, pp. 232-240.
- Papayianni I., Anastasiou E. (2003). Concrete incorporating high volumes of industrial by-products, Role of Concrete in Sustainable Development, *Proceedings of the International Conference on Celebrating Concrete, People and Practice*, (R.K. Dhir, M.D. Newlands, K.A. Paine Eds.), Dundee, Scotland, pp. 595-604.
- Polaco J., Manso J.M., Setién J., González J.J. (2011). Strength and Durability of Concrete Made with Electric Steelmaking Slag, *ACI Materials Journal*, Vol. 108, pp. 196-203.
- Pellegrino C., Gaddo V. (2009). Mechanical and Durability Characteristics of Concrete Containing EAF Slag as Aggregate, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, pp. 663-671.
- Manso J.M., González J.J., Polanco J.A. (2004). Electric Arc Furnace in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.16, pp. 639-645.
- Maslehuddin M., Sharif A.M., Shameem M., Ibrahim M., Barry M.S. (2003). Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes, *Construction and Building Materials*, Vol.17, pp.105-112.
- Arribas I., Vegas I., San-Jose J.T., Manso J.M. (2014). Durability studies on steelmaking concretes, *Materials and Design*, Vol. 63, pp.168-176.
- Anastasiou E. (2009). Utilization of steel slags and lignite fly ashes in the production of concrete for special applications, *PhD thesis*, Department of Civil Engineering, AUTH.
- Papachristoforou M. (2013). Development of concrete with EAF steel slag aggregates for shielding against radiation and high temperatures exposure, *PhD thesis*, Department of Civil Engineering, AUTH.
- Papayianni I., Anastasiou E. (2011). Concrete incorporating high calcium fly ash and EAF slag aggregates, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 63, pp. 597-604.

- Manso, J.M., Polanco, J.A., Losanez, M. & Gonzalez, J.J. (2006). Durability of concrete made with EAF slag as aggregate, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 528–534.
 - EN 14630 Comité Européenne de Normalisation (2006). Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.
 - NT Built 492 (1999). Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady Migration Experiments, NTBuild.
 - EN 12390-9 (2006). Testing hardened concrete. Freeze-thaw resistance, Scaling, BSI, pp. 28.
 - EN 206-1 (2000). Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, CEN/TC 104
- ASTM D4792M-13 (2013). Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions, *ASTM International*

Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα με τη χρήση σκωρίας κάδου

Ν. Χατζάκης¹, Ε. Αναστασίου²

¹ Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, MSc

² Επίκουρος καθηγητής, Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, Σκωρία Κάδου, Ιπτάμενη τέφρα, Πρόσμικτα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η προστασία και η διατήρηση των φυσικών πόρων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγων σε κάθε έργο Πολιτικού Μηχανικού. Σε αυτό το πλαίσιο, η σκωρία, ένα παραπροϊόν της παραγωγής χάλυβα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σκυρόδεμα, αντικαθιστώντας κάποια ποσότητα του τσιμέντου, αποτελώντας μια πολύ καλή επιλογή τόσο για οικολογικούς όσο και για οικονομικούς λόγους, μιας και το κόστος της σκωρίας είναι εξαιρετικά μικρό. Στη παρούσα εργασία θα εξεταστεί η σύγκριση του συμβατικού εκτοξευόμενου σκυροδέματος, με κάποια μίγματα στα οποία έχουν τοποθετηθεί πρόσθετα υλικά όπως η σκωρία και η ιπτάμενη τέφρα, σε μια προσπάθεια να βελτιωθούν κάποια χαρακτηριστικά της συμβατικής σύνθεσης. Συνολικά έγιναν πέντε συνθέσεις στις οποίες μεταβαλλόταν τα προστιθέμενα ποσοστά τσιμέντου, σκωρίας και ιπτάμενης τέφρας. Τέλος, στην τελευταία σύνθεση αντικαταστάθηκε μέρος των αδρανών με filler από EPS, προσπαθώντας να μειώσουμε το βάρος του υλικού κι έτσι την απώλεια υλικού από την αναπήδηση (rebound). Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά για την αξιοποίηση της σκωρίας κάδου σε παρόμοιες εφαρμογές.

Shotcrete with ladle furnace slag

N. Chatzakis¹, E. Anastasiou²

¹ Civil Engineer AUTH, MSc

² Assistant Professor, Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: Shotcrete, Ladle Furnace Slag, fly ash, admixtures

ABSTRACT: The protection and preservation of natural resources is a significant aspect in every Civil Engineering project. Within this context, ladle furnace slag, a material emanating from steel production, can be used as an admixture in concrete and provide environmental and financial benefits. The present report presents a comparison of conventional shotcrete compared to shotcrete with ladle furnace slag and other mineral admixtures such as fly ash. Five different concrete mixtures were prepared by altering cement and admixtures contents, aiming at improving some of the characteristics of conventional shotcrete. In one final mixture, natural aggregate was partially replaced with EPS filler, to reduce the density of shotcrete produced and therefore to decrease the loss of the material during the process of shotcreting (rebound). The results seem encouraging for the use of ladle furnace slag in similar applications.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (sprayed concrete ή shotcrete ή guniting) ,είναι σκυρόδεμα λεπτής διαβάθμισης αδρανών που τοποθετείται με εκτόξευση. Η εφαρμογή του απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και κατάλληλο εκπαιδευμένο προσωπικό. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Ε.Σ.) συντίθεται από τσιμέντο, λεπτόκοκκα (ή και χονδρότερα) αδρανή και νερό. Επίσης, μπορεί να περιλαμβάνει ειδικά πρόσμικτα ή πρόσθετα υλικά. Τη σημερινή εποχή, η χρήση του Ε.Σ. σε εργασίες επεμβάσεων είναι κυρίαρχη, ανεξαρτήτως το είδος του φέροντος οργανισμού της κατασκευής. Η ευρύτατη χρήση του Ε.Σ. στις ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και τοιχοποιία οφείλεται στα παρακάτω χαρακτηριστικά του:

1. Το Ε.Σ. έχει υψηλή θλιπτική αντοχή
2. Η μεγάλη ταχύτητα εκτόξευσης παρέχει πολύ καλή πρόσφυση με το υλικό βάσης
3. Το Ε.Σ. αυτοστηρίζεται, δηλαδή δεν απαιτείται η χρήση ξυλότυπου κατά την εφαρμογή.
4. Η εγκατάσταση είναι κινητή και σε συνδυασμό με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται επιτρέπει την σκυροδέτηση ακόμα και σε πολύ δυσπρόσιτες θέσεις.

Άλλες εφαρμογές του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορούν να συναντηθούν και σε νέες κατασκευές όπως οροφές, λεπτά κελύφη, δεξαμενές, πισίνες και τούνελ. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γεωτεχνικά έργα και συγκεκριμένα για σταθεροποιήσεις πρανών (ΠΕΤΕΠ 12-03-02-00).

Η σκωρία κάδου είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα που προκύπτει κατά το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας του ακατέργαστου υλικού και παρουσιάζει τσιμεντοειδείς ιδιότητες, κυρίως λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε CaO. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των βιομηχανικών παραπροϊόντων και ειδικότερα των σκωριών χαλυβουργίας είναι ότι οι φυσικοχημικές ιδιότητές τους διαφέρουν πάρα πολύ ανάλογα με τις πρώτες ύλες, τη διαδικασία παραγωγής και την τελική επεξεργασία. Έτσι τελικά, μπορούν να προκύψουν είτε προϊόντα χαμηλού κόστους για εφαρμογές χαμηλών απαιτήσεων, είτε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας που προσδίδουν βελτιωμένες ιδιότητες στο τελικό προϊόν (Παπαγιάννη & Αναστασίου, 2005).

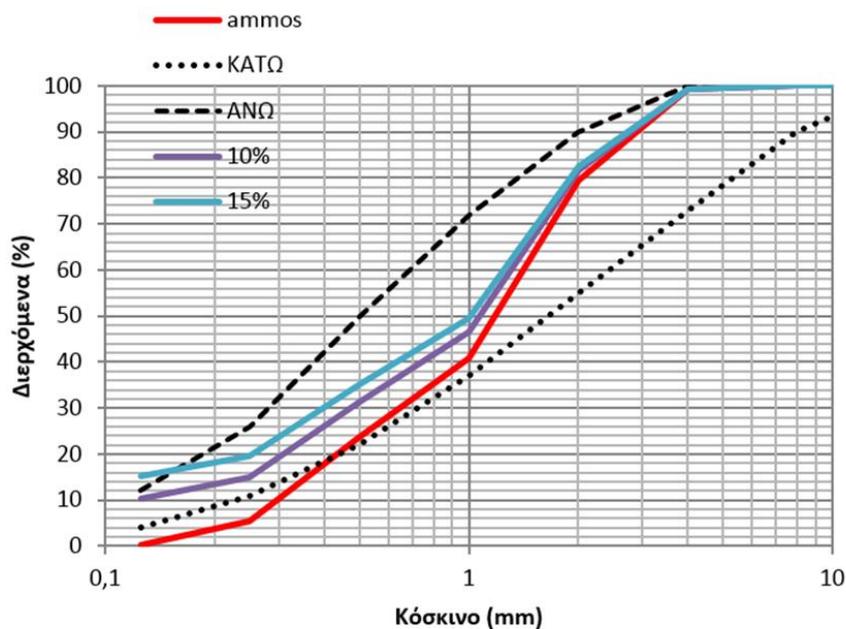
2 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο έρευνας για τη δυνατότητα παραγωγής εκτοξευόμενου σκυροδέματος με εναλλακτικά υλικά πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών Α.Π.Θ. σειρά δοκιμαστικών συνθέσεων, οι οποίες περιλάμβαναν τη χρήση σκωρίας κάδου ως λεπτόκοκκο υλικό πλήρωσης (filler). Πέρα από τη σκωρία κάδου, στις συνθέσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland τύπου CEM Ι42.5 Ν και CEM ΙΙ32.5 Ν, ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα από το εργοστάσιο του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου και filler διογκωμένης πολυστερίνης (EPS). Η σκωρία κάδου χρησιμοποιήθηκε μετά από κοσκίνιση κάτω από 90 μm. Τα χαρακτηριστικά των εργαστηριακών συνθέσεων σκυροδέματος φαίνονται στον Πίνακα 1. Οι συνθέσεις 1 και 3 είναι συνθέσεις αναφοράς, όπου η σύνθεση 3 με τσιμέντο τύπου CEM ΙΙ32.5 Ν μοιάζει περισσότερο σαν μέτρο σύγκρισης με τις δοκιμαστικές συνθέσεις. Στη σύνθεση 2 επιλέχθηκε αντικατάσταση τσιμέντου με σκωρία κάδου σε ποσοστό 20% κ.β., ενώ στη σύνθεση 4 αντικαταστάθηκε επιπλέον ένα 10% κ.β. με ιπτάμενη τέφρα.

Πίνακας 1. Αναλογίες συνθέσεων σκυροδέματος σε kg/m³

Υλικά	1	2	3	4	5
Τσιμέντο CEM I42.5	500	400	0	0	500
Τσιμέντο CEM II32.5	0	0	500	350	0
Σκωρία κάδου	0	100	0	100	165
Ιπτάμενη τάρρα	0	0	0	50	0
Νερό	250	250	250	250	250
Ασβεστολιθική παιπάλη < 125 μm	268	268	268	268	150
Ασβεστολιθικά αδρανή 0-4 mm	2412	2412	2412	2412	1350
EPS	0	0	0	0	100
Ρευστοποιητής	2,5	2,5	2,5	3,75	2,5

Για τα αδρανή χρησιμοποιήθηκε η κοκκομετρική καμπύλη που φαίνεται στο Διάγραμμα 1, σύμφωνα με τα πρότυπα του ΕFNARC, όπου οι καμπύλες που φαίνονται εντός ορίων προήλθαν από αντικατάσταση μέρους της άμμου με ασβεστολιθικό filler.



Διάγραμμα 1 Δοκιμαστικές κοκκομετρικές καμπύλες (επιλέχθηκε τελικά η προσθήκη παιπάλης 10%)

Σε όλες τις συνθέσεις επιλέχθηκε εξάπλωση διαμέτρου > 500 mm, προκειμένου να μπορεί να εκτοξευθεί με την υγρή μέθοδο. Εκτός από την εργασιμότητα, τα δοκιμαστικά μίγματα ελέγχθηκαν σε νωπή κατάσταση ως προς την περιεκτικότητα σε αέρα, το φαινόμενο ειδικό βάρος και το ιξώδες (μέτρηση με ιξωδόμετρο ICAR Rheometer). Στη συνέχεια τα δοκιμαστικά σκυροδέματα τοποθετήθηκαν σε πρισματικές (100 x 400 x 400 mm), κυβικές (150 mm) και κυλινδρικές (150 x 300 mm) μήτρες, ξεκαλουπώθηκαν και συντηρήθηκαν σε συνθήκες υγρασίας και σταθερής θερμοκρασίας (20°C) μέχρι την ημέρα ελέγχου. Οι έλεγχοι στο σκληρυμένο σκυρόδεμα αφορούσαν τη θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών, την καμπτική αντοχή 28 ημερών, τη σονομέτρηση (μέτρηση ταχύτητας υπερήχων), το μέτρο ελαστικότητας 28 ημερών, το πορώδες 28 ημερών, καθώς και την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων (Rapid Chloride Penetration Test) κατά ASTM C1202. Επιπρόσθετα, μετρήθηκαν η ταχύτητα απορρόφησης κατά ASTM C1585 και η συστολή ξήρανσης σε συνθήκες 20°C και RH < 50%.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΩΝ

Τα αποτελέσματα των ελέγχων στο νωπό σκυρόδεμα φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 2. Από αυτά φαίνεται ότι η περιεκτικότητα σε αέρα του νωπού μίγματος δε μεταβάλλεται σημαντικά με τη χρήση των εναλλακτικών υλικών, ενώ η εργασιμότητα βελτιώνεται ελαφρώς. Αυτό που φαίνεται να μεταβάλλεται είναι το ιξώδες, το οποίο αυξάνεται σημαντικά με τη χρήση της σκωρίας κάδου. Το μεγαλύτερο ιξώδες μπορεί να είναι ωφέλιμο στην εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, εφόσον μειώνει την απορροή του νωπού υλικού. Σχετικά με την πυκνότητα, η χρήση σκωρίας κάδου και ιπτάμενης τέφρας μειώνει κάπως το βάρος, κυρίως λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας των υλικών αυτών σε σχέση με το τσιμέντο. Μεγαλύτερη μείωση της πυκνότητας, βέβαια, εμφανίζεται με τη χρήση του EPS, κάτι που ήταν κομμάτι και του σχεδιασμού του συγκεκριμένου μίγματος.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα ελέγχων νωπού σκυροδέματος

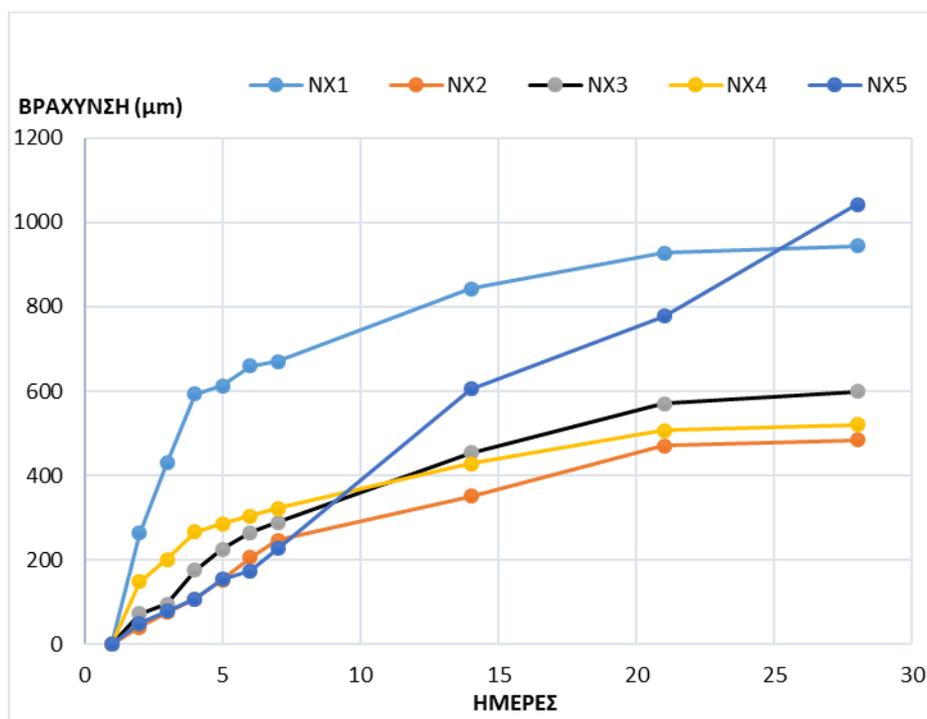
ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	1	2	3	4	5
Λόγος νερού προς κονία	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Υπερρευστοποιητής (%) κ.β. της κονίας	0,50	0,50	0,50	0,75	0,50
Περιεκτικότητα αέρα (%)	4,0	3,8	3,7	3,9	4,2
Εργασιμότητα (Εξάπλωση σε mm)	570	610	620	600	590
Χρόνος Εξάπλωσης για 50cm (s)	5-6	6	4-5	3-4	3-4
Φαινόμενο ειδικό βάρος (kg/m ³)	2327	2234	2264	2240	2066
Ιξώδες (Pa.s)	32,9	89,8	-	72,2	-

Στον Πίνακα 3 φαίνονται κάποια από τα αποτελέσματα των ελέγχων στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Όσον αφορά την ανάπτυξη αντοχής, η χρήση 20% σκωρίας κάδου σε αντικατάσταση τσιμέντου εμφανίζει μειωμένες τιμές της τάξης του 20%, τόσο στις 7 όσο και στις 28 ημέρες. Η σύνθεση 4, με συνδυασμένη χρήση σκωρίας κάδου 20% και ιπτάμενης τέφρας 10%, εμφανίζει 12,5% χαμηλότερη θλιπτική αντοχή 28 ημερών συγκριτικά με τη σύνθεση αναφοράς 3, με τσιμέντο τύπου Π32.5. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ενθαρρυντικό εφόσον εξοικονομείται μεγάλη ποσότητα τσιμέντου (30%). Η σύνθεση 4 είναι και η μόνη που δείχνει συγκρίσιμη τιμή αντίστασης στη διείδυση χλωριόντων με αυτή της σύνθεσης αναφοράς, ενώ στις άλλες συνθέσεις η πιθανότητα διάβρωσης εμφανίζεται αυξημένη. Αντίθετα, η χρήση αδρανών EPS δίνει αντοχές κάτω από το 50% της σύνθεσης αναφοράς και θα μπορούσε να αφορά μόνο εφαρμογές όπου κύρια απαίτηση είναι το χαμηλό βάρος και όχι η αντοχή.

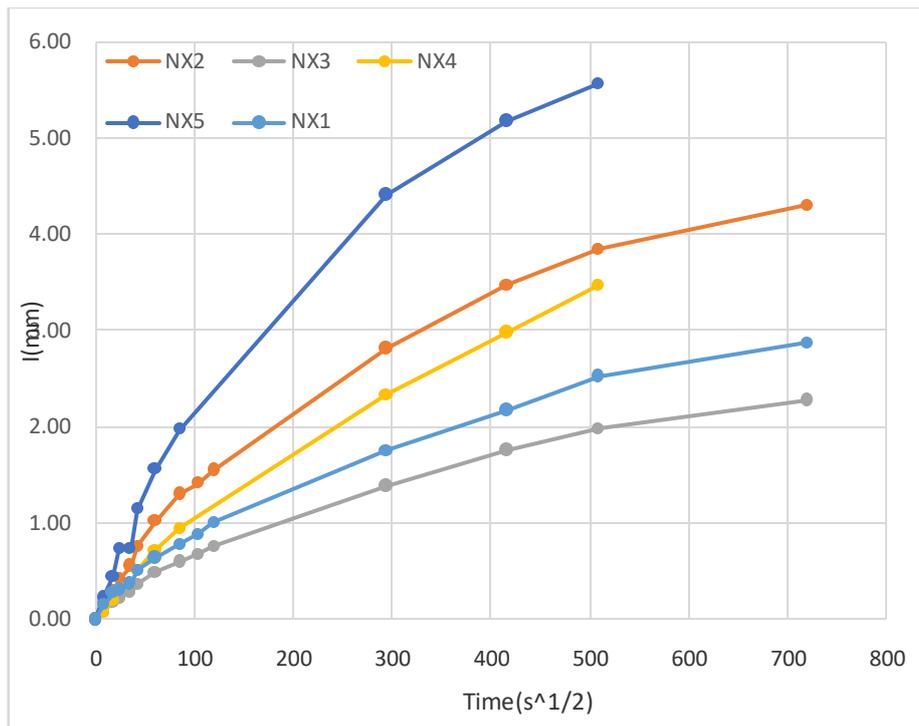
Πίνακας 3. Αποτελέσματα ελέγχων σκληρυμένου σκυροδέματος

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	1	2	3	4	5
Θλιπτική αντοχή κυβου 7 ημερών (MPa)	28,9	20,7	22,1	14,2	15,3
Θλιπτική αντοχή κύβου 28 ημερών (MPa)	49,3	33,2	42,2	36,9	22,7
Αντοχή σε κάμψη 28 ημερών (MPa)	8,0	10,1	7,6	6,4	7,5
Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	4926	4298	4553	4491	4044
Στατικό μέτρο ελαστικότητας (Gpa)	29,5	19,0	25,2	32,3	21,8
Πορώδες	12,3%	18,1%	17,8%	19,4%	11,8%
Διείσδυση χλωριόντων (Coulomb)	3202	6022	5874	3503	8727

Στο Διάγραμμα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα από τη δοκιμή συστολή ξήρανσης. Πέρα από τη σύνθεση 5 με EPS, όλες οι δοκιμαστικές συνθέσεις εμφανίζουν μειωμένη πρόμιμη συστολή, μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Όσον αφορά την υδαταπορροφητικότητα κατά ASTM C1585, οι συνθέσεις εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, εκτός φυσικά από τη σύνθεση 5 που παρουσιάζει σημαντικά αυξημένη υδαταπορροφητικότητα.



Διάγραμμα 2. Συστολή Ξήρανσης δοκιμίων



Διάγραμμα 3. Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων σύμφωνα με ASTM C1585-13.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν 5 συνθέσεις με διαφορετικές αναλογίες τσιμέντου και προσθέτων (σκωρία και τέφρα) η καθεμία. Γενικά, η πτώση την θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων με τα πρόσθετα σε σχέση με τη σύνθεση 1 και 3, η οποίες ήταν οι συνθέσεις αναφοράς, θεωρείται λίγο πολύ αναμενόμενη μιας και μέρος της κονιάς αντικαθίσταται από εναλλακτικές κονίες. Γίνεται κατανοητό ότι σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται τα συγκεκριμένα παραπροϊόντα ως εναλλακτικές κονίες αναμένεται μια μείωση των αντοχών, τουλάχιστον μέχρι τις 28 ημέρες. Οι συνθέσεις με σκωρία κάδου και ιπτάμενη τέφρα, όμως, έδωσαν αρκετά καλές μηχανικές αντοχές και επιπρόσθετα είχαν ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς τη συστολή ξήρανσης και την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων. Δεδομένου και του μειωμένου κόστους των εναλλακτικών υλικών αλλά και της περιβαλλοντικής διάστασης από την αξιοποίηση παραπροϊόντων, η σκωρία κάδου με ή χωρίς ιπτάμενη τέφρα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης ως εναλλακτική κονία. Τέλος, η σύνθεση με αδρανή από EPS παρουσιάζει ενδιαφέρον μόνο για κατασκευές χαμηλών απαιτήσεων και πιθανώς σε θερμομονωτικές στρώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ACI 506R-90 “Guide to shotcrete”.
- [2] ACI 506.4R-94 “Guide for the evaluation of shotcrete”.
- [3] EFNARC “European specification for spraying concrete”.
- [4] Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου “Έλεγχος καταλληλότητας σκωρίας κάδου σαν συμπληρωματική κονία για την παραγωγή σκυροδέματος.”
- [5] Ε. Αναστασίου “Αξιοποίηση σκωριών χαλυβουργίας και ιπτάμενων λιγνιτικών τεφρών στην παραγωγή ειδικών σκυροδεμάτων”.
- [6] Σ. Δρίτσος “Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε έργα επεμβάσεων”.
- [7] P.Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro “Σκυρόδεμα: μικροδομή, ιδιότητες και υλικά”.
- [8] Wendehorst “Δομικά Υλικά”.

[9] ΠΕΤΕΠ 14-01-41-00 “ Έκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε έργα επεμβάσεων”

[10] ΠΕΤΕΠ 12-03-02-00 “Έκτοξευόμενο σκυρόδεμα”

[11] Στέφανος Η. Δρίτσος “ Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα“

[12] Α. Τριανταφύλλου “ Δομικά Υλικά “.

[13] Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου, Ε. Σιαφάκα “Χρήση σκωρίας κάδου στο ΑΣΣ και εφαρμογή στο υβριδικό ενεργειακό έργο της Ικαρίας”

Εφαρμογή της μεθόδου SWeRF για την εκτίμηση του εισπνεύσιμου κλάσματος δομικών κονιών

Μ. Παπαχριστοφόρου, Μ. Στεφανίδου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: SWeRF, εισπνεύσιμο κλάσμα, κρυσταλλικό πυρίτιο, δομικά υλικά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος SWeRF για την εκτίμηση του εισπνεόμενου λεπτόκοκκου κλάσματος στερεών, σε σειρά δομικών κονιών. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχθηκαν τσιμέντο ΙΙ52,5, 42,5 και 32,5, ασβεστολιθικό φύλλερ, πυριτική παιπάλη, αλεσμένη ποζολάνη, σκωρία κάδου, ιπτάμενη τέφρα και υδράσβεστος. Ο συγκεκριμένος έλεγχος αφορά στον προσδιορισμό δυνητικά εισπνεόμενου κλάσματος αιωρούμενων σωματιδίων όταν ο χρήστης έρχεται σε επαφή με τα υλικά αυτά και μπορεί να επεκταθεί στον υπολογισμό του ποσοστού εισπνεόμενου κρυσταλλικού πυριτίου (SWeRFCS) το οποίο μπορεί να προκαλέσει μια πνευμονική νόσο γνωστή ως πυριτίαση, ακολουθούμενη από σοβαρές περιπτώσεις όπως καρκίνο του πνεύμονα. Τα υλικά που ελέγχονται αφορούν τόσο παραδοσιακές και σύγχρονες κονίες όσο και βιομηχανικά παραπροϊόντα. Τα υλικά αυτά είναι σε μορφή χύδην και μπορεί να καταστούν αιωρούμενα τόσο κατά την παραγωγή τους, όσο και κατά την επεξεργασία, συσκευασία ή μεταφορά τους. Σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 10μm μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες στο αναπνευστικό ή να επιδεινώσουν τα συμπτώματα ευαίσθητων ομάδων του πληθυσμού. Η μέθοδος SWeRF αποτελεί μια αποδεκτή μεθοδολογία η οποία συνεκτιμά την κατανομή μεγέθους σωματιδίων (PSD) και την πυκνότητα των υλικών για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας ενός λεπτόκοκκου υλικού όσον αφορά στην πιθανότητα να φτάσει μέσω της εισπνοής στους πνεύμονες.

Applying the SWeRF method for estimating the relevant fine particle fraction in building binders that can be inhaled

M. Papachristoforou, M. Stefanidou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: SWeRF, inhaled fraction, crystalline silica, building materials

ABSTRACT: In the present work, the SWeRF method was applied to estimate the inhaled fine fraction of binders. More specifically, cement ΙΙ52.5, 42.5 and 32.5, limestone filler, silica pad, pozzolan, steel slag, fly ash lime were tested. With this method, the potentially inhaled fraction of airborne particles is identified when the user comes into contact with these materials and can be extended to calculate the percentage of inhaled crystalline silica (SWeRFCS) that can cause piritiasis and in some cases such lung cancer. The materials tested concern both traditional or modern binders as well as industrial by-products. These are bulk materials and become airborne during production, processing, packaging or transportation. Particles smaller than 10 μm in size can cause serious lung damages or worsen the symptoms of sensitive populations. SWeRF is an accepted method that takes into account particle size distribution (PSD) and the density of materials to calculate the risk of a fine material in terms of the likelihood of reaching the lungs.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως σωματιδιακή ύλη στην ατμόσφαιρα ορίζεται η στερεή ή υγρή ύλη που βρίσκεται σε διασπορά στον αέρα και αποτελείται από διακριτά σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο των μικρών μορίων δηλαδή διαμέτρου περίπου 0,0002 μm και μικρότερο από 500 μm . Οι πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων (particulate matter, PM) μπορεί να είναι είτε φυσικές όπως εκρήξεις ηφαιστειών, βιολογικές διεργασίες (σπόροι, γύρη, ιοί, βακτηρίδια), χόμα, σκόνη, άμμος που μεταφέρεται με τον άνεμο, είτε ανθρωπογενείς όπως βιομηχανικές, εξορυκτικές και κατασκευαστικές δραστηριότητες, συσκευές οικιακής θέρμανσης (καλοριφέρ, τζάκια), τροχοφόρα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης (καύση του καυσίμου και φθορά των ελαστικών), πυρκαγιές, αγροτικές δραστηριότητες κ.α. [1,2]. Εκτιμάται ότι κατά μέσο όρο και σε παγκόσμια κλίμακα, περίπου 90% των αεροσωματιδίων προέρχεται από φυσικές πηγές. Ωστόσο, σε βιομηχανικές και αστικές περιοχές, η αναλογία αυτή αντιστρέφεται και η συγκέντρωση των αεροσωματιδίων οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενείς πηγές [3].

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι ένας σημαντικός ρύπος του ατμοσφαιρικού αέρα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με ποικίλες επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου. Η ιδιότητα που έχουν να διεισδύουν μέσω της αναπνευστικής οδού στο τραχειοβρογχικό δέντρο, τα βρογχόλια και τις πνευμονικές κυψελίδες, δημιουργεί σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα και αυξημένους κινδύνους καρδιαγγειακών παθήσεων [4]. Όσο μικρότερα είναι τα σωματίδια, τόσο βαθύτερα εισχωρούν στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Γενικά, σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 10 μm δεν εισχωρούν στο κατώτερο αναπνευστικό σύστημα. Αντίθετα, τα μικρότερα από 10 μm σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες στο αναπνευστικό ή να επιδεινώσουν τα συμπτώματα ευαίσθητων ομάδων του πληθυσμού. Σωματίδια 7-11 μm εισχωρούν στη ρινική κοιλότητα, 4,7-7 μm εισχωρούν στο φάρυγγα, 3,3-4,7 μm εισχωρούν στην τραχεία και την αρχή των βρόγχων. Ομάδες υψηλού κινδύνου αποτελούν οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά και τα άτομα που πάσχουν από άσθμα και άλλες καρδιαγγειακές παθήσεις [3,5]. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να προκαλέσουν βλάβη κοντά στη θέση εναπόθεσης εάν είναι διαβρωτικά, ραδιενεργά, ή ικανά να προκαλέσουν κάποια άλλη ζημία. Τα αδιάλυτα σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν σε άλλα μέρη του αναπνευστικού συστήματος ή του σώματος, όπου μπορούν να απορροφηθούν ή να προκαλέσουν βιολογική επίδραση [6].

Το ποσοστό των συνολικών σωματιδίων που μπορεί να εισχωρήσει στο ανθρώπινο σώμα μέσω της εισπνοής εξαρτάται από τις ιδιότητες τους, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του αέρα κοντά στο σώμα, τον ρυθμό αναπνοής, και το αν η αναπνοή γίνεται μέσω της μύτης ή του στόματος. Όσον αφορά τις ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τους που καθιστά σημαντικό το ρόλο τους στις ατμοσφαιρικές διαδικασίες και την πιθανότητα εισπνοής. Σε αυτές τις ιδιότητες περιλαμβάνονται η μάζα, το μέγεθος, η χημική σύσταση καθώς και οι αεροδυναμικές και οπτικές ιδιότητές τους. Το πιο σημαντικό όμως από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι το μέγεθός τους, το οποίο εκφράζεται από την ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο και το οποίο σχετίζεται άμεσα με την πηγή από την οποία προέρχονται και τις επιδράσεις που προκαλούν στην ανθρώπινη υγεία [5]. Ως αεροδυναμική διάμετρος ενός σωματιδίου ορίζεται η διάμετρος σφαίρας μοναδιαίας πυκνότητας (1 g/cm³), η οποία έχει την ίδια τελική ταχύτητα πτώσης στον αέρα με το πραγματικό σωματίδιο, κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και σχετικής υγρασίας.

Η Ομάδα Εργασίας Μετρολογίας της Ένωσης Βιομηχανικών Ορυκτών Ευρωπαϊκής Ένωσης (IMA-Europe) [7], έχει αναπτύξει την αρχή του σχετικού μεγέθους λεπτού κλάσματος (size-weighted relevant fine fraction, SWeRF) για την εκτίμηση του δυνητικού αναπνεύσιμου κλάσματος στερεών υλικών χύδην για ταξινόμηση και απονομή σημάτων (labeling). Η αρχή πίσω από τη μεθοδολογία SWeRF είναι να συνδυαστεί το μέγεθος ενός σωματιδίου με την πιθανότητα του να εισάγετε στους αεραγωγούς των πνευμόνων όπως περιγράφεται στο

Πρότυπο EN 481. Η μέθοδος μετρά μόνο το κλάσμα της ουσίας (π.χ. λεπτή σκόνη ή λεπτό κρυσταλλικό πυρίτιο) που υπάρχει στο υλικό. Έχει δρομολογηθεί μια διαδικασία για την τυποποίηση της μεθόδου μέσω της CEN (Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης). Η μέθοδος δεν υπολογίζει από μόνη της τα επίπεδα επαγγελματικής έκθεσης σε επικίνδυνες ουσίες και δεν υποκαθιστά τις μετρήσεις του χώρου εργασίας.

Όταν εισπνέεται σκόνη, μικρότερα σωματίδια έχουν υψηλότερη πιθανότητα να φθάσουν στις πνευμονικές κυψελίδες από μεγαλύτερα σωματίδια. Η συνάρτηση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ του μεγέθους ενός σωματιδίου και αυτής της πιθανότητας καθορίζεται στο πρότυπο EN 481. Για παράδειγμα, σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο 1 και 10 μm έχουν, σύμφωνα με το EN 481, πιθανότητα να φτάσουν στις κυψελίδες των πνευμόνων 97,1% και 1,3%, αντίστοιχα. Για τον προσδιορισμό SWeRF συνδυάζεται το μέγεθος των σωματιδίων με τον προαναφερθέντα παράγοντα πιθανότητας και στη συνέχεια ο συνδυασμός αυτός εφαρμόζεται σε ολόκληρο το εύρος κατανομής μεγέθους κόκκων του υλικού. Η μέθοδος SWeRF μπορεί να προβλέψει πώς θα κινηθούν τα σωματίδια σε ένα στερεό κοκκώδες υλικό όταν γίνονται αερομεταφερόμενα και εισπνέονται. Υπάρχουν καταρχήν δύο τρόποι προσδιορισμού της τιμής SWeRF ενός υλικού. Ο πρώτος είναι να καθορίσουμε πρώτα την κατανομή μεγέθους σωματιδίων (particle size distribution, PSD) του υλικού και στη συνέχεια να υπολογιστεί η τιμή SWeRF από το PSD χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση πιθανότητας του EN 481. Ο άλλος τρόπος είναι η διασπορά του υλικού σε ένα υγρό στο οποίο η τιμή SWeRF διαχωρίζεται με διαχωρισμό των μεγαλύτερων κόκκων από τους μικρότερους με καθίζηση.

Η μεθοδολογία SWeRF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί το ποσοστό κρυσταλλικού πυριτίου (SWeRF_{CS}) που μπορεί να φτάσει στους πνεύμονες μέσω της εισπνοής. Απαραίτητο είναι να έχει μετρηθεί το ποσοστό του κρυσταλλικού πυριτίου (χωρίς το άμορφο) στο υλικό. Το κρυσταλλικό πυρίτιο αποτελεί βασικό συστατικό πολλών προϊόντων που χρησιμοποιούμε καθημερινά, καθώς και δομικών υλικών. Σε αυτά τα καθημερινά πλαίσια, το κρυσταλλικό πυρίτιο είναι απολύτως ασφαλές. Είναι αδρανές, που σημαίνει ότι δεν αντιδρά με οποιαδήποτε χημική ουσία και δεν είναι επιβλαβές για την υγεία. Οι περιπτώσεις όπου μπορεί να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία αφορούν εργαζόμενους σε βιομηχανικούς χώρους, οι οποίοι κόβουν, λειάνουν ή θρυμματίζουν υλικά που περιέχουν κρυσταλλικό πυρίτιο σε καθημερινή βάση. Αυτές οι δραστηριότητες δημιουργούν μια πολύ λεπτή σκόνη που ονομάζεται αναπνεύσιμο κρυσταλλικό πυρίτιο (Respirable crystalline silica RCS), το οποίο μπορεί να προκαλέσει μια πνευμονική νόσο γνωστή ως πυριτίαση, ακολουθούμενη από σοβαρές περιπτώσεις όπως καρκίνο του πνεύμονα.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η PSD διαφόρων χύδην λεπτόκοκκων δομικών πρώτων υλών για τον υπολογισμό της τιμής SWeRF κάθε υλικού και σύγκριση μεταξύ τους.

2.ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αξιοποιεί την κατανομή μεγέθους σωματιδίων PSD που μπορεί να προκύψει για τον υπολογισμό SWeRF. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η σφαιρική ισοδύναμη διάμετρος (D) που μετράται με τις τεχνικές διάθλασης λέιζερ (laser diffraction techniques), δεν ισούται με την αεροδυναμική διάμετρο (D_{Aero}) όπως αναφέρεται στο EN 481. Η σχέση μεταξύ των δυο διαμέτρων δίνεται από τη σχέση:

$$D_{Aero} = D \cdot \sqrt{\rho_p} \quad (1)$$

όπου ρ_p είναι η πυκνότητα του υλικού. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια στάθμιση μεγέθους, με βάση την συνάρτηση πιθανότητας που δίνεται στο EN 481:

(2)

$$SWeRF = \int_{D=0}^{D=\infty} P(D_{Aero}) \cdot R(D_{Aero}) \cdot dD_{Aero}$$

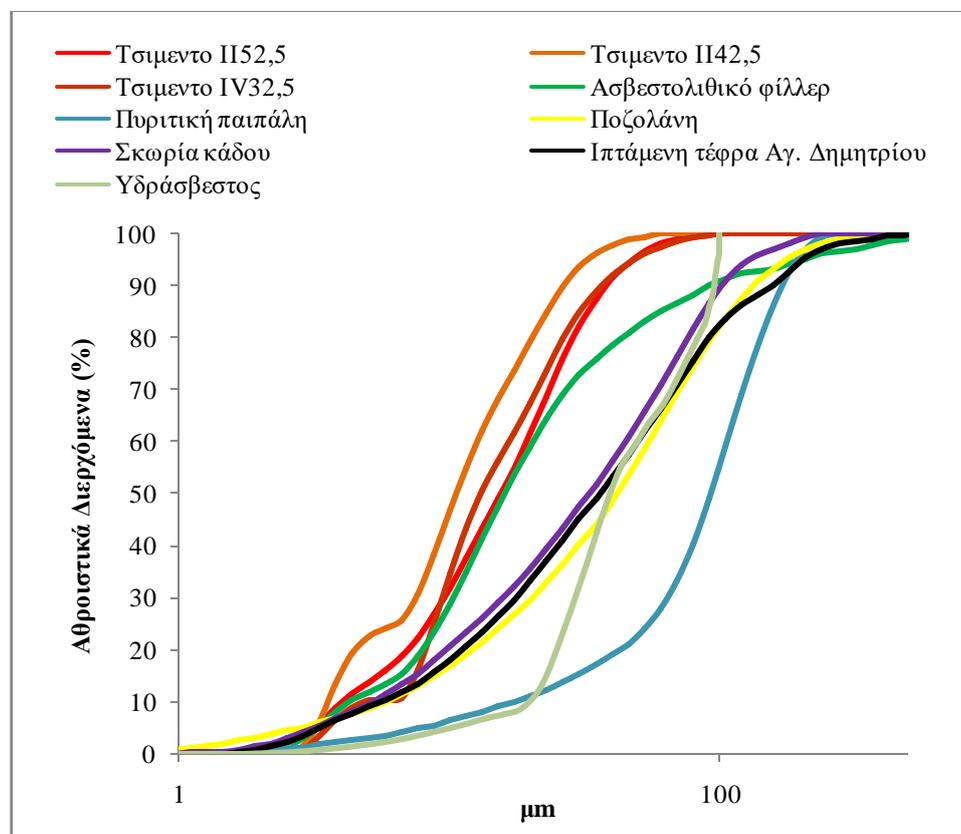
όπου $P(D_{Aero})$ είναι το κλάσμα μεγέθους σωματιδίων για αεροδυναμική διάμετρο D_{Aero} , και $R(D_{Aero})$ η πιθανότητα να φτάσουν στους πνεύμονες σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου D σύμφωνα με το πρότυπο EN 481.

Προκειμένου να διευκολυνθεί η χρήση SWeRF, ένας υπολογισμός του σε αρχείο Microsoft Excel είναι διαθέσιμος στο κοινό από την IMA-Europe [8].

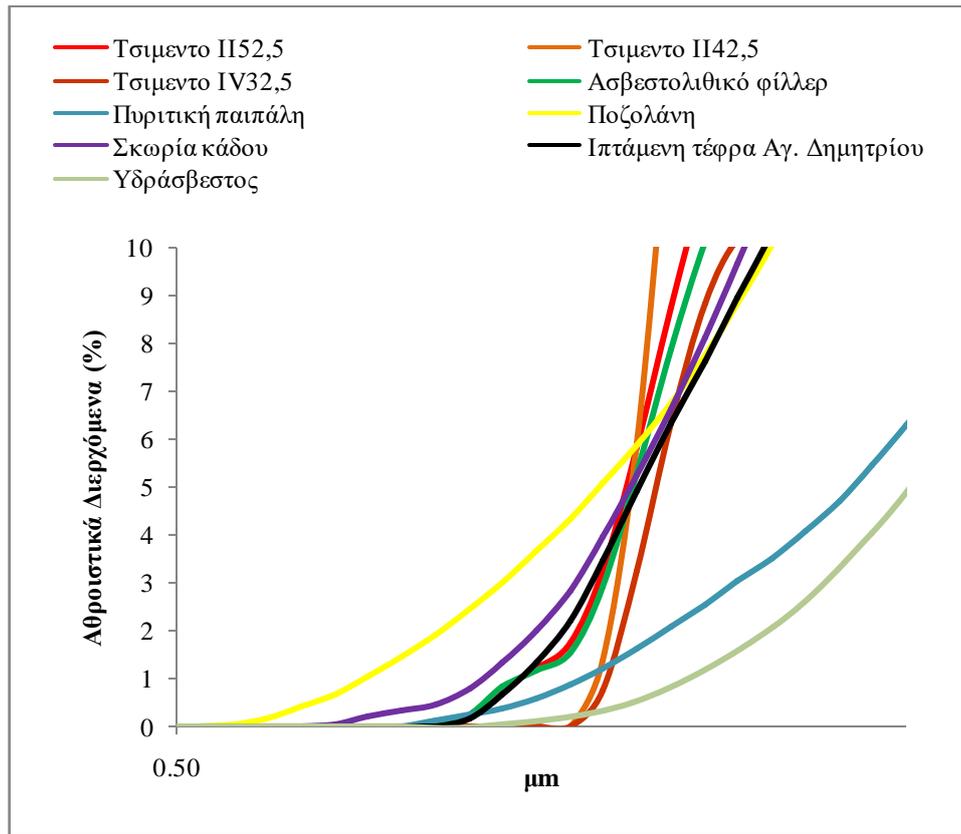
Τα υλικά που ελέγχθηκαν δίνονται στον Πίνακα 1 μαζί με τις πυκνότητες τους. Στις Εικόνες 1 και 2 δίνονται οι PSD των υλικών για όλο το φάσμα διαστάσεων κόκκων και για το φάσμα 0-10μm αντίστοιχα που ενδιαφέρει περισσότερο όσον αφορά το εισπνεόμενο κλάσμα. Στην Εικόνα 3 δίνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν για τις D10, D50 και D90. Η D_i εκφράζει τη διάμετρο κόκκων από την οποία διέρχεται το i% του υλικού.

Πίνακας 1. Χύδην κονίες που ελέγχθηκαν με τις πυκνότητες τους

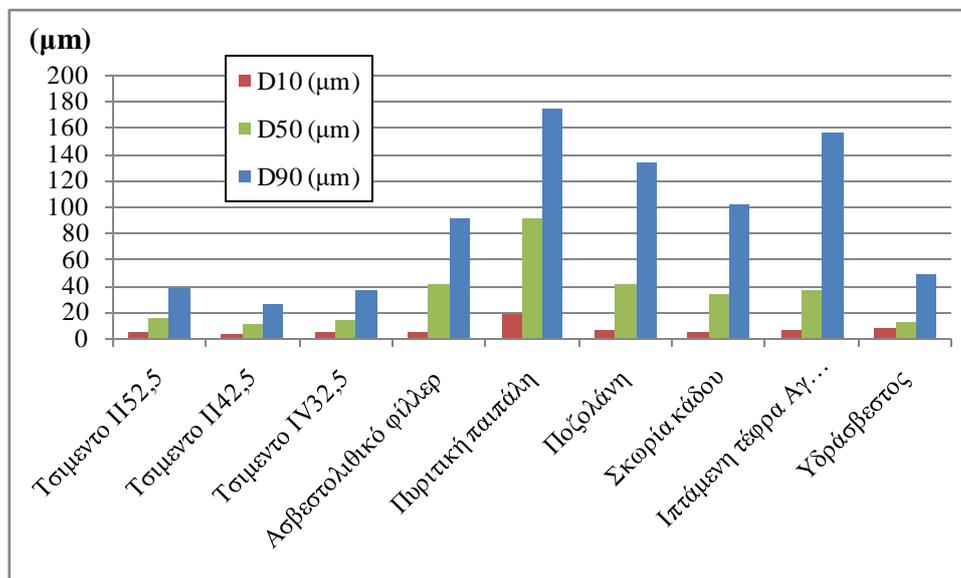
α/α	Υλικό	Πυκνότητα (kg/m ³)
1	Τσιμεντο Π52,5	3050
2	Τσιμεντο Π42,5	3050
3	Τσιμεντο IV32,5	2900
4	Ασβεστολιθικό φίλλερ	2650
5	Πυριτική παιπάλη	2250
6	Ποζολάνη	2395
7	Σκωρία κάδου	2648
8	Ιπτάμενη τέφρα Αγ. Δημητρίου	2554
9	Υδράσβεστος	2279



Εικόνα 1. PSD των κονιών



Εικόνα 2. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων των υλικών από 0 έως 10 μm

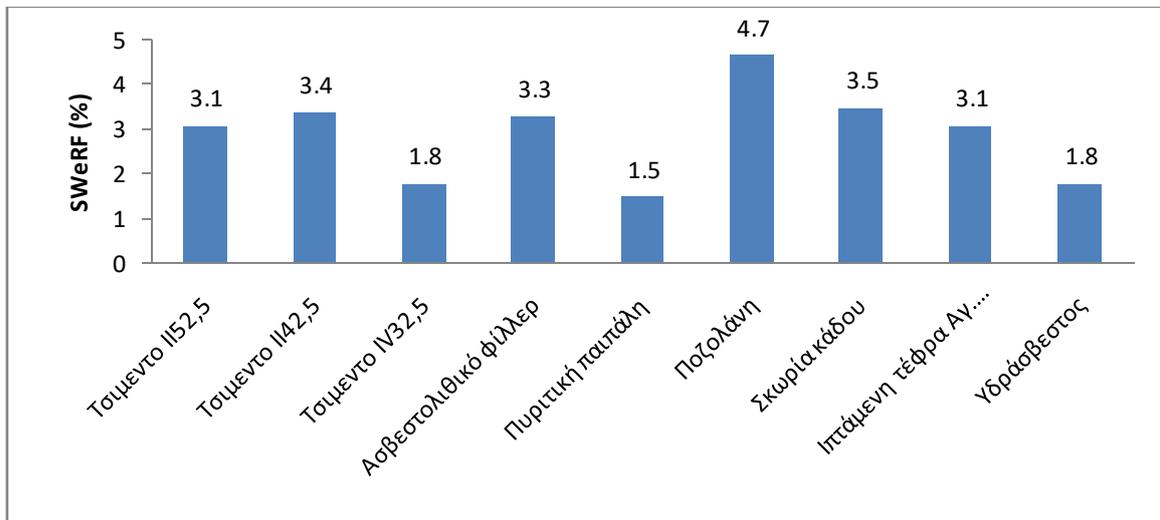


Εικόνα 3. Κατανομή κόκκων των κονιών βάσει PSD

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι κάποιες κονίες είναι πιο λεπτόκοκκες από άλλες, πχ. η πυριτική παιπάλη έχει περισσότερα λεπτόκοκκα από την υδράσβεστο, καθώς επίσης και ότι διαφέρουν ως προς την τιμή της πυκνότητας. Επίσης κονίες με ίδια πυκνότητα έχουν διαφορετική κατανομή κόκκων. Παρακάτω αξιολογείται από τα αποτελέσματα των υπολογισμών το πώς επηρεάζει η πυκνότητα και η λεπτότητα την τιμή SWeRF.

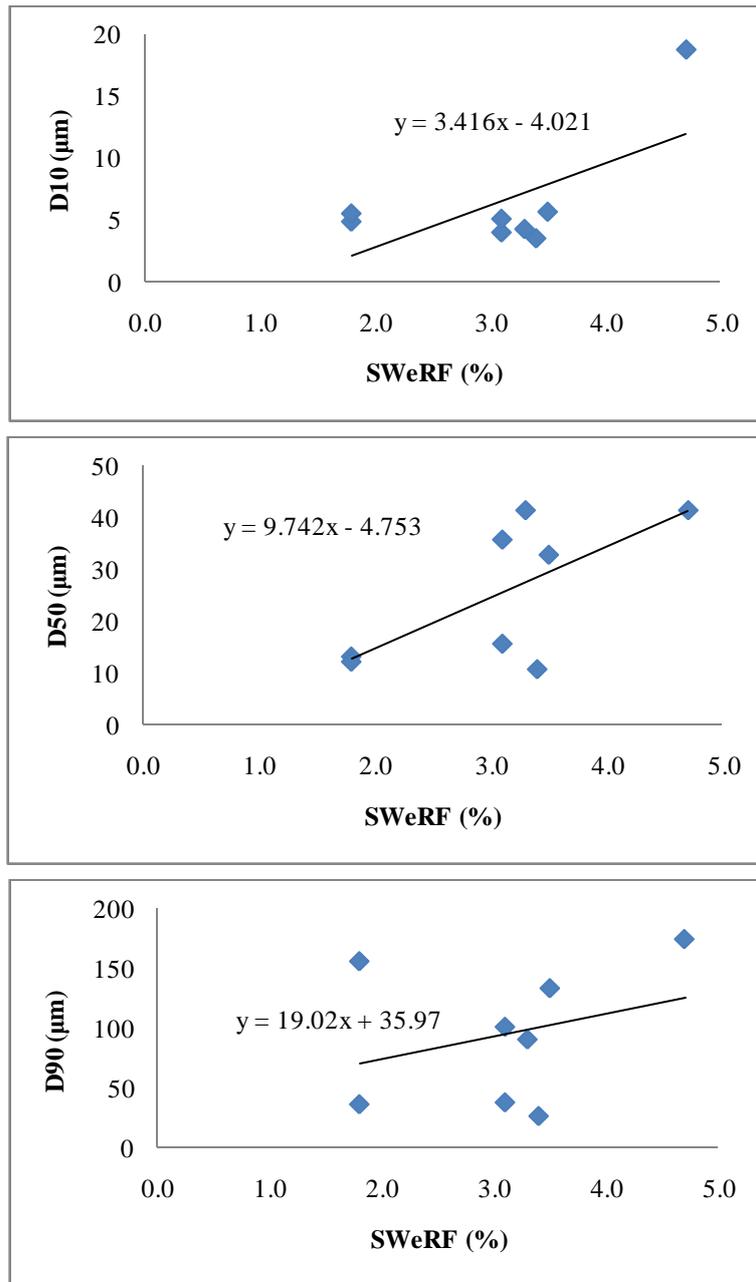
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ SWeRF-ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με διαθέσιμα για κάθε υλικό τις πυκνότητες και τις PSD προέκυψαν σύμφωνα με τις σχέσεις (1) και (2) οι τιμές SWeRF για κάθε υλικό, οι οποίες εκφράζουν το ποσοστό του κλάσματος που μπορεί να φτάσει στους πνεύμονες μέσω της εισπνοής (Εικόνα 4). Υλικά όπως η αλεσμένη ποζολάνη, η σκωρία κάδου ή τα περισσότερα αλεσμένα τσιμέντα 52,5 και 42,5 έχουν μεγαλύτερες τιμές SWeRF από τα υπόλοιπα υλικά.

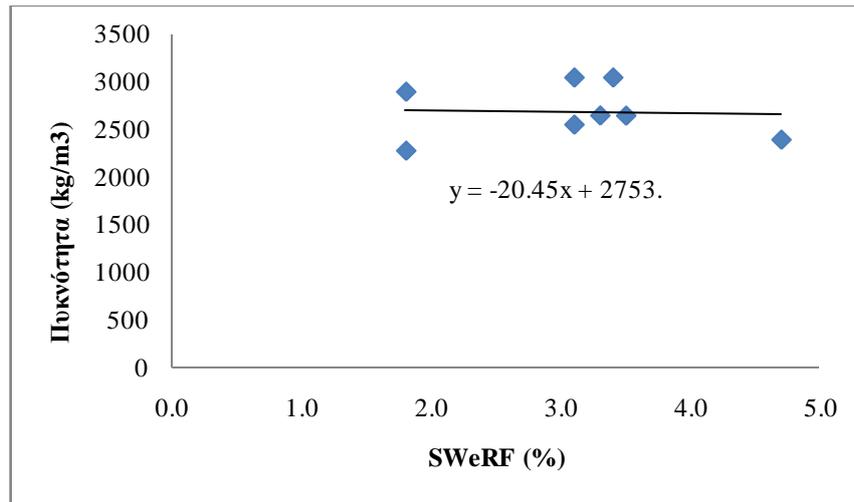


Εικόνα 4. Τιμές SWeRF για κάθε υλικό

Όπως προαναφέρθηκε, η τιμή SWeRF εξαρτάται από τα % διερχόμενα για κάθε κλάσμα, καθώς και από την πυκνότητα των υλικών. Παρακάτω παρατίθεται η συσχέτιση μεταξύ SWeRF και D10, 50 και 90 (Εικόνα 5) καθώς και με την πυκνότητα (Εικόνα 6). Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται ότι υπάρχει μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ SWeRF και D50, που σημαίνει ότι η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του υλικού είναι σημαντικότερος παράγοντας διαφοροποίησης της τιμής SWeRF έναντι της πυκνότητας. Φαίνεται, όπως αναμενόταν, ότι για πιο λεπτόκοκκα υλικά (υλικό με μεγάλο D50 ή καμπύλη PSD μετατοπισμένη πιο αριστερά και επάνω όπως φαίνεται στην Εικόνα 3), η τιμή SWeRF αυξάνεται.



Εικόνα 5. Συσχέτιση τιμής SWeRF με τις D10, 50 και 90



Εικόνα 6. Συσχέτιση SWeRF με την πυκνότητα

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πολλές ανθρωπογενείς διεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αιωρούμενων σωματιδίων τα οποία μέσω της εισπνοής μπορούν να εισχωρήσουν στο ανθρώπινο σώμα. Η πιθανότητα εισχώρησης εξαρτάται μεταξύ άλλων από την διάμετρο των κόκκων και την πυκνότητα του υλικού. Το μέγεθος SWeRF μπορεί να εκφράσει το ποσοστό του υλικού που θα εισχωρήσει στις πνευμονικές κυψελίδες λαμβάνοντας υπόψη τις δυο παραπάνω ιδιότητες. Για τα διαθέσιμα υλικά στα οποία μετρήθηκε η τιμή SWeRF, φάνηκε ότι υψηλότερες τιμές παρουσιάζουν η ποζολάνη, η σκωρία κάδου και το τσιμέντο Π42,5, υλικά που είναι πιο λεπτόκοκκα μεταξύ 1-10μm σε σχέση με τα υπόλοιπα. Επίσης, από τις μετρήσεις φάνηκε ότι η κατανομή των κόκκων του υλικού επηρεάζει περισσότερο την τιμή SWeRF σε σύγκριση με την πυκνότητα.

Επόμενα βήματα της συγκεκριμένης έρευνας είναι να υπολογιστεί η τιμή SWeRF_{CS} των υλικών που μελετήθηκαν, καθώς και να ελεγχθούν λεπτόκοκκα κλάσματα όχι μόνο πρώτων υλών, αλλά και έτοιμων δομικών προϊόντων (πχ. σκυρόδεμα) που μπορούν να προκύψουν μετά από μηχανική επεξεργασία (πχ. κοπή, απότριψη ή διάτρηση).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Davis CN: Particle in atmosphere natural and man made S, Atmospher. Environ, 1974, 8, 1078.
- [2] Βασιλικιώτη Γ, Χημεία Περιβάλλοντος, Θεσσαλονίκη 1981
- [3] Φιωτάκης, Κ. Μελέτη της σύστασης και της τοξικότητας εισπνεόμενων αιωρούμενων σωματιδίων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω μηχανισμών ελευθέρων ριζών. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημείας Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, 2007
- [4] Salma I, Balashazy I, Winkler-Heil R, Hoffman W, Zaray G. Effect of particle mass size distribution on the deposition of aerosols in the human respiratory system, J. Aerosol Sci, 2002, 33, 119-132.
- [5] Ingeborg Pensis, Frank Luetzenkirchen and Bernd Friede. SWeRF—A Method for Estimating the Relevant Fine Particle Fraction in Bulk Materials for Classification and Labelling Purposes, Ann. Occup. Hyg., 2014, Vol. 58, No. 4, 501–511
- [6] CEN. (1993) EN 481, Workplace atmospheres: size fraction definitions for measurement of airborne particles. Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation.
- [7] IMA-Europe. (2019) Available at: <https://www.ima-europe.eu/>. Accessed 9/8/2019.
- [8] IMA-Europe. (2019) SWeRF calculation spreadsheet. Available at <https://www.ima-europe.eu/eu-policy/product-stewardship/metrology>. Accessed 9/8/2019.

Παραγωγή δομικών στοιχείων χαμηλού αποτυπώματος CO₂ με χρήση ανακυκλωμένου σκυροδέματος από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ)

Μ. Γαλετάκης, Α. Σουλτανά, Θ. Δασκαλάκης, Σ. Ράκα, Α. Βασιλείου, Κ. Κορνίτσας

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100 Χανιά

Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα, απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ), ανακυκλωμένα αδρανή, τσιμεντοκονιάματα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η βιομηχανία παραγωγής δομικών υλικών συμβάλλει σε σημαντικό ποσοστό στις εκπομπές CO₂. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην παραγωγή δομικών υλικών (τσιμεντοκονιάματα) χαμηλού αποτυπώματος CO₂ με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών που παρήχθησαν από το σκυρόδεμα που περιέχεται στα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ). Διερευνήθηκε εργαστηριακά η δυνατότητα παραγωγής αναβαθμισμένων αδρανών υλικών (σε κοκκομετρία άμμου) με μεθόδους εκλεκτικής θραύσης και αυτογενούς λειοτριβήσης. Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιαμάτων με χρήση της ποιοτικά αναβαθμισμένης άμμου για την πλήρη υποκατάσταση των φυσικών αδρανών. Τα παραγόμενα δοκίμια ελέγχθηκαν ως προς την αντοχή τους σε θλίψη και κάμψη, την πυκνότητα και την υδατοαπορροφητικότητα τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αναβαθμισμένη ανακυκλωμένη άμμος που παρήχθη μέσω των διαδικασιών εκλεκτικής θραύσης εμφάνισε βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με εκείνη που είχε παραχθεί με τις συνήθεις διαδικασίες θραύσης-ταξινόμησης. Η ποιότητα της αναβαθμισμένης άμμου υπολείπεται όμως εκείνης της πρωτογενούς θραυστής ασβεστολιθικής. Απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της εκλεκτικής αποδέσμευσης των κόκκων των αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα μέσω διαδικασιών θραύσης-λειοτριβήσης.

Production of low CO₂ footprint building elements by using recycled concrete from construction and demolition wastes (CDW)

M. Galetakis, A. Sultana, T. Daskalakis, S. Raka, A. Vasileiou, K. Komnitsas

School of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, 73100 Chania

Keywords: concrete, construction and demolition wastes (CDW), recycled aggregates, cement mortars

ABSTRACT: The building materials industry is one of the major contributors of greenhouse gas emissions and contributes significantly to CO₂ emissions. This study aims to the production of low CO₂ footprint building elements by using recycled concrete aggregates derived from construction and demolition wastes. The potential of upgraded aggregates production (granulometry of sand) by means of selective crushing and autogenous milling was investigated in a laboratory scale. Cement mortar specimens were manufactured using upgraded aggregates for total replacement of crushed limestone sand. Specimens were tested for their compressive and flexural strength, density and water absorption. Results showed that the upgraded recycled sand produced through the selective crushing processes had improved properties than the one produced by conventional crushing processes. However, the quality of the upgraded sand is lower than that of the primary crushed limestone sand. Further investigation regarding the selective liberation of recycled concrete aggregates by crushing-grinding processes is required.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) έχουν αναγνωριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) ως ρεύμα αποβλήτων υψηλής προτεραιότητας ως προς την διαχείριση τους λόγω των μεγάλων ποσοτήτων τους και του υψηλού δυναμικού επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης τους. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat (2017) ο κατασκευαστικός τομέας στην Ευρώπη παράγει περίπου 820 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων κάθε χρόνο. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στο 46% του συνολικού όγκου αποβλήτων που παράγονται, ενώ με βάση οδηγία 2008/98/ΕΚ τα κράτη μέλη της ΕΕ πρέπει να επιτύχουν μέχρι το 2020 την αξιοποίηση τους σε ποσοστό $\geq 70\%$. Στην Ελλάδα η ετήσια κατά κεφαλή παραγωγή ΑΚΚ εκτιμάται σε 0.95 τόνους, ενώ το ποσοστό ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης αυτών των αποβλήτων είναι μικρότερη του 10% με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος αυτών να οδηγείται προς απόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής (Galetakis et al., 2014). Παρόλο που οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ΑΚΚ είναι μικρότερες σε σχέση με άλλα είδη αποβλήτων, ο μεγάλος όγκος αποβλήτων που παράγεται οδηγεί στην ανάγκη εξεύρεσης λύσεων σχετικά με τη διαχείρισή τους. Επιπλέον, εκτιμάται ότι έως και 90% των ΑΚΚ που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν ελαχιστοποιώντας έτσι τα ρεύματα αποβλήτων που έχουν υποστεί υγειονομική ταφή και συνεισφέροντας ταυτόχρονα στην διατήρηση των ορυκτών πόρων (Galvez-Martos et al., 2018, Tam et al., 2018).

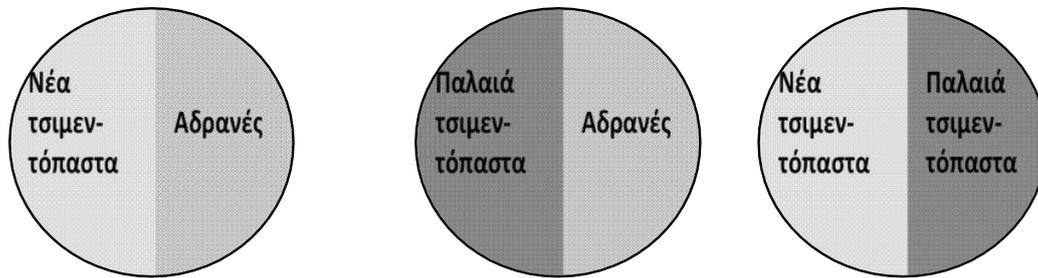
Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων απαρτίζονται κυρίως από σκυρόδεμα και υλικά τοιχοποιίας και σε μικρότερες ποσότητες από κεραμικά πλακίδια, άσφαλτο, ξύλο, μέταλλα, γυψοσανίδες, και άλλα υλικά. Η παραγωγή αδρανών υλικών από το σκυρόδεμα των ΑΚΚ αποτελεί σήμερα την κύρια μέθοδο ανακύκλωσης του. Τα παραγόμενα ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιούνται για υποκατάσταση των πρωτογενών αδρανών κυρίως σε έργα οδοποιίας (ως υλικά υποβάσεων) και σε περιορισμένο βαθμό για την παραγωγή σκυροδέματος και προϊόντων του.

Η περιορισμένη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος οφείλεται σε μια σειρά αιτιών που σχετίζονται κυρίως με τη χαμηλή ποιότητα (Silva et al., 2014):

- Στην έλλειψη προτύπων και προδιαγραφών στα οποία να μπορούν να βασιστούν οι παραγωγοί σκυροδέματος.
- Στη χαμηλή ποιότητα των παραγόμενων αδρανών λόγω της έλλειψης γνώσεων ή και ενδιαφέροντος από τους ιδιοκτήτες των κέντρων ανακύκλωσης.
- Στην απόσταση μεταξύ των χώρων κατασκευών και κατεδαφίσεων και της θέσης του κέντρου ανακύκλωσης ΑΚΚ.
- Στην περιορισμένη διαθεσιμότητα αποθεμάτων ανακυκλωμένων αδρανών καλής ποιότητας ώστε να ικανοποιείται η υπάρχουσα ζήτηση.

Για την παραγωγή καλής ποιότητας σκυροδέματος με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών είναι απαραίτητο να τηρηθούν οι ελάχιστες απαιτήσεις που καθορίζονται από διάφορα πρότυπα. Οι ιδιότητες των αδρανών, καθώς επίσης και οι αναλογίες του μίγματος και η μέθοδος παραγωγής του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά σημαντικές για την ποιότητά του. Οι ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος εξαρτώνται από τα αδρανή που έχουν χρησιμοποιηθεί, τη συνδετική κονία και την διεπιφάνεια μεταξύ αυτών. Η ποιότητα των αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή των φυσικών αδρανών, λόγω της παρουσίας προσκολλημένης προϋπάρχουσας συνδετικής κονίας (τσιμεντόπαστα). Συνεπώς, οι ιδιότητες των αδρανών αυτών εξαρτώνται τόσο από την ποιότητα όσο και από την ποιότητα της προσκολλημένης στο αδρανές τσιμεντόπαστας (Etxeberria et al., 2007, Florea et al., 2014, Gastaldi et al., 2015). Σε σκυροδέματα που έχουν χρησιμοποιηθεί ανακυκλωμένα αδρανή οι διεπιφάνειες που σχηματίζονται και επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την αντοχή

του σκυροδέματος είναι εκείνες μεταξύ κόκκων αδρανών, παλαιάς προϋπάρχουσας και νέας τσιμεντόπαστας (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση διεπιφανειών αδρανών και συνδετικών κονιών (τσιμεντόπαστα) σε σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με ανακυκλωμένα αδρανή.

Επιπλέον, τα αδρανή που προέρχονται από ανακύκλωση σκυροδέματος έχουν υψηλότερο πορώδες και αυξημένη υδαταπορροφητικότητα, ενώ μπορεί να εμφανίζουν και ρηγματώσεις που δημιουργήθηκαν κατά την διαδικασία της θραύσης του σκυροδέματος. Ως εκ τούτου η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα (Σάββα, 2015). Αντικατάσταση πρωτογενών αδρανών με ανακυκλωμένα σε ποσοστό 25% οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε θλίψη κατά 1.5 – 5%, ενώ η πλήρης αντικατάσταση των πρωτογενών με ανακυκλωμένα προκαλεί μείωση κατά 11 – 19% στην αντοχή σε θλίψη (Thomas et al., 2018).

Για την παραγωγή ανακυκλωμένων αδρανών υψηλότερης ποιότητας είναι απαραίτητο το σκυρόδεμα των ΑΚΚ να υποβληθεί σε διαδοχικά στάδια θραύσης-ταξινόμησης με στόχο την εκλεκτική αποδέσμευση και απομάκρυνση της ευθρυπτότερης συνδετικής κονιάς και παραγωγή αδρανών υλικών που αποτελούνται κυρίως από τεμαχίδια των πρωτογενών αδρανών του σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε εργαστηριακά η δυνατότητα παραγωγής αναβαθμισμένων αδρανών υλικών (σε κοκκομετρία άμμου) με μεθόδους εκλεκτικής θραύσης και αυτογενούς λειοτρίβησης.

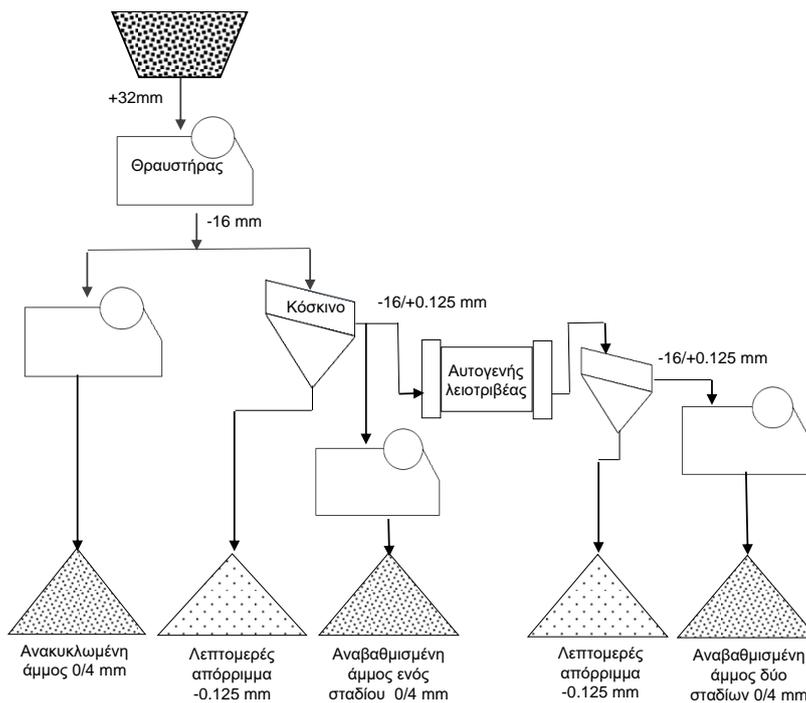
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Παραγωγή και εργαστηριακός έλεγχος ανακυκλωμένων αδρανών

Για την παραγωγή των ανακυκλωμένων αδρανών χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα που προήλθε από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων που συλλέγει και επεξεργάζεται εγκεκριμένη μονάδα της Κρήτης. Το αρχικό υλικό που ελήφθη από αποτελούνταν από τεμάχια σκυροδέματος με μέγεθος μεγαλύτερο των 32 mm. Το υλικό αυτό υποβλήθηκε αρχικά σε θραύση, με χρήση σιαγωνοτού εργαστηριακού θραυστήρα, σε μέγεθος κόκκων μικρότερο των 16mm. Στη συνέχεια ελήφθη αντιπροσωπευτικό δείγμα και προσδιορίστηκε η ορυκτολογική του σύσταση με χρήση περιθλασίμετρου ακτίνων-Χ. Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης έδειξαν ότι το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα περιέχει υψηλές ποσότητες ασβεστίτη (84.5%) και μικρότερες δολομίτη (13%), χαλαζία (1.5%) και μπρουσίτη (1.0%). Το αποτέλεσμα αυτό συνδέεται στενά με τη σύνθεση των αδρανών, καθώς στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στην Κρήτη, οι παραγωγοί έτοιμου σκυροδέματος χρησιμοποιούν θραυστά αδρανή που εξάγονται από ασβεστολιθικά πετρώματα (Galetakis and Souldana 2016, Galetakis et al., 2016).

Από το υλικό που προέκυψε κατά την αρχική θραύση, ένα μέρος του υποβλήθηκε σε νέα θραύση με χρήση σιαγωνοτού θραυστήρα και ραβδόμυλου σε μέγεθος κόκκων μικρότερο των 4 mm για την παραγωγή ανακυκλωμένης άμμου (0-4mm). Το υπόλοιπο υποβλήθηκε σε μηχανική κοσκίνιση και απομακρύνθηκε το κλάσμα -0.125 mm. Στη συνέχεια ένα μέρος από το υλικό με κοκκομετρία -16 +0.125 mm υποβλήθηκε σε θραύση σε εργαστηριακό σιαγωνοτό θραυστήρα και σε ραβδόμυλο για παραγωγή αναβαθμισμένης ανακυκλωμένης άμμου (0-4 mm). Το υπόλοιπο κλάσμα -16 +0.125 mm υποβλήθηκε σε αυτογενή λειοτρίβηση για 16 min, απομακρύνθηκε το κλάσμα -0.125mm και στη συνέχεια έγινε θραύση σε σιαγωνοτό θραυστήρα και ραβδόμυλο για παραγωγή αναβαθμισμένης άμμου 0-4mm. Για την αυτογενή λειοτρίβηση χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός μύλος ασυνεχούς λειτουργίας της εταιρείας Seror με διαστάσεις 0.204x0.235 m και ταχύτητα περιστροφής 67 στροφές ανά λεπτό. Ο χρόνος αυτογενούς λειοτρίβησης υπολογίστηκε με βάση μια σειρά προκαταρκτικών δοκιμών όπου μελετήθηκε η μεταβολή του βαθμού αποδέσμευσης των κόκκων των αδρανών υλικών και της τσιμεντόπαστας του σκυροδέματος των ΑΚΚ. Η χρήση του ραβδόμυλου στο τελικό στάδιο παραγωγής της άμμου επέτρεψε τη παραγωγή ανακυκλωμένης άμμου με κοκκομετρική διαβάθμιση που πληροί τις απαιτήσεις του προτύπου EN 13139 για άμμο κονιαμάτων. Η διαδικασία παραγωγής της απλής ανακυκλωμένης άμμου και των αναβαθμισμένων ποιοτήτων δίνεται στο Σχήμα 2.

Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής ανακυκλωμένης άμμου (συνήθους ποιότητας και αναβαθμισμένης ενός και δύο σταδίων) από το σκυρόδεμα των ΑΚΚ.



Μέσω των διαδικασιών που δίνονται παραστατικά στο Σχήμα 2, παρήχθη ανακυκλωμένη άμμος τριών ποιότητων. Η πρώτη είναι η συνήθης απλή ανακυκλωμένη άμμος, η δεύτερη είναι η αναβαθμισμένης ποιότητας ενός σταδίου (απομάκρυνση του λεπτομερούς κλάσματος -0.125mm από την τροφοδοσία) και η τρίτη είναι η αναβαθμισμένης ποιότητας δύο σταδίων (απομάκρυνση του λεπτομερούς κλάσματος -0.125mm τόσο από την αρχική τροφοδοσία όσο και μετά από αυτογενή λειοτρίβηση). Οι κοκκομετρικές καμπύλες των τριών αυτών άμμων, καθώς και της θραυστής λατομικής άμμου του εμπορίου (ασβεστολιθικής σύστασης) που

χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή δοκιμίων αναφοράς υπολογίστηκαν με βάση το πρότυπο EN 933-1. Το λεπτομερές κλάσμα -0.125mm που προέκυψε ως απόρριμμα κατά την παραγωγή της αναβαθμισμένης άμμου ανέρχεται στο 5% της μάζας του αρχικού υλικού. Εκτός από την κοκκομετρία της ανακυκλωμένης άμμου μετρήθηκε επίσης η υδατοαπορροφητικότητα της σύμφωνα με το πρότυπο EN99,ο συντελεστής ροής για την εκτίμηση του γωνιώδους των κόκκων σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-6, ενώ εξετάστηκε οπτικά και η μορφολογία τους. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ροής χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη εργαστηριακή συσκευή της MATEST και μετρήθηκε ο χρόνος που απαιτείται για τη ροή συγκεκριμένου όγκου άμμου μέσω οπής διαμέτρου 16mm (όσο μεγαλύτερος χρόνος απαιτείται τόσο δυσκολότερα ρέει η άμμος). Η μορφολογία των κόκκων μελετήθηκε με χρήση του στερεοσκοπίου SZM της εταιρείας Optika που διαθέτει την κάμερα τύπου Optika και το λογισμικό Optika vision lite.

2.2. Παραγωγή μιγμάτων και εργαστηριακός έλεγχος δοκιμίων

Για τον έλεγχο της ποιότητας των αναβαθμισμένων αδρανών που προέκυψαν παρασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιαμάτων σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM I 42.5N και παρασκευάστηκαν 4 διαφορετικές σειρές δοκιμίων από τις αντίστοιχες συνθέσεις (Πίνακας 1) χρησιμοποιώντας:

- ανακυκλωμένη άμμο χωρίς αναβάθμιση (AA),
- ανακυκλωμένη άμμο με αναβάθμιση ενός σταδίου (AA1),
- ανακυκλωμένη άμμο με αναβάθμιση δύο σταδίων (AA2) και
- πρωτογενή θραυστή ασβεστολιθική άμμο (ΘΑ).

Πίνακας 1. Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων που δημιουργήθηκαν με βάση την ανακυκλωμένη και την πρωτογενή θραυστή άμμο.

	Συνθέσεις			
	AA	AA1	AA2	ΘΑ
Τσιμέντο CEM I 42.5N (g)	450	450	450	450
Ανακυκλωμένη άμμος (g)	1350	-	-	-
Αναβαθμισμένη άμμος ενός σταδίου (g)	-	1350	-	-
Αναβαθμισμένη άμμος δύο σταδίων (g)	-	-	1350	-
Πρωτογενής θραυστή άμμος (g)	-	-	-	1350
Νερό (g)	289.0	283.5	283.0	225.0
Λόγος νερό/ τσιμέντο	0.64	0.63	0.63	0.50
Διορθωμένος λόγος νερό/ τσιμέντο*	0.49	0.48	0.48	0.48

*Ο διορθωμένος λόγος υπολογίστηκε μετά την αφαίρεση του νερού που προσροφάται από την άμμο.

Λόγω της μεγαλύτερης υδατοαπορροφητικότητας που παρουσιάζει η ανακυκλωμένη άμμος σε σχέση με την λατομική, ο λόγος νερού προς τσιμέντο καθορίστηκε σε κάθε σύνθεση με κριτήριο την επίτευξη εργασιμότητας όμοιας με της σύνθεσης που βασίστηκε στην πρωτογενή θραυστή άμμο. Η ποσότητα του νερού που απαιτήθηκε για την ανακυκλωμένη άμμο ήταν υψηλότερη αφού ένα μέρος του νερού προσροφήθηκε από την ανακυκλωμένη άμμο και δεν συνέβαλε στην ενυδάτωση του τσιμέντου. Με βάση την μετρηθείσα υδατοαπορροφητικότητα της ανακυκλωμένης και πρωτογενούς άμμου υπολογίστηκε και ο διορθωμένος λόγος νερό/τσιμέντο (Πίνακας 1).

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων των τσιμεντοκονιαμάτων περιλάμβανε την ανάμιξη των υλικών σε εργαστηριακό αναμικτήρα και τη χύτευση του μίγματος σε τρίδυμες μεταλλικές πρισματικές μήτρες διαστάσεων 40x40x160 mm³ με ταυτόχρονη δόνηση σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Ακολούθησε η ωρίμανση των δοκιμίων σε κλιματικό θάλαμο σε θερμοκρασία 20±1°C και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 27 ημέρες σύμφωνα με

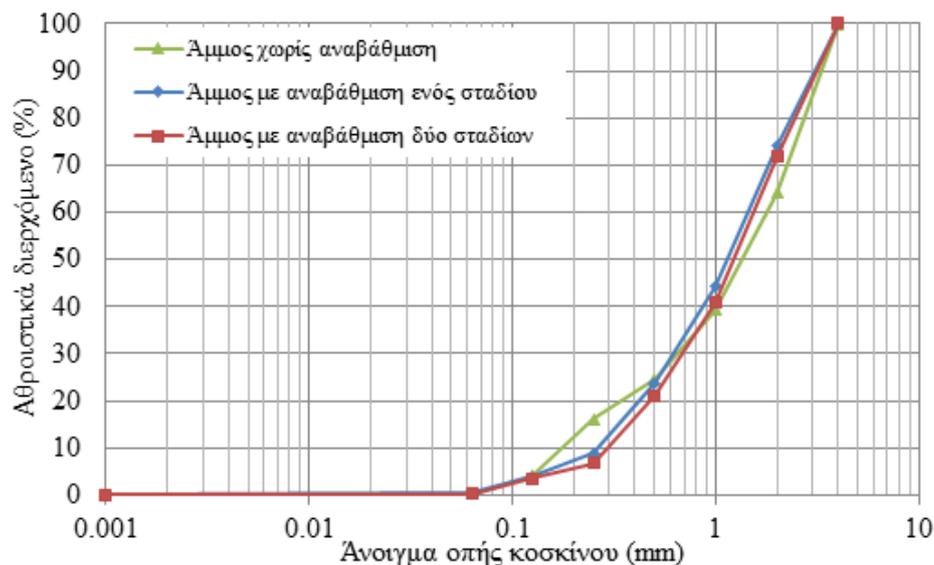
τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος. Έπειτα, τα δοκίμια παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος για 1 ημέρα, προ της διεξαγωγής των εργαστηριακών δοκιμών. Ο εργαστηριακός έλεγχος των σκληρυμένων πρισματικών δοκιμών περιλάμβανε:

- Μέτρηση της αντοχής σε κάμψη (F_f) και μονοαξονική θλίψη (F_c) σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1.
- Μέτρηση της πυκνότητας και της υδατοαπορροφητικότητας σύμφωνα με το πρότυπο EN 99.

3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1. Ανακυκλωμένη άμμος

Στο Σχήμα 3 δίνεται η κοκκομετρική καμπύλη της απλής ανακυκλωμένης άμμου χωρίς διαδικασία αναβάθμισης, της ανακυκλωμένης άμμου με αναβάθμιση ενός σταδίου και της ανακυκλωμένης άμμου με αναβάθμιση δύο σταδίων. Οι κοκκομετρικές καμπύλες της ανακυκλωμένης άμμου με αναβάθμιση ενός σταδίου και εκείνης με αναβάθμιση δύο σταδίων είναι σχεδόν ταυτόσημες. Η κοκκομετρική καμπύλη της απλής ανακυκλωμένης άμμου εμφανίζει σχετικά μεγαλύτερο ποσοστό λεπτομερούς κλάσματος 0-0.5mm και μικρότερο ποσοστό του κλάσματος 0.5-4mm. Η διαφοροποίηση αυτή είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας της εκλεκτικής θραύσης που ακολουθήθηκε (Σχήμα 2).

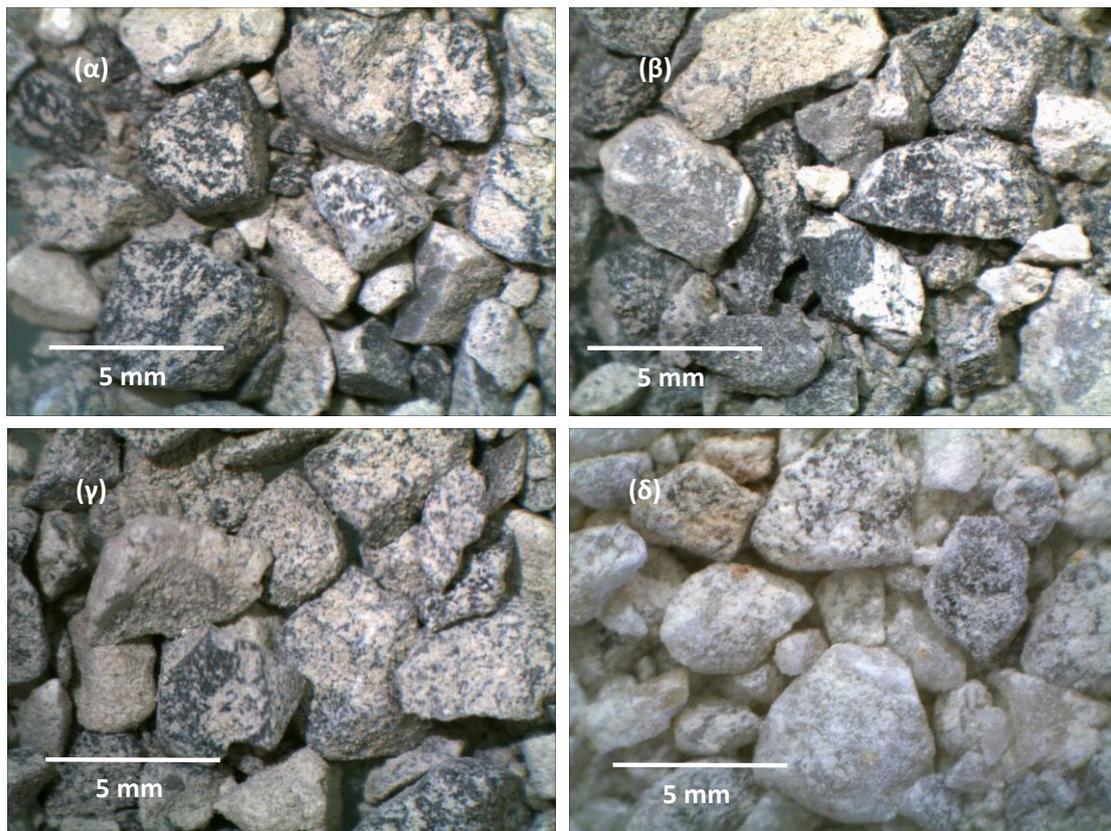


Σχήμα 3. Κοκκομετρικές καμπύλες των τριών διαφορετικών τύπων ανακυκλωμένης άμμου.

Η μελέτη της μορφολογίας των κόκκων με το στερεοσκόπιο (Σχήμα 4) έδειξε ότι οι κόκκοι της ανακυκλωμένης άμμου και των τριών ποιτήτων (AA, AA1 και AA2) εμφανίζονται περισσότερο γωνιώδεις σε σχέση με τους κόκκους της θραυστής άμμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζουν ελαφρώς μεγαλύτερο χρόνο ροής από την θραυστή άμμο, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της μέτρησης του συντελεστού ροής που δίνεται στον Πίνακα 2. Η υδατοαπορροφητικότητα και των τριών ποιτήτων της ανακυκλωμένης άμμου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, κυμαίνεται από 5.0-5.7 % και είναι σημαντικά υψηλότερη εκείνης της θραυστής άμμου (0.7 %).

Πίνακας 2. Μετρήσεις του συντελεστή ροής (χρόνος) και της υδατοαπορροφητικότητας της ανακυκλωμένης και της πρωτογενούς άμμου.

	Ανακυκλωμένη άμμος χωρίς αναβάθμιση	Ανακυκλωμένη άμμος με αναβάθμιση ενός σταδίου	Ανακυκλωμένη άμμος με αναβάθμιση δύο σταδίων	Θραυστή ασβεστολιθική άμμος
Χρόνος ροής (s)	20	19	19	18
Υδατοαπορροφητικότητα (%)	5.7	5.1	5.0	0.7



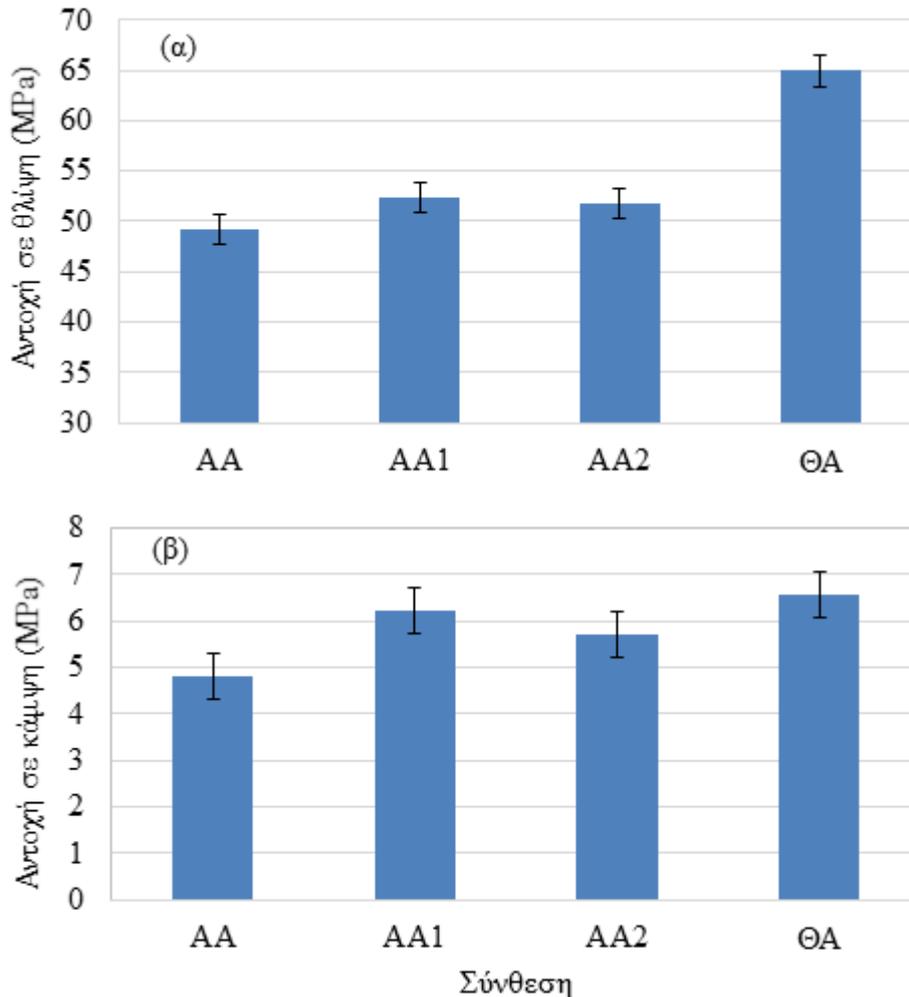
Σχήμα 4. Εικόνες στερεοσκοπίου για τη μελέτη της μορφολογίας των κόκκων της άμμου: (α) ανακυκλωμένη χωρίς ποιοτική αναβάθμιση, (β) με αναβάθμιση ενός σταδίου, (γ) με αναβάθμιση δύο σταδίων και (δ) θραυστή ασβεστολιθική άμμος.

3.2. Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων

Οι μετρήσεις της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, σε κάμψη, η υδατοαπορροφητικότητα και η πυκνότητα των δοκιμίων τσιμεντοκονιαμάτων που παρασκευάστηκαν δίνονται στον Πίνακα 3. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη των δοκιμίων των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν με ανακυκλωμένη άμμο διαφορετικών ποιοτήτων (AA, AA1, AA2) και με θραυστή ασβεστολιθική άμμο (ΘΑ), φαίνεται στο Σχήμα 5.

Πίνακας 3. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σε κάμψη, υδατοαπορροφητικότητα και πυκνότητα των δοκιμίων τσιμεντοκονιαμάτων.

Σύνθεση	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Υδατοαπορροφητικότητα(%)
AA	49.19	4.82	2135	10.6
AA1	52.36	6.23	2146	11.3
AA2	51.77	5.70	2168	11.2
ΘΑ	64.93	6.56	2540	7.5



Σχήμα 5. (α) Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και (β) αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν με ανακυκλωμένη άμμο διαφορετικών ποιοτήτων (AA, AA1, AA2) και με θραυστή ασβεστολιθική άμμο (ΘΑ). Το σφάλμα μέτρησης για την αντοχή σε θλίψη είναι 0.5MPa και σε κάμψη 1.5MPa.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 και το Σχήμα 5 φαίνεται ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με θραυστή ασβεστολιθική άμμο έχουν υψηλότερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη σε σχέση με τα δοκίμια των υπόλοιπων συνθέσεων (64.93 MPa και 6.56 MPa, αντίστοιχα). Η μείωση της αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με ανακυκλωμένη άμμο σε σχέση με εκείνη των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με θραυστή κυμαίνεται από 19.36% (σύνθεση AA1) έως 24.24% (σύνθεση AA). Η αντίστοιχη μείωση της αντοχής σε κάμψη είναι σημαντικά μικρότερη για

τη σύνθεση AA1 (5.03%) και τη σύνθεση AA2 (13.10%), ενώ είναι σχετικά υψηλή (26.52%) για τη σύνθεση AA.

Τα δοκίμια με θραυστή ασβεστολιθική άμμο είχαν επίσης την υψηλότερη πυκνότητα και τη χαμηλότερη τιμή υδατοαπορροφητικότητας. Η πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 2135 έως 2168 kg/m³ και είναι μικρότερη από την πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τη θραυστή ασβεστολιθική άμμο (2540 kg/m³). Η υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 10.6 έως 11.3 % και είναι μεγαλύτερη από την υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με την θραυστή ασβεστολιθική άμμο (7.8 και 7.5 %, αντίστοιχα).

Οι τιμές των αντοχών σε κάμψη και θλίψη των δοκιμίων με μη αναβαθμισμένη ανακυκλωμένη άμμο είναι χαμηλότερες από αυτές των δοκιμίων με αναβαθμισμένη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι τιμές αντοχών μεταξύ των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με αναβαθμισμένη άμμο ενός και δύο σταδίων δε διαφέρουν σημαντικά. Συνεπώς, το πρώτο στάδιο αναβάθμισης των ανακυκλωμένων αδρανών επαρκεί για τη βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, ενώ η εφαρμογή δεύτερου σταδίου αναβάθμισης δεν φάνηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση να βελτιώνει περαιτέρω την ποιότητά τους.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η αναβαθμισμένη ανακυκλωμένη άμμος που παρήχθη μέσω των διαδικασιών εκλεκτικής θραύσης εμφάνισε βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με εκείνη που είχε παραχθεί με τις συνήθεις διαδικασίες θραύσης-ταξινόμησης. Η ποιότητα της αναβαθμισμένης άμμου υπολείπεται όμως εκείνης της πρωτογενούς θραυστής ασβεστολιθικής. Για την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος προτείνεται η λεπτομερέστερη διερεύνηση της διαδικασίας της αυτογενούς λειοτριβήσης (π.χ. με μεταβολή της κοκκομετρίας του υλικού τροφοδοσίας), η διερεύνηση της χρήσης άλλων τεχνικών εκλεκτικής αποδέσμευσης αδρανών-κονίας, όπως εκείνης της χρήσης ηλεκτρικού τόξου. Η τεχνολογία ευνοεί τη θραύση κατά μήκος των ορίων των κόκκων και έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο βαθμό αποδέσμευσης των κόκκων των αδρανών από τη συνδετική κονία, ενώ ταυτόχρονα τα αδρανή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος παραμένουν άθικτα. Επίσης, προτείνεται να μελετηθεί η δυνατότητα αξιοποίησης του λεπτομερούς απορρίμματος ως συνδετικής κονίας μετά από θερμική ενεργοποίηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Etxeberria M., Marí A. R. and Vázquez E. (2007). Recycled Aggregate Concrete as Structural Material, *Materials and Structures*, 40(5):529-541.
- Florea M.V.A., Ning Z. and Brouwers H.J.H. (2014). Activation of liberated concrete fines and their application in mortars, *Construction and Building Materials*, 50:1-12.
- Galetakis M. and Soultana A. (2016). A review on the utilization of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*, 102:769-781.
- Galetakis M., Komnitsas K., Leventakis K., Vasiliou A., Piperidi C., Zaharaki D., Stavroulakis N. and Ginos M. (2014). Assessment of Construction and Demolition Wastes as raw material for the building industry, 4th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, Chania, Greece, (September 2 - 5).

- Galetakis M., Piperidi C., Vasiliou A., Alevizos G., Steiakakis E., Komnitsas K. and Soultana A. (2016) Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting, *Construction and Building Materials*, 107:247-254.
- Galvez-Martos J.L., Styles D., Schoenberger H and Zeschmar-Lahl B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe, *Resources, Conservation and Recycling*, 136:166-178.
- Gastaldi D., Canonico F., Capelli L., Buzzi L., Boccaleri E. and Irico S. (2015). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste, *Cement and Concrete Composites*, 61:29-35.
- Silva R.V., Brito J. and Dhir R.K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials*, 65:201-217.
- Tam V.W.Y., Soomro M. and Evangelista A.C.J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017), *Construction and Building Materials*, 172:272-292.
- Thomas J., Thaickavil N. N. and Wilson P.M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates, *Journal of Building Engineering*, 19:349-365.
- Σάββα Α.Ε. (2015). Αντοχή και υδατοαπορροφητικότητα σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, Πρακτικά 4^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΙΠΑΡ, Θεσσαλονίκη (11-12 Ιουνίου), 318-332.

Χρήση ανακτημένου ασφαλτικού σκυροδέματος για την παραγωγή ασφαλτομίγματος υψηλής επιτελεστικότητας

Σ. Λυκούδης

Προϊστάμενος Εργαστηρίου ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: Ανακτημένο Ασφαλτόμιγμα (RAP), Enrobesa Modules Eleve (EME), Αναζωογονητές, Μέτρο δυσκαμψίας, Ανακύκλωση ασφαλτοσκυροδέματος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Είναι πλέον παγκόσμια πρακτική το φρεζαρισμένο ασφαλτικό οδόστρωμα να μην απορρίπτεται ή να χρησιμοποιείται σαν υλικό οδοστρώσεως αλλά να χρησιμοποιείται σαν συνθετικό συστατικό των ασφαλτικών στρώσεων. Βάσει των Ελληνικών Προδιαγραφών επιτρέπεται η χρήση Ανακτημένου Ασφαλτομίγματος σε ποσοστό 10% στις επιφανειακές στρώσεις και 20% στις υποκείμενες στρώσεις. Χρησιμοποιώντας το Ανακτημένο Ασφαλτόμιγμα για την παραγωγή ασφαλτομιγμάτων πέρα από τα περιβαλλοντικά οφέλη από την επανάχρησή του προκύπτουν οικονομικά και τεχνικά οφέλη από τα υψηλότερα μηχανικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου ασφαλτομίγματος. Στην παρούσα εργασία γίνεται παρουσίαση Χρήσης Ανακτημένου Ασφαλτομίγματος στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες, των ορθών πρακτικών διαχείρισης του Ανακτημένου Ασφαλτομίγματος, των Μηχανικών χαρακτηριστικών του Ανακτημένου Ασφαλτομίγματος, των Μηχανικών χαρακτηριστικών Ασφαλτομιγμάτων που περιέχουν Ανακτημένο Ασφαλτόμιγμα, Συγκριτικών Δοκιμαστικών Ασφαλτομιγμάτων Υψηλής Επιτελε-στικότητας-Δυσκαμψίας (Enrobesa a ModuleEleve), τα οποία περιέχουν διάφορα ποσοστά Ανακτημένου Ασφαλτομίγματος.

Use of reclaimed asphalt pavement for the production of high performance pavements

S. Likoudis

EgnatiaOdos S.A.

Λέξεις κλειδιά: Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Enrobesa a Modules Eleve (EME), Rejuvenators, Stiffness Modulus, Asphalt Pavement Recycling

ABSTRACT: It is a worldwide practice that the reclaimed asphalt pavement (RAP) is no longer discarded or used as secondary material, but it is rather used as a constituent of the asphalt layers. Based on the Greek National Standards, the use of RAP is allowed at a maximum rate of 10% for surface layers and of 20% for the underlying layers. The use of RAP for the production of asphalt pavements results not only in environmental benefits from its recycling, but also in financial and technical benefits from the increased mechanical properties of the produced asphalt pavement. The present report discusses the use of RAP in Europe and USA, the best construction practices regarding RAP and the mechanical characteristics of asphalt pavements with RAP. Comparative test asphalt pavements of high performance and high stiffness modulus (Enrobesa a Modules Eleve) with various RAP contents are also presented.

1. ΓΕΝΙΚΑ

Η κατασκευαστική βιομηχανία ασφαλικών και χωματουργικών εργασιών, όπως και άλλοι φορείς, αντιμετωπίζει πάντοτε τέσσερις βασικούς προβληματισμούς: τη μείωση των διαθέσιμων κονδυλίων, την απρόσκοπτη και συνεχή προμήθεια των πρώτων υλών (αδρανή και άσφαλτο), την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω υπάρχει άμεση ανάγκη να βελτιστοποιηθεί η χρήση του διαθέσιμου κεφαλαίου και οι ιδιότητες των πρώτων υλών, να ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια που δαπανάται σε όλες τις δραστηριότητες των έργων κατασκευής ή συντήρησης/αποκατάστασης και να εξευρεθούν εναλλακτικές λύσεις που δε θα προσβάλλουν, δε θα επιδεινώνουν και δε θα αλλοιώνουν το περιβάλλον.

Μια σημαντικότατη συνεισφορά στην παραπάνω προσπάθεια προσφέρεται από την επαναχρησιμοποίηση ή την ανακύκλωση των υλικών των παλαιών οδοστρωμάτων, όπως ασφαλτόμιγμα, σκυρόδεμα ή αδρανή υλικά στρώσεων βάσης/υπόβασης.

2. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ

Με την ανακύκλωση των οδοστρωμάτων επέρχεται *προστασία* και *εξοικονόμηση* των αποθεμάτων σε αδρανή, σε άσφαλτο και σε ενέργεια, *προστασία* του περιβάλλοντος και *μείωση* του κόστους κατασκευής.

2.1 Προστασία και εξοικονόμηση των αποθεμάτων σε αδρανή, άσφαλτο και ενέργεια

Η προστασία των αποθεμάτων των πετρωμάτων κατάλληλων για έργα οδοποιίας και ειδικότερα των πετρωμάτων για αρίστης ποιότητας σκληρά αδρανή, είναι πολύ σοβαρός παράγοντας ιδιαίτερα σε χώρες που δε διαθέτουν πολλά φυσικά αποθέματα. Ακόμη πιο επιτακτική γίνεται η ανάγκη διατήρησης ή καλύτερα επαναχρησιμοποίησης των αδρανών σε χώρες που δε διαθέτουν κατάλληλα φυσικά αποθέματα, οπότε και το κόστος κτήσης τους, κυρίως λόγω του κόστους μεταφοράς, είναι αρκετά υψηλό.

Από την άλλη μεριά, δηλαδή σε χώρες όπου υπάρχει περίσσεια αδρανών, η συνεχής ζήτηση έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση για εκμετάλλευση νέων και περισσότερων φυσικών αποθεμάτων. Με την επαναχρησιμοποίηση των αδρανών από τα παλαιά οδοστρώματα μειώνεται η ζήτηση για νέα αδρανή και έτσι επιμηκύνεται η εκμετάλλευση των φυσικών αποθεμάτων. Ταυτόχρονα επιβραδύνεται η απαίτηση δημιουργίας νέων λατομείων, πράγμα που συμβάλλει άμεσα στην προστασία του περιβάλλοντος. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η δημιουργία νέων λατομείων δεν είναι σήμερα εύκολη υπόθεση λόγω των αυστηρών περιβαλλοντικών περιορισμών αλλά και της αύξησης του κόστους γης.

Με την ανακύκλωση των ασφαλτομιγμάτων μειώνεται επίσης και η κατανάλωση της ασφάλτου. Ένα νέο ασφαλικό σκυρόδεμα απαιτεί συνήθως 4,5% έως 5,5% άσφαλτο, ενώ ένα ανακυκλωμένο ασφαλικό σκυρόδεμα απαιτεί προσθήκη νέας ασφάλτου συνήθως από 1% έως 3%. Από τα παραπάνω ποσοστά διαφαίνεται μια εξοικονόμηση σε άσφαλτο της τάξεως, κατά μέσο όρο, του 3,0% κατά βάρος μίγματος, ήτοι μείωση σε άσφαλτο περίπου 30 lt ανά τόνο ασφαλτομίγματος.

2.2 Προστασία του περιβάλλοντος

Η ανακύκλωση των οδοστρωμάτων συμβάλλει άμεσα στη διατήρηση και προστασία του περιβάλλοντος διότι, πρώτον, όπως προαναφέρθηκε, επιβραδύνεται η ανάγκη δημιουργίας νέων λατομείων και δεύτερον εκμηδενίζονται όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με την εναπόθεση των υλικών από παλιές ασφαλικές στρώσεις. Η εναπόθεση των απορριπτέων υλικών από παλιές στρώσεις, εκτός του ότι προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς και κατάλληλης έκτασης απόρριψης, αλλάζει και τη μορφή του τοπίου της περιοχής.

Παράλληλα, η συγκέντρωση των υδρογονανθράκων της ασφάλτου πιθανόν να μολύνει τον υδροταμιευτήρα και τα ιχνοστοιχεία του εδάφους γύρω από την περιοχή αυτή.

Επίσης, θετική είναι και η επίδραση της ανακύκλωσης, ιδιαίτερα της ψυχρής, στις εκπομπές άνθρακα σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους θερμής ανακατασκευής ασφαλτικής στρώσης. Από πρόσφατη έρευνα βρέθηκε ότι οι εκπομπές άνθρακα κατά την ανακατασκευή 7 cm ασφαλτικής στρώσης με ψυχρά ανακύκλωση είναι μόνο 624 kgeq C/1000 m² έναντι 2.381 kgeq C/1000 m², εάν χρησιμοποιείτο συμβατική τεχνική με θερμό ασφαλτόμιγμα (Mauduitetal 2011).

2.3 Μείωση του κόστους κατασκευής

Με την ανακύκλωση τέλος, μπορεί να μειωθεί το συνολικό κόστος συντήρησης, αποκατάστασης, ενίσχυσης, ή ανακατασκευής τωνοδοστρωμάτων. Η μείωση του κόστους των παραπάνω εργασιών προέρχεται κατά κύριο λόγο από τη μείωση του κόστους μεταφοράς των υλικών και σε μικρότερο βαθμό από τη μείωση του κόστους παραγωγής. Η επερχόμενη μείωση του κόστους παραγωγής οφείλεται κυρίως στη χρησιμοποίηση μικρότερης θερμικής ενέργειας, που στην περίπτωση επιλογής της ανακύκλωσης εν ψυχρώ είναι ακόμη πιο ουσιαστική.

Το ποσοστό μείωσης του κόστους κατασκευής μεταβάλλεται από έργο σε έργο, δεδομένου ότι όλοι οι παράγοντες που εμπλέκονται δεν παραμένουν σταθεροί. Από τις πρώτες εφαρμογές ανακύκλωσης, οι οποίες έγιναν στις ΗΠΑ, αναφέρεται ότι η μείωση που επιτεύχθηκε στο κόστος του ασφαλτομίγματος έτοιμου προς διάστρωση, όταν αυτό είχε παραχθεί σε μόνιμη εγκατάσταση, κυμάνθηκε από 10% έως 39%, αναλόγως του έργου (TRB NCHRP 54, Finn). Ομοίως, όταν η ανακύκλωση έγινε επιτόπου, η μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής ήταν της τάξεως του 33%. Αντίστοιχες συγκριτικές μελέτες στην Ευρώπη έδωσαν μικρότερα ποσοστά μείωσης, μικρότερα του 30% (Chappat&Plaut, Marauxetal).

Παρόλο που με την ανακύκλωση μπορεί να υπάρξει μια μείωση του κόστους κατασκευής, το γεγονός αυτό και μόνο δεν είναι ο αποφασιστικός παράγοντας για την επιλογή της. Σε ορισμένες χώρες η μείωση της δαπανώμενης ενέργειας ή η εξοικονόμηση αδρανών υλικών ή η προστασία του περιβάλλοντος ή η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης πιθανόν να έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα στη λήψη αποφάσεων, από αυτή της μείωσης του κόστους.

3. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗΣ RAP/RAP BEST PRACTICES

Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανακύκλωσης γίνεται σύμφωνα με την τεχνική που χρησιμοποιείται, το είδος των υλικών που πρόκειται να ανακυκλωθούν και το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει (δηλαδή απλή συντήρηση ορισμένων φθορών, βελτίωση της ποιότητας οδήγησης, μετά ή άνευ ενίσχυσης της δομικής αντοχής του οδοστρώματος κλπ.).

Έτσι, η ανακύκλωση διακρίνεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- i) την επιφανειακή ανακύκλωση-απόξεση (Coldplanning (CP)),
- ii) την ανακύκλωση εν θερμώ (Hotrecycling (HR)),
- iii) την ανακύκλωση εν ψυχρώ (ColdRecycling (CR)), και
- iv) την ανακύκλωση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

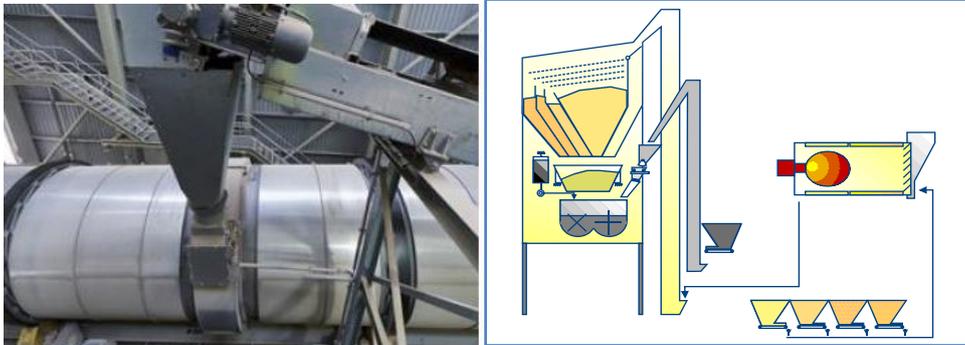
Πλην της πρώτης κατηγορίας οι υπόλοιπες τρεις διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες: την ανακύκλωση επί της οδού ή επί του έργου (recycle in-situ) και την ανακύκλωση σε μόνιμη εγκατάσταση (recycle in plant).

Όσον αφορά την Ελληνική πραγματικότητα η βασική πλειονότητα της ανακύκλωσης που πραγματοποιείται είναι η ανακύκλωση εν θερμώ σε μόνιμη εγκατάσταση. Η μεθοδολογία της

ανακύκλωσης εν θερμώ σε μόνιμη εγκατάσταση διαχωρίζεται σε 2 μεθόδους ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται στο Παρασκευαστήριο

- Ψυχρή Μέθοδος (άμεση προσθήκη του RAP στο ασφαλτικό mixer)
- Θερμή Μέθοδος (προετοιμασία του RAP σε double dryer ή ring dryer).

Η μεθοδολογία των 2 ανωτέρω μεθόδων παρουσιάζεται στις Εικόνες 1 και 2.



Εικ.1 Θερμή Μέθοδος: Ring Dryer Εικ.2 Ψυχρή Μέθοδος: Προσθήκη στο mixer

Η ορθή διαχείριση του RAP περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια

- Φρεζάρισμα
- Αποθήκευση του Ανεπεξέργαστου RAP
- Επεξεργασία (Θραύση και Κοσκίνιση του RAP)
- Αποθήκευση του επεξεργασμένου RAP
- Ποιοτικός Έλεγχος του Επεξεργασμένου RAP
- Έλεγχος/Τροποποίηση της χρησιμοποιούμενης Μελέτης Σύνθεσης ασφαλτικών σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του RAP

Σημειώνεται εδώ ότι ιδιαίτερη φροντίδα πρέπει να αφιερώνεται στην ορθή αποθήκευση του RAP προκειμένου να αποφεύγεται η απόμειξη, καθώς επίσης είναι ιδιαίτερα επιθυμητό να υπάρχει στέγαστρο προκειμένου να αποφεύγεται η αύξηση της υγρασίας στο ανακλούμενο ασφαλτικό.

Οι φάσεις της ορθής διαχείρισης του RAP φαίνονται στις Εικόνες 3-8.



Εικ.3 Φρεζάρισμα



Εικ.4 Φρεζαρισμένο Οδόστρωμα



Εικ.5 Επεξεργασία RAP



Εικ.6 Κλάσματα RAP



Εικ.7 Συνθήκες φύλαξης RAP



Εικ.8 Δειγματοληψία RAP

4.ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ RAP ΣΕ ΗΠΑ ΚΑΙ ΕΥΡΩΠΗ

Τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής παρατηρείται και καταγράφεται σημαντική δραστηριότητα σε σχέση με τη χρήση του Ανακυκλωμένου Ασφαλτικού. Τα στοιχεία που παρατίθενται στον Πίνακα 1 από τις Ηνωμένες Πολιτείες προέρχονται από την ετήσια έρευνα της Εθνικής Ένωσης των Παραγωγών Ασφάλτου(NAPA National Asphalt Pavement Association,Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-MixAsphaltUsage,2017,8th AnnualSurvey) και από την Ευρώπη από την Ευρωπαϊκή Ένωση Παραγωγών Ασφάλτου (EAPA European Asphalt Pavement Assosiation ,Asphalt Figures 2017).

Πίνακας 1. Στοιχεία σχετικά με τη χρήση RAP

Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής –Χρησιμοποιηθείσες Ποσότητες RAP		
Εθνική Περίληψη /Έτος	2016	2017
Ολικό	155.8	163.0
Ποσότητες χρησιμοποιηθείσες από DOT	62.9	71.0
Ποσότητες χρησιμοποιηθείσες από άλλες Υπηρεσίες	42.4	39.9
Εμπορικές και Οικιακές Χρήσεις	50.4	52.2
Αριθμός Εταιρειών	229	238
RAP	Tons, Millions	
Έγινε Αποδεκτό	35.6	35.7
Χρησιμοποιηθέν σε HMA/WMA Mixtures	32.8	33.8
Χρησιμοποιηθέν ως Αδρανές	1.3	1.4
Χρησιμοποιηθέν ως Αδρανές σεCold-MixAsphalt	0.1	0.1
Άλλη Χρήση	0.2	0.1
Απόρριψη σε χωματερή	0.0	0.0
Απόθεμα RAP στο τέλος του έτους	41.2	45.8
Avg. % Used in Mixtures		
% Ποσότητες χρησιμοποιηθείσες από DOT	19.3%	19.5%
Ποσότητες χρησιμοποιηθείσες από άλλες Υπηρεσίες	19.7%	19.1%
Ποσότητες χρησιμοποιηθείσες από άλλες Υπηρεσίες	24.2%	21.7%
Αριθμός εταιρειών που χρησιμοποιούν RAP	224	234

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται εξελικτικά τα στοιχεία χρήσης του RAP από το 2009 έως το 2017 σε σχέση με την χρήση τους.

Πίνακας 2. Στοιχεία χρήσης RAP

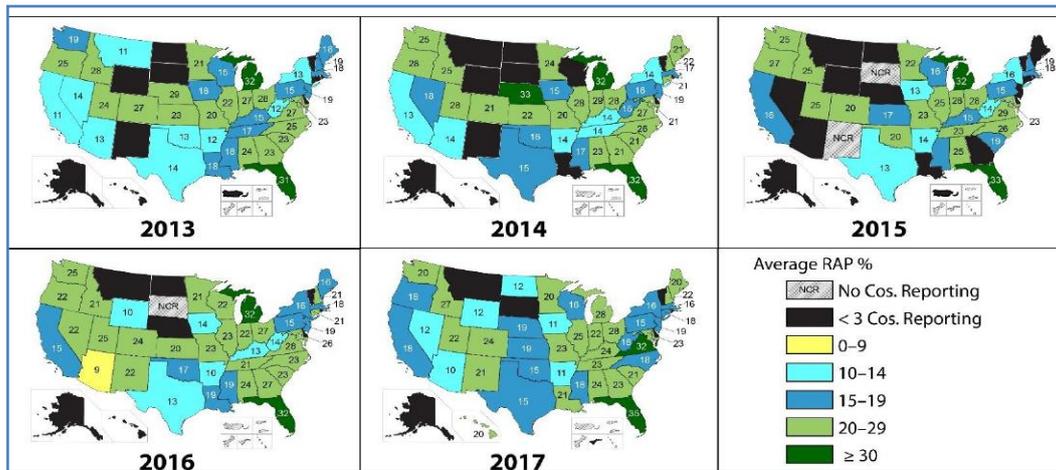
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
	67.2	73.5	79.1	71.3	76.1	75.8	78.0	81.8	79.9
Έγινε Αποδεκτό	0.1	0.0	0.3	0.2	0.1	0.2	1.0	0.1	0.0
Άλλη Χρήση	0.7	0.8	0.7	0.2	1.5	0.6	1.6	0.4	0.2
Χρήση σε coldMix	1.5	1.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
Χρήση ως Αδρανές	6.2	7.3	4.9	3.6	4.0	8.5	5.5	3.7	3.4
Χρήση ως HMA/WMA	56.0	62.1	66.7	68.3	67.8	71.9	74.2	76.9	76.2

Στον Πίνακα3 και στο Διάγραμμα1 φαίνεται το μέσο ποσοστό χρήσης του RAP ανά Πολιτεία των Ηνωμένων Πολιτειών για τα έτη 2013-2017.

Πίνακας 3. Μέσο ποσοστό χρήσης RAP ανά Πολιτεία των ΗΠΑ

State	Average RAP Percent					State	Average RAP Percent				
	2013	2014	2015	2016	2017		2013	2014	2015	2016	2017
Alabama	24%	24%	25%	24%	24%	Montana	11%	*	*	*	*
Alaska	*	*	*	*	*	Nebraska	29%	33%	*	*	19%
American	NCR	NCR	NCR	NCR	*	Nevada	14%	18%	*	22%	12%

Arizona	13%	14%	*	9%	10%	NewHampshire	19%	22%	19%	21%	22%
Arkansas	12%	14%	14%	10%	11%	NewJersey	19%	19%	*	19%	19%
California	11%	13%	16%	15%	18%	NewMexico	*	*	NCR	22%	21%
Colorado	27%	21%	20%	24%	24%	NewYork	13%	14%	16%	16%	16%
Connecticut	*	21%	*	21%	18%	North Carolina	25%	26%	26%	23%	18%
Delaware	*	*	*	*	*	North Dakota	*	*	*	*	12%
Dist. of	*	NCR	NCR	NCR	*	Ohio	28%	28%	28%	27%	28%
Florida	31%	32%	33%	32%	35%	Oklahoma	13%	16%	20%	17%	15%
Georgia	23%	21%	*	27%	23%	Oregon	25%	28%	27%	22%	18%
Hawaii	*	*	*	*	20%	Pennsylvania	15%	16%	15%	15%	15%
Idaho	28%	25%	25%	21%	27%	PuertoRico	*	NCR	*	NCR	NCR
Illinois	22%	28%	25%	23%	22%	RhodeIsland	*	*	*	*	*
Indiana	27%	29%	28%	22%	11%	SouthCarolina	23%	21%	19%	23%	21%
Iowa	18%	15%	13%	14%	19%	SouthDakota	*	*	NCR	*	*
Kansas	23%	22%	17%	20%	24%	Tennessee	17%	14%	23%	21%	23%
Kentucky	15%	14%	15%	13%	21%	Texas	14%	15%	13%	13%	15%
Louisiana	18%	*	*	19%	20%	Utah	24%	28%	25%	25%	22%
Maine	18%	21%	*	16%	23%	Vermont	*	*	*	*	*
Maryland	23%	21%	23%	26%	16%	Virginia	27%	27%	29%	28%	32%
Massachusetts	18%	17%	18%	18%	28%	Washington	19%	25%	25%	25%	20%
Michigan	32%	32%	32%	32%	20%	WestVirginia	12%	15%	14%	14%	18%
Minnesota	21%	24%	22%	21%	18%	Wisconsin	15%	*	16%	22%	16%
Mississippi	18%	17%	17%	19%	23%	Wyoming	*	*	*	10%	12%
Missouri	20%	20%	23%	23%	23%						
No Companies Reporting	< 3 Companies Reporting		0-9%	10-14%	15-19%	20-29%	≥30				



Διάγραμμα 1. Ποσοστά Χρήσης RAP ανά Πολιτεία (έτη 2013-2017)

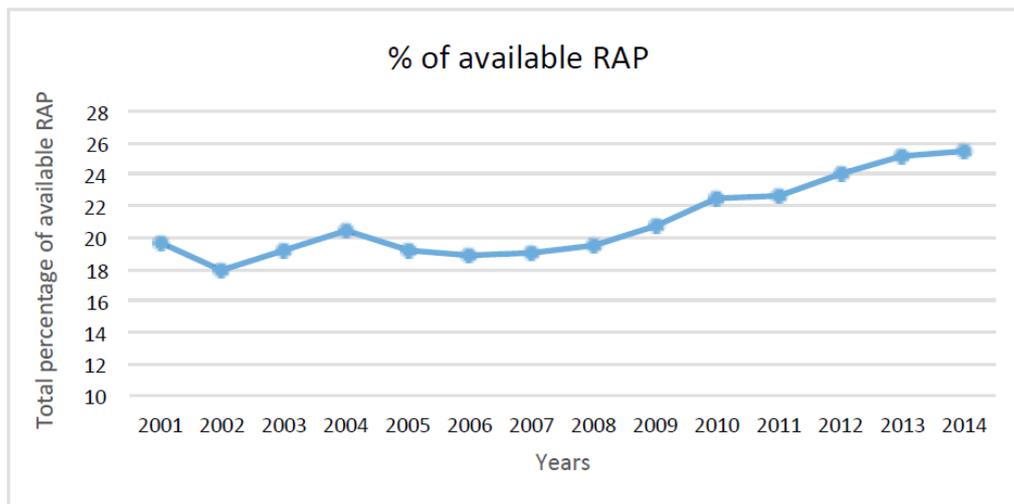
Στον Πίνακα 4 φαίνονται ανά χώρα για το έτος 2017 οι παραχθείσες ποσότητες RAP και οι χρήσεις της.

Πίνακας 4. Παραχθείσες ποσότητες και χρήσεις RAP ανά χώρα για το έτος 2017

Country	All available Reclaimed Asphalt in 2017 in tonnes	% of available reclaimed asphalt used in					
		Hot and Warm Mix Asphalt Production	Half Warm Mix Asphalt Production	Cold Recycl ing**	Unbound Road Layers	Other Civil Engineering Applications	Put to Landfill/ Other Applications/

								Unknown
Austria	1.650.000	60	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata
Belgium	1.000	95	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata
Check Republic	2.000.600	14	0	30	20	10		26
Denmark	1.165.000	66	0	0	8	0		26
Finland	1.200.000	100	0	0	0	0		0
France	6.400.000	70	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata
Germany	13.000.000	84	0	0	16	0		0
Great Britain	3.400.000		90		0	0		0
Hungary	120.000	95	0	0	0	4		1
Italy	9.000.000	23	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata	Nodata
Netherlands	4.500.000	71	0	11	0	0		18
Norway	1.101.000	30	0	1	69	0		0
Slovakia	50.000	96	0	2	1	1		0
Slovenia	84.000	24	0	6	10	0		60
Spain	494.000	83	0	0	14	0		3
Turkey	2.570.589	9	0	6	85	0		0
USA	72.500.000	96	0	0	4	0		0

Στο Διάγραμμα 2 φαίνεται το μέσο ολικό ποσό διαθέσιμου RAP στην Ευρώπη από το 2001 έως το 2014.



Διάγραμμα 2. Μέσο Ολικό Διαθέσιμο RAP στην Ευρώπη

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται από τα έτη 2007-2014 τα ποσοστά επανάχρησης του RAP για τις Ευρωπαϊκές χώρες με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στη χρήση RAP.

Πίνακας 5. Ποσοστά επανάχρησης RAP στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Year/ Country	Denmark	France	Germany	Italy	Netherlands	Norway	Spain	Sweden	Switzerland
2007	100	15	100	20	100	88	100	100	100
2008	100	65	100	0	83,5	84	110	100	100
2009	100	41	100	20	74	82	100	100	100
2010	100	40	100	20	75	100	100	100	100
2011	100	45	100	20	98	80	100	95	98
2012	100	62	100	20	95	86,9	83	95	97
2013	100	64	100	20	76	31	100	100	88
2014	65	64	100	20	85	70	100	100	98

5.ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

Σημειώνεται εδώ ότι οι πρώτες προσπάθειες για την ανακύκλωση των ασφαλτικών στρώσεων ξεκίνησαν το 2011 στη Θεσσαλονίκη με τη μορφή της Θερμής Ανακύκλωσης. Σταδιακά αναπτύχθηκαν και μονάδες οι οποίες πραγματοποιούν ψυχρή ανακύκλωση και αυτή τη στιγμή είναι η πλειονότητα στη χώρα. Σημαντικό ποσοστό Ασφαλτικών Παρασκευαστηρίων χρησιμοποιούν συστηματικά την ψυχρή ανακύκλωση την τελευταία διετία. Αναφέρεται επίσης ότι δεν υπάρχουν επίσημα στοιχεία από τη χρήση των ανακυκλωμένων ασφαλτικών.

6.ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΜΕ RAP [EME-BBME]

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω η χρήση RAP ,σε συγκεκριμένα ποσοστά και ανάλογα με το βαθμό οξειδωσής του, αυξάνει το Μέτρο Δυσκαμψίας του ασφαλτικού σκυροδέματος και την αντίστασή του σε τροχοαλάκωση και η χρήση του πρέπει να γίνεται πάντα σε συνάρτηση με την αντοχή του ασφαλτικού σκυροδέματος σε κόπωση.

Αν και η Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή για τις Ασφαλτικές Στρώσεις Κλειστού τύπου προβλέπει μέγιστο ποσοστό ανακυκλωμένου ασφαλτικού σκυροδέματος 20% σε εργαστηριακό επίπεδο ελέγχθηκαν τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος συγκριτικά σε:

- ΑΣ12,5 με άσφαλο 50/70 και ασβεστολιθικά αδρανή
- ΑΣ12,5 με άσφαλο 50/70 και προσθήκη ορυκτής ασφάλτου και ασβεστολιθικά αδρανή
- ΑΣ12,5 με άσφαλο 50/70 και ασβεστολιθικά αδρανή και προσθήκη RAP 30%

Τα συμβατικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων φαίνονται στον Πίνακα 6.

Σύνθεση	Κενά (%)	VMA (%)	VFA (%)	Ευστάθεια (kN)	Παραμόρφωση (mm)
ΑΣ12,5	4,1	14,1	70,7	8,50	2,8
ΑΣ12,5 με ορυκτή άσφαλο	3,8	14,5	73,8	9,49	2,9
ΑΣ12,5 με 30%	4,0	14,1	72,1	12,81	2,7

Τα αποτελέσματα Μέτρου Δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων στους 20⁰C και Τροχοαλάκωσης φαίνονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7. Μέτρο δυσκαμψίας και τροχοαυλάκωση ασφαλτομιγμάτων

Σύνθεση	Μέτρο Δυσκαμψίας Smix(MPa)	Τροχοαυλάκωση	
		Ρυθμός Τροχοαυλάκωσης (μm ανά κύκλο φόρτισης)	Βάθος τροχοαυλάκωσης (mm)
ΑΣ12,5	4133	1,35	3,76
ΑΣ12,5 με ορυκτή άσφαλτο	5205	1,26	3,45
ΑΣ12,5 με 30%	8981	1,38	3,23

Είναι προφανές ότι με τη χρήση RAP το ασφαλτικό σκυρόδεμα είναι δυσκαμπτότερο και συνεπώς ανθεκτικότερο στην τροχοαυλάκωση. Σημειώνεται εδώ ότι η συμπεριφορά του μείγματος με ανακυκλωμένο ασφαλτόμιγμα θα πρέπει επίσης να ελεγχθεί ως προς το χαρακτηριστικό της κόπωσης.

7. ΧΡΗΣΗ REJUVENATORS

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τόσο σε πρώιμο όσο και ύστερο επίπεδο παραγωγής ασφαλτικού σκυροδέματος συμβαίνει οξείδωση της ασφάλτου με σημαντικότερα χαρακτηριστικά την μείωση της διείσδυσης, την αύξηση της μάλθωσης και την αύξηση του ιξώδους της ασφάλτου.

Το RAP περιέχει οξειδωμένη άσφαλτο και προκειμένου να φτάσει τα χαρακτηριστικά της παρθένας 50/70 είτε γίνεται ανάμειξη με παρθένα άσφαλτο είτε γίνεται χρήση αναζωογονητών. Ο υπολογισμός της προσθήκης του ποσοστού της παρθένας ασφάλτου γίνεται με την μέθοδο που περιγράφεται στην ΕΤΕΠ ΤΟ 1501-05-03-11-04.

Εναλλακτικά η προσθήκη αναζωογονητών (rejuvenators) έχει μια σειρά από ευεργετικές επιδράσεις τόσο στην άσφαλτο όσο και στο ασφαλτόμιγμα. Η διείσδυση και το ιξώδες αυξάνονται και η μάλθωση μειώνεται. Οι αναζωογονητές, στην μοντέρνα εκδοχή τους, περιέχουν διαφορετικά χημικά πρόσθετα καθένα εκ των οποίων λειτουργεί διαφορετικά σε σχέση με την άσφαλτο. Λειτουργούν ως αντιοξειδωτικά, πλαστικοποιητές, αναζωογονητές και διασπορείς.

Μπορούν να τοποθετηθούν τόσο στο καζάνι αποθήκευσης της ασφάλτου όσο και στο mixer του ασφαλτικού σκυροδέματος με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά του ασφαλτικού σκυροδέματος που περιέχει μεγάλα ποσοστά RAP να είναι εφάμιλλα με τα χαρακτηριστικά του ασφαλτικού σκυροδέματος που παράγεται με παρθένα άσφαλτο.

Σημειώνεται εδώ ότι με την χρήση αναζωογονητών τελευταίας τεχνολογίας έχουν αναφερθεί επιτυχημένες εφαρμογές με χρήση RAP σε ποσοστό 100%.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Την τελευταία δεκαετία τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική γίνεται συστηματική επανάχρηση του Ανακυκλούμενου Ασφαλτικού με βασική χρήση του στο Ασφαλτικό Σκυρόδεμα. Τα οφέλη είναι τόσο οικονομικά και περιβαλλοντικά αλλά και από πλευράς επίδοσης του υλικού. Για την ορθή διαχείριση του RAP πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένες πρακτικές.

Υπάρχει παγκοσμίως αυξητική τάση της χρήσης του ποσοστού RAP στις ασφαλτικές στρώσεις, πλην όμως αυτό πρέπει να καθορίζεται από τις εκάστοτε εθνικές προδιαγραφές και εργαστηριακούς ελέγχους. Με τη χρήση της χημικής τεχνολογίας είναι πλέον εφικτή η ανακύκλωση ασφαλτικών στρώσεων σε ποσοστό 100%, γεγονός όμως το οποίο δεν αποτελεί αυτοσκοπό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΕΛΟΤ ΤΟ 1501-05-03-11-04 Ασφαλικές Στρώσεις Κλειστού Τύπου
- Α. Νικολαΐδης ,Οδοποιία Οδοστρώματα-Υλικά Έλεγχος Ποιότητας
- NAPA National Asphalt Pavement Association,Quality Improvement Series 129,Best Practices for RAP and RAS Management
- NAPA National Asphalt Pavement Association,Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage ,2017 (8th Annual Survey)
- EAPA European Asphalt Pavement Association,Asphalt Figures 2017
- M. Zaumanis 2016 ,100% Hot Mix Asphalt Recycling:Challenges and Benefits
- J. Oliveira 2013,Pushing the Asphalt Technology to the limit
- S. Saeed 2019,Characterization of Recovered Bitumen from Coarse and Fine Reclaimed Asphalt Pavement Particles
- A.Mirhosseini 2019,Performance evaluation of asphalt mixtures containing high RAP binder content and bio-oil rejuvenator
- X. Chen 2018,Life Cycle Assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect

Πειραματική διερεύνηση εισαγωγής αδρανών από ανακύκλωση πλαστικών υλικών σε βάσεις οδοστρωμάτων

Εφραιμίδης Αγησίλαος-Ιωάννης, Μουρατίδης Αναστάσιος

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ., Εργαστήριο Δομικών Υλικών

Λέξεις κλειδιά : Ανακύκλωση Πλαστικών, Πλαστικά Οδοστρώματα, Μηχανικές Αντοχές

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια εισαγωγής των ανακυκλωμένων πλαστικών στην κατασκευή των οδοστρωμάτων. Ειδικότερα, ελέγχθηκαν οι μηχανικές αντοχές (αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη και αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό), ενός σύνθετου υλικού το οποίο αποτελείται από αδρανή υλικά, που προέρχονται εξ'ολοκλήρου από ανακυκλωμένο πλαστικό υλικό Pet (πολυεστέρα), και εποξειδική ρητίνη. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν εργαστηριακά το φαινόμενο ειδικό βάρος, η υγρασία αλλά και το πορώδες των συγκεκριμένων αδρανών. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το εργαστήριο έγινε μια προσπάθεια ένταξης του σύνθετου αυτού υλικού στις στρώσεις ενός ημιάκαμπτου οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η χρήση του υλικού στην κατασκευή μιας σταθεροποιημένης βάσης ενός ημιάκαμπτου οδοστρώματος. Έπειτα, γίνεται μια προσπάθεια οικονομοτεχνικής σύγκρισης του υλικού αυτού με το αντίστοιχο υλικό το οποίο χρησιμοποιείται, ως σταθεροποιημένη βάση στην συμβατική οδοποιία, δηλαδή το Κατεργασμένο (με τσιμέντο) Θραυστό Αμμοχάλικο. Οι αντοχές των δύο υλικών προέκυψαν παρόμοιες κάτι που ενθαρρύνει τη χρήση του υλικού. Προβληματισμός δημιουργείται από το ζήτημα του κόστους του υλικού.

Experimental investigation of the use of recycled plastics aggregates into pavement bases

Mouratidis Anastasios, Efraimidis Agisilaos-Ioannis

School of Civil Engineering, Faculty of Engineering AUTH, Laboratory of Building Materials

Keywords :Plastic Recycling, Plastics Pavements, Mechanical Strength

ABSTRACT :In the present work, an attempt was made to introduce recycled plastics into the pavement construction. In particular, the mechanical strengths (unadjusted compressive strength and indirect tensile strength) of a composite consisting of aggregates made entirely of recycled Pet (polyester) plastic and epoxy resin were tested. In addition, the effect of bulk density, humidity and porosity of the specific plastic aggregates were determined in the laboratory. Based on the results obtained by the laboratory, an attempt was made to integrate this composite into the layers of a semi-rigid pavement. In particular, it is suggested to use the material in the construction of a stabilized base of a semi-rigid pavement. Then an economical attempt is made to compare this material with the corresponding material used as a stabilized base in conventional road construction, named "Cement stabilized base from crushed gravel". The strengths of the two materials have resulted in something similar, which encourages the use of the material. Concerns arise from the issue of the cost of the material.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τρία χαρακτηριστικά των πλαστικών υλικών, το σχετικά χαμηλό κόστος και ειδικό βάρος (ελαφριά υλικά), αλλά και οι σχετικά υψηλές μηχανικές ιδιότητες, τα έκαναν πολύ δημοφιλή τόσο στους χρήστες όσο και στη βιομηχανία. Έτσι, τα τελευταία χρόνια υπήρξε μια ραγδαία αύξηση της παραγωγής του πλαστικού. Συγκεκριμένα, το 1950 παρήχθησαν παγκοσμίως 1,5 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών, ενώ το 2015 η αντίστοιχη ποσότητα ήταν 322 εκατομμύρια τόνοι^[1]. Η ραγδαία αυτή αύξηση δημιούργησε ως επακόλουθο τεράστια προβλήματα σχετικά με την διαχείριση όλων αυτών των πλαστικών αποβλήτων μετά τον πρώτο κύκλο ζωής τους. Τα προβλήματα αυτά σχετίζονται σχεδόν αποκλειστικά με το περιβάλλον. Η καταστροφική δράση των πλαστικών αποβλήτων είναι γνωστή, η κατάσταση όμως πλέον φαίνεται να είναι οριακή και επικίνδυνη. Ενδεικτικά αναφέρεται πως παγκοσμίως, 400 εκατομμύρια τόνοι CO₂/έτος εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από την παραγωγή και την καύση του πλαστικού^[1], το 85% των απορριμμάτων στις παραλίες είναι πλαστικά, ενώ το πλαστικό, λόγω της περίπλοκης χημικής του σύστασης, χρειάζεται 5-6 αιώνες έως ότου αποσυντεθεί εντελώς.

Η μόνη βιώσιμη λύση σε αυτό το τεράστιο πρόβλημα είναι η ανακύκλωση. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση ανακυκλώνεται μόνο το 30% των πλαστικών απορριμμάτων ενώ στόχος είναι το ποσοστό αυτό να φτάσει το 50% και 55% το έτος 2025 και 2030 αντίστοιχα^[2]. Οι στόχοι φαίνεται να έχουν τεθεί με αποφασιστικότητα, και η μη τήρησή τους από τα μέλη της, να τιμωρείται με πρόστιμα και ρήτρες. Έτσι και στην Ελλάδα, όπου το ποσοστό των πλαστικών αποβλήτων που ανακυκλώνεται είναι μόλις το 18%, θα πρέπει να σημειωθεί σημαντική πρόοδος στον τομέα της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης των υλικών αυτών.

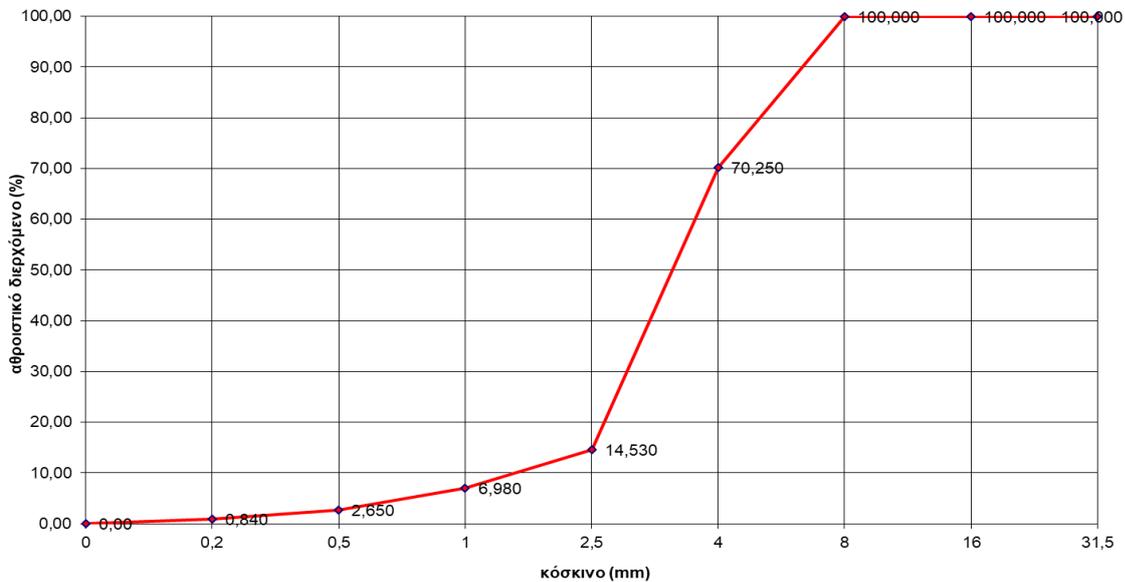
Τα παραπάνω στοιχεία είναι πολύ σημαντικά για την συνέχεια της εργασίας αφού αναδεικνύουν την επιτακτική πλέον ανάγκη για ανακύκλωση μεγαλύτερων ποσοτήτων πλαστικού και αλλά και για δημιουργία περισσότερων και μεγαλύτερων μονάδων ανακύκλωσης πλαστικών στη χώρα μας.

2.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η ιδέα της χρήσης των ανακυκλωμένων πλαστικών στην οδοποιία έχει εφαρμοστεί στο παρελθόν και μάλιστα με σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η χρήση όμως αυτή έχει περιοριστεί στην συμμετοχή του ανακυκλωμένου υλικού, είτε ως τροποποιητής της ασφάλτου, είτε ως αντικατάστατο μέρους της ασφάλτου ή των αδρανών υλικών. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια πιο τολμηρή προσέγγιση, αφού μελετάται η περίπτωση μιας στρώσης αποτελούμενης εξ'ολοκλήρου από ένα σύνθετο υλικό με βάση το ανακυκλωμένο πλαστικό.

2.1.Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν «Άμμος» από πλαστικό

Η «άμμος» από πλαστικό είναι ένα παραπροϊόν της διαδικασίας της ανακύκλωσης των πλαστικών. Παράγεται από ένα μηχάνημα πλύσης και τεμαχισμού των πλαστικών απορριμμάτων προς ανακύκλωση, το οποίο βρίσκεται στην αρχική φάση της διαδικασίας. Αποτελείται κατά 70%-80% από πλαστικό Pet (πολυεστέρα) και κατά 20%-30% από χαρτί και κοινή άμμο. Εξέρχεται από το μηχάνημα από πλάγια έξοδο, αφού δεν ακολουθεί την κανονική πορεία του υλικού προς ανακύκλωση. Εξέρχεται με αρκετή υγρασία και αφήνεται να ξηραθεί με φυσικό τρόπο. Η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού αυτού μετά την απομάκρυνση της υγρασίας φαίνεται στο Διάγραμμα 1. Η «άμμος» για την συνέχεια της μελέτης ορίζεται ως Κλάσμα 1.



Διάγραμμα 1:Κοκκομετρική καμπύλη Κλάσματος 1

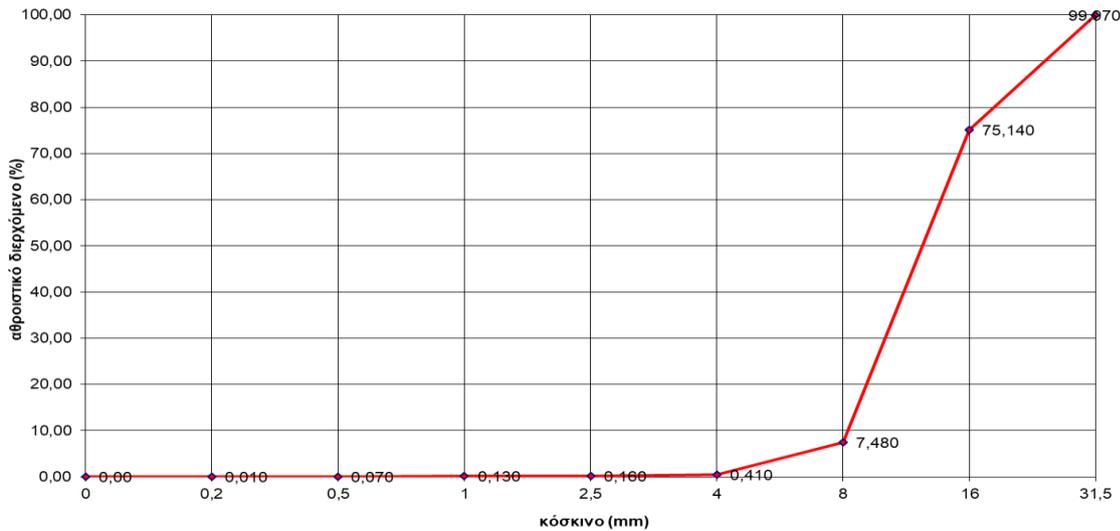


Εικόνα 4: «Κόκκαλο» μετά την θραύση του

2.2.Ανακυκλωμένο πλαστικό PET («κόκκαλο»)

Αφού το πλαστικό προχωρήσει στη διαδικασία της ανακύκλωσης καθαρίζεται αυστηρά με διαδικασίες όπως η επίπλευση, η τριβή και η ανάμειξη με χημικές ουσίες. Όταν πλέον είναι καθαρό, τεμαχίζεται σε μικρά κομμάτια και θρυμματίζεται. Το τρίμμα αυτό εισέρχεται σε ένα μηχάνημα (extruder) ώστε να λιώσει, να ρευστοποιηθεί και στη συνέχεια να τοποθετηθεί σε καλούπια. Εκεί παίρνει μια νέα μορφή αφού κρυώσει και σταθεροποιηθεί. Κατά την έναρξη και την λήξη της λειτουργίας του μηχανήματος καθημερινά, αλλά και σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση κατά την οποία απαιτείται η διακοπή λειτουργίας του μηχανήματος (π.χ. συντήρηση, αλλαγή λαδιών κλπ.), το μηχάνημα “αδειάζει”

αυτόματα το υλικό που βρίσκεται εκείνη τη στιγμή μέσα του. Αυτό δεν γίνεται με βάση την κανονική πορεία του υλικού, αλλά από πλάγιες εξόδους. Το υλικό που βγαίνει, κρυώνει και σταθεροποιείται σε τυχαία μορφή και σχήμα. Αυτό το υλικό εφόσον σπάσει σε σπαστήρα αποτελεί το λεγόμενο «κόκκαλο». Έτσι η τελική σύσταση του «κόκκαλου» εξαρτάται από το υλικό που εισέρχεται στο μηχάνημα. Εφόσον το υλικό προς ανακύκλωση αποτελείται από 100% πλαστικό PET και το «κόκκαλο» που προκύπτει είναι της ίδιας σύστασης. Στην Εικόνα 1 φαίνεται το υλικό με την μορφή που αποθηκεύεται και διατίθεται. Το «κόκκαλο» με τη μορφή αυτή ορίζεται ως Κλάσμα 5, ενώ η κοκκομετρική του καμπύλη παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2: Κοκκομετρική καμπύλη Κλάσματος 5

Για το υλικό αυτό μετρήθηκε εργαστηριακά, σύμφωνα με τη μέθοδο “RILEM CPC 11.3 in water under vacuum ‘1986 (open porosity)’”, το πορώδες του, το οποίο βρέθηκε ίσο με **porosity = 4,11%**, αρκετά μικρότερο από αυτό των ασβεστολιθικών και ψαμμιτικών αδρανών που κυμαίνεται από 10%-40%^[3]. Επιπλέον μετρήθηκε, σύμφωνα με την προδιαγραφή “ASTM Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate”, το φαινόμενο ειδικό βάρος του, ίσο με **bulk density = 1,273 gr/cm³**, δηλαδή σχεδόν το μισό από αυτό των ασβεστολιθικών αδρανών, το οποίο είναι περίπου 2,65 gr/cm³^[3]. Αυτή είναι και η αιτία που το υλικό είναι ιδιαίτερα ελαφρύ. Τέλος, εργαστηριακά μετρήθηκε και η υγρασία του «κόκκαλου» η οποία προέκυψε ίση με **Y = 2.18%**.

2.3. Συνδετικό υλικό (εποξειδική ρητίνη)

Ως συνδετικό υλικό, χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική ρητίνη. Το συγκεκριμένο υλικό, αποτελείται από δύο συστατικά, ειδική ρητίνη και σκληρυντή. Μετά την ανάμειξη των δύο συστατικών, με μηχανικό τρόπο, το τελικό προϊόν είναι έτοιμο για χρήση μετά από 15-30 λεπτά, ενώ παραμένει εργάσιμο για άλλα 15-30 λεπτά περίπου, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

2.4. Δημιουργία δοκιμίων

Η διαδικασία παρασκευής του σύνθετου υλικού και της δημιουργίας των δοκιμίων είναι απλή. Αφού προετοιμαστεί η ρητίνη με τον τρόπο που αναφέρθηκε, και όσο είναι ακόμα εργάσιμη, αναμειγνύεται, με μηχανικό τρόπο, με τα πλαστικά αδρανή στην κατάλληλη αναλογία, έτσι ώστε να καλύψει όλη την ειδική τους επιφάνεια. Το υλικό στα δοκίμια συμπακνώθηκε με τη βοήθεια δονητικής τράπεζας αλλά και μηχανικά. Στις Εικόνες 2 και 3 παρουσιάζονται ένα δοκίμιο θλίψης και ένα δοκίμιο εφελκυσμού αντίστοιχα, από το σύνθετο υλικό.

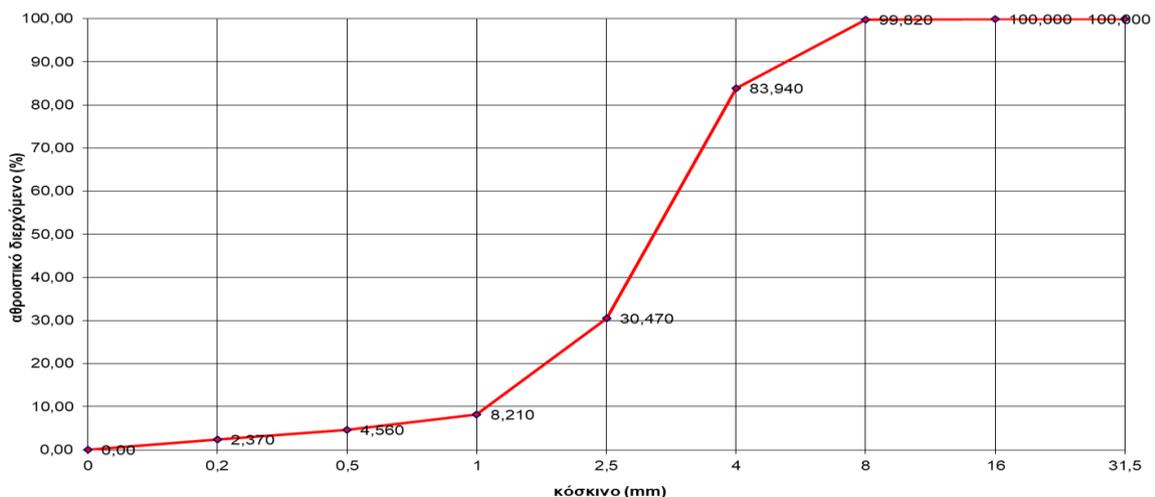


Εικόνα 5: Δοκίμιο

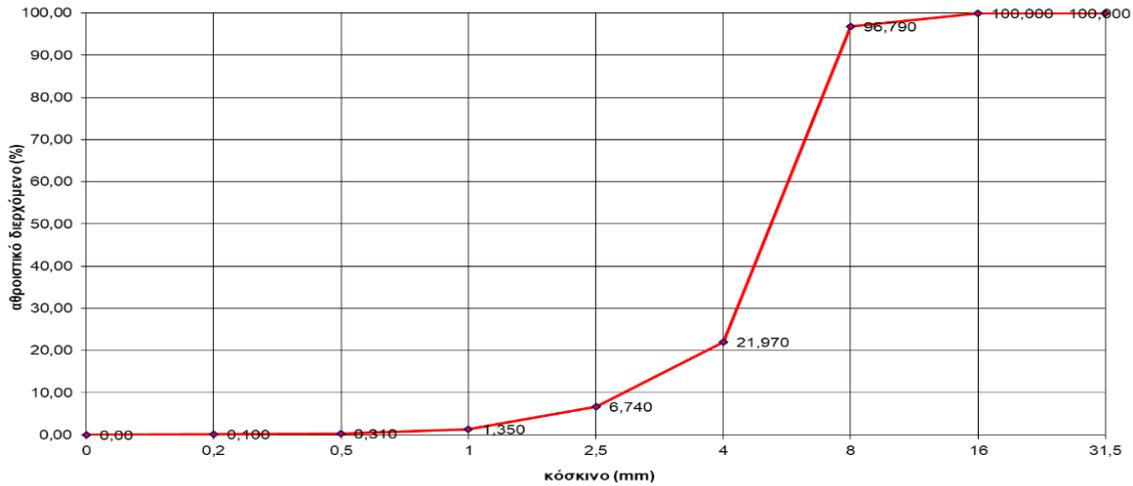


Εικόνα 3: Δοκίμιο

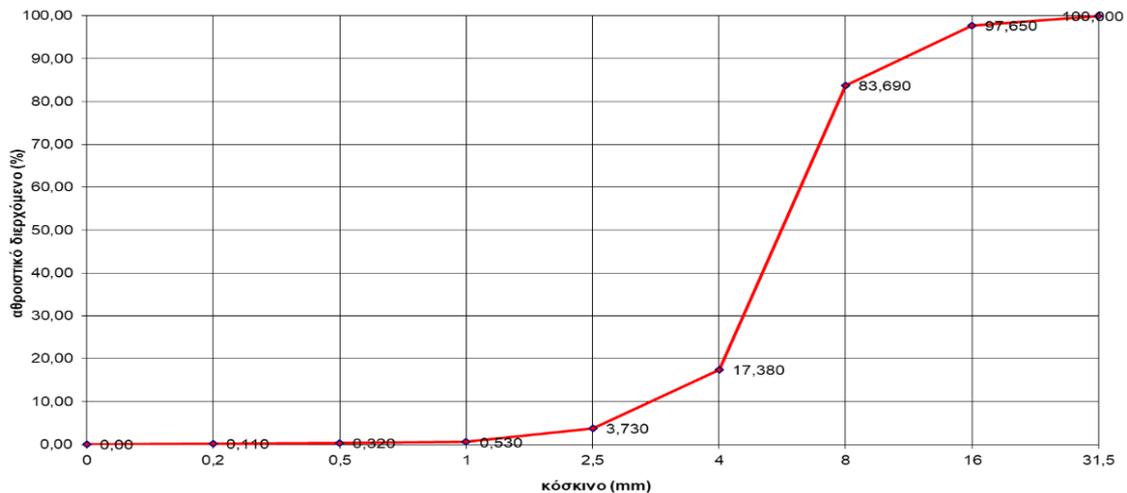
Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1, το Κλάσμα 5 είναι ένα αρκετά χονδρόκοκκο υλικό. Έτσι για να επιτευχθεί μια ικανοποιητική πυκνότητα στο τελικό υλικό, με τη βοήθεια σπαστήρα αδρανών υλικών αλλά και στρεφόμενου μύλου αλέσεως, από το Κλάσμα 5, δημιουργήθηκαν, τα Κλάσματα 2,3 και 4, τα οποία είναι πιο λεπτόκοκκα από το Κλάσμα 5. Οι κοκκομετρικές καμπύλες των Κλασμάτων αυτών φαίνονται στα παρακάτω Διαγράμματα.



Διάγραμμα 3: Κοκκομετρική καμπύλη Κλάσματος 2



Διάγραμμα 4: Κοκκομετρική καμπύλη Κλάσματος 3



Διάγραμμα 5: Κοκκομετρική καμπύλη Κλάσματος 4

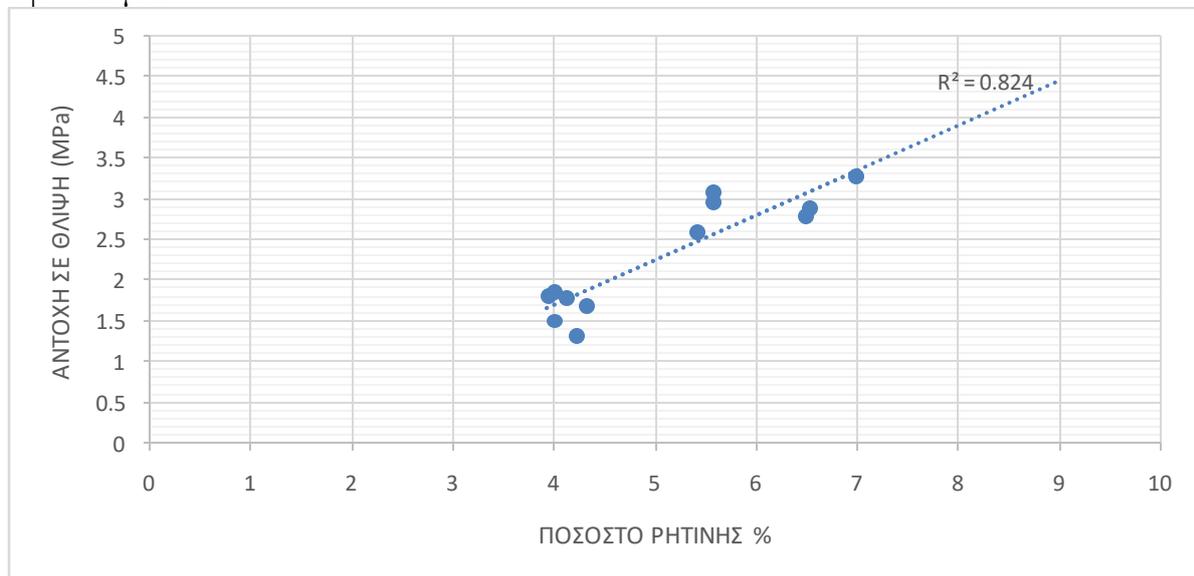
2.5. Προσδιορισμός μηχανικών αντοχών

Έτσι, με την συμμετοχή των Κλασμάτων αυτών, του Κλάσματος 1 («άμμος»), αλλά και της ρητίνης ως συνδετικό υλικό, σε διάφορες αναλογίες, διαμορφώθηκε μια σειρά από Συνθέσεις δοκιμίων ανεμπόδιστης θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού, ώστε να προσδιορισθούν οι αντίστοιχες αντοχές του σύνθετου αυτού υλικού. Τα χαρακτηριστικά αλλά και ο μέσος όρος των αντοχών των δοκιμίων των επιμέρους Συνθέσεων, φαίνονται στον Πίνακα 1. Για κάθε Σύνθεση, εκτός από την Σύνθεση 1, δημιουργήθηκαν τρία δοκίμια ανεμπόδιστης θλίψης και τρία δοκίμια έμμεσου εφελκυσμού. Στον Η Σύνθεση 1 αποτελείται μόνο από τρία δοκίμια ανεμπόδιστης θλίψης.

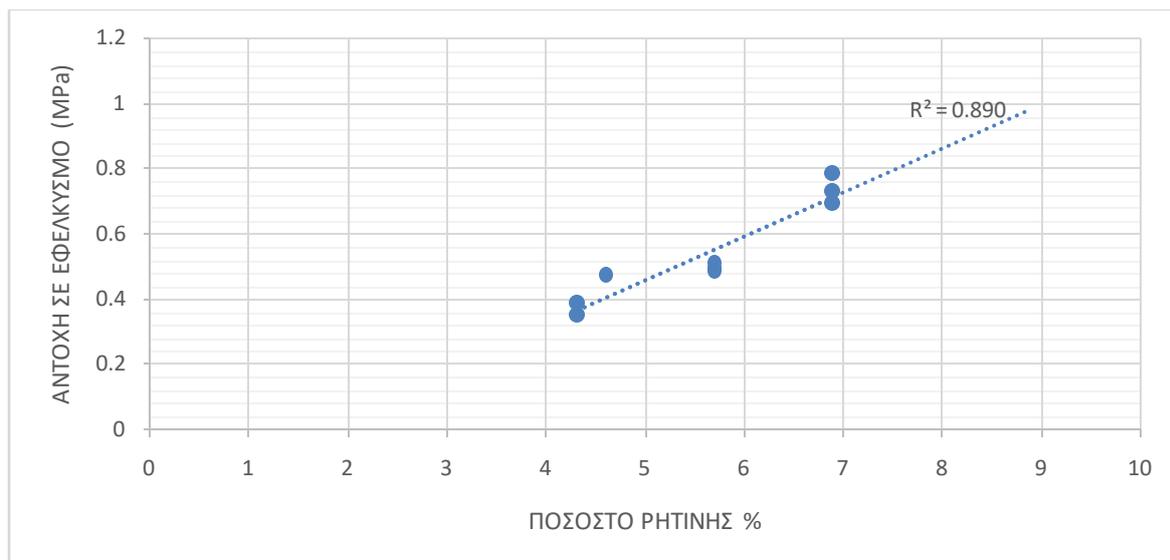
Πίνακας 1 Στοιχεία των δοκιμών των επιμέρους Συνθέσεων

	Σύνθεση 1	Σύνθεση 2	Σύνθεση 3	Σύνθεση 4	Σύνθεση 5
Κλάσμα 1 (ποσοστό % κατά βάρος)	0	0	0	23	0
Κλάσμα 2 (ποσοστό % κατά βάρος)	15	20	25	0	25
Κλάσμα 3 (ποσοστό % κατά βάρος)	50	50	40	42	40
Κλάσμα 4 (ποσοστό % κατά βάρος)	35	30	35	35	35
Μέσος όρος πυκνότητας των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (gr/cm ³)	0,85	0,77	0,88	0,82	0,86
Μέσος όρος ποσοστού % κατ'όγκο ρητίνης των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης	3,98	4,22	5,52	5,80	6,68
Μέσος όρος αντοχής των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης (MPa)	1,73	1,60	2,88	1,15	2,98
Μέσος όρος της πυκνότητας των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (gr/cm ³)	-	0,75	0,85	0,79	0,88
Μέσος όρος ποσοστού % κατ'όγκο ρητίνης των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού	-	4,4	5,7	5,7	6,9
Μέσος όρος αντοχής των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (MPa)	-	0,4	0,5	0,15	0,74

Με βάση τα παρατηρηθέντα αποτελέσματα και τις αντοχές των επιμέρους δοκιμών, προκύπτουν τα Διαγράμματα 3 και 4 τα οποία συσχετίζουν το ποσοστό συμμετοχής της ρητίνης κατ'όγκο στο σύνθετο υλικό, με την αντοχή του σε ανεμπόδιστη θλίψη και έμμεσο εφελκυσμό.



Διάγραμμα 6: Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη



Διάγραμμα 7: Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

Στα παραπάνω Διαγράμματα δεν συμμετέχουν τα δοκίμια της Σύνθεσης 4, αφού δημιουργήθηκαν με τη συμμετοχή της «άμμου» (Κλάσμα 1), η χρήση της οποίας κρίθηκε απαγορευτική στο μίγμα του υλικού, λόγω των ιδιαίτερα μειωμένων αντοχών που παρουσίασαν τα δοκίμια στα οποία συμμετείχε. Επιπλέον, από τα παραπάνω Διαγράμματα, για ποσοστό ρητίνης 7% κατ' όγκο του υλικού, λαμβάνονται οι τιμές αντοχής 3,35MPa και 0,72MPa σε ανεμπόδιστη θλίψη και έμμεσο εφελκυσμό αντίστοιχα.

3. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Οι παραπάνω αντοχές δεν θα μπορούσαν να συγκριθούν με αυτές του σκυροδέματος, που είναι ένα υλικό υψηλής αντοχής. Επίσης, το υλικό δεν προβλέπεται για χρήση σε κάποια επιφανειακή στρώση και γι' αυτό δεν θα μπορούσε να συγκριθεί με το ασφαλτόμιγμα του οποίου τις αντοχές πλησιάζει, αφού δεν έχουν ελεγχθεί απαραίτητα χαρακτηριστικά για μια επιφανειακή στρώση, όπως η αντοχή στην υγρασία, η διαπερατότητα, η μείωση παραγόμενου θορύβου από τα ελαστικά των οχημάτων και άλλα. Με βάση τις αντοχές του όμως θα μπορούσε να συγκριθεί με το Κατεργασμένο (με τσιμέντο) Θραυστό Αμμοχάλικο και επομένως προτείνεται η χρήση του για την κατασκευή μιας σταθεροποιημένης βάσης ενός ημιάκαμπτου οδοστρώματος. Οι αντοχές του Κ.Θ.Α. για ποσοστό τσιμέντου 4% είναι περίπου 4,5MPa και 0,74MPa σε ανεμπόδιστη θλίψη και έμμεσο εφελκυσμό αντίστοιχα^[4].

Ο μηχανισμός αστοχίας μιας πλάκας-βάσης από ένα παχύ υλικό σαν τα παραπάνω, είναι η ρηγματώση του κάτω μέρους της πλάκας λόγω εφελκυστικών τάσεων. Εφόσον τα δύο υλικά έχουν την ίδια σχεδόν αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, η διαστασιολόγηση μιας σταθεροποιημένης βάσης ενός ημιάκαμπτου οδοστρώματος θα οδηγούσε σε ένα πάχος βάσης κοινό και για τα δύο υλικά. Έτσι η οικονομική σύγκριση της σταθεροποιημένης βάσης από ανακυκλωμένο πλαστικό και της αντίστοιχης από Κ.Θ.Α., ανάγεται στη σύγκριση του κόστους των υλικών για την κατασκευή ενός συμπυκνωμένου m³ για τις δύο περιπτώσεις.

Πίνακας 2:Απαιτούμενες ποσότητες υλικών

	Ανακυκλωμένο πλαστικό	Κ.Θ.Α.
Πυκνότητα συμπυκνωμένου υλικού (kg/m ³)	900	2290 ^[5]
Ποσοστό συνδετικού υλικού (%)	7	4
Ποσότητα συνδετικού υλικού(kg/m ³)	77	91,6
Ποσότητα αδρανών (kg/m ³)	823	2198,4

Πίνακας 3:Οικονομικά στοιχεία σχετικά με την σύγκριση των δύο υλικών

	Τιμή προμήθειας (€/kg)	Απαιτούμενη ποσότητα υλικού για ένα m ³ (kg/m ³)	Κόστος κατασκευής (€/m ³)
Εποξειδική ρητίνη	1	77	77
Πλαστικό “κόκκαλο”	0,04	823	32,92
Σταθεροποιημένη βάση/ υπόβαση από ανακυκλωμένο πλαστικό	-	-	109,92
Τσιμέντο για Κ.Θ.Α.	0,16	91,6	14,66
Αδρανή για Κ.Θ.Α.	0,013	2198,4	28,58
Σταθεροποιημένη βάση/υπόβαση από Κ.Θ.Α.	-	-	43,24

Από τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει πως το κόστος μιας στρώσης από το σύνθετο αυτό υλικό από ανακυκλωμένο πλαστικό είναι 2,54 περίπου φορές αυξημένο σε σχέση με αυτό μιας αντίστοιχης συμβατικής βάσης από Κ.Θ.Α. Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του κόστους των δύο υλικών είναι αυτές που ισχύουν στην ελληνική αγορά, στην οποία ταθραυστά αδρανή προμηθεύονται με αρκετά χαμηλό κόστος λόγω της αφθονίας τους, ενώ το «κόκκαλο» είναι ένα υλικό με αυξημένο κόστος για τον ακριβώς αντίθετο λόγο, δηλαδή την έλλειψη μεγάλων ποσοτήτων από το συγκεκριμένο υλικό. Έτσι, σε άλλες χώρες, ακόμα και μέσα στα σύνορα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι τιμές αυτές ενδέχεται να είναι εντελώς διαφορετικές. Για παράδειγμα, σε χώρες όπου υπάρχει έλλειψη φυσικών αδρανών (Ολλανδία), η τιμή τους αναμένεται σημαντικά αυξημένη. Αντίθετα, σε χώρες όπου η ανακύκλωση των πλαστικών βρίσκεται σε ένα αρκετά πιο ώριμο στάδιο (Λιθουανία) τα προϊόντα και παραπροϊόντα της ανακύκλωσης αναμένεται να έχουν μία αρκετά μειωμένη και ανταγωνιστική τιμή. Σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό ισχύει βέβαια αυτό σε χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία, οι οποίες είναι πρωτοπόρες σε ό,τι αφορά την ανακύκλωση πλαστικών απορριμμάτων. Έτσι η αξία της παρούσας έρευνας αλλάζει σημαντικά σε σχέση με την χώρα στην οποία αναφέρεται.

Εκτός από την απόκλιση αυτή στο κόστος, ένα ακόμα ζήτημα που προκύπτει από την έλλειψη αυτή είναι η αδυναμία κατασκευής μιας τέτοιας στρώσης σε μεγάλο μήκος. Για παράδειγμα για μια στρώση 20cm από το συγκεκριμένο υλικό, για την κατασκευή ενός χιλιομέτρου μιας

οδού πλάτους 8m η απαιτούμενη ποσότητα πλαστικών αδρανών είναι $0,2*8*1000*823 = 1317$ t. Στην Ελλάδα η εταιρεία από την οποία εξασφαλίστηκε το υλικό, είναι ίσως η μοναδική εταιρεία που παράγει το «κόκκαλο» σε αυτή τη μορφή και η παραγόμενη ποσότητα είναι 400t/ έτος. Αυτό σημαίνει πως εάν όλο το υλικό χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μιας τέτοιας οδού δεν επαρκεί ούτε για μισό χιλιόμετρο. Το υλικό αυτό βέβαια, είναι εμπορεύσιμο και παράγεται σε τεράστιες ποσότητες στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να γίνει αναφορά στα στοιχεία της εισαγωγής με βάση τα οποία, στη χώρα μας τα επόμενα χρόνια αναμένεται και επιβάλλεται η δημιουργία περισσότερων μονάδων ανακύκλωσης και η ανάκτηση μεγαλύτερων ποσοτήτων πλαστικών. Αυτό θα αμβλύνει άμεσα το πρόβλημα της έλλειψης του «κόκκαλου» και έμμεσα το πρόβλημα του αυξημένου κόστους του τελικού υλικού, αφού το «κόκκαλο» θα γίνει ένα πιο ανταγωνιστικό προϊόν και το κόστος προμήθειάς του θα μειωθεί.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το ανακυκλωμένο πλαστικό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη κατασκευή μιας σταθεροποιημένης βάσης, με τον τρόπο που αναλύθηκε στην παρούσα εργασία, αφού οι μηχανικές αντοχές ενός τέτοιου υλικού είναι ικανοποιητικές
- Σημαντικό όφελος που προκύπτει από τη χρήση ενός τέτοιου υλικού είναι η επαναχρησιμοποίηση των πλαστικών απορριμμάτων
- Κύριο ζήτημα, σχετικά με τη χρήση του υλικού στην Ελλάδα, αποτελεί το κόστος του υλικού το οποίο είναι 2,54 περίπου φορές αυξημένο σε σχέση με το Κ.Θ.Α.
- Σημαντικό ζήτημα αποτελεί επίσης η έλλειψη μεγάλων ποσοτήτων «κόκκαλου» από PET (πολυεστέρα), στην Ελλάδα
- Τα δύο κύρια αυτά προβλήματα επιλύονται σε μεγάλο βαθμό με την δημιουργία και λειτουργία περισσότερων μονάδων ανακύκλωσης, κάτι που σε κάθε περίπτωση επιβάλλεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τα επόμενα χρόνια στη χώρα μας
- Η αξία της έρευνας εξαρτάται από την χώρα στην οποία αναφέρεται, διότι το κόστος των υλικών ενδέχεται να διαφέρει σημαντικά από χώρα σε χώρα
- Ο προσδιορισμός περισσότερων ιδιοτήτων του σύνθετου αυτού υλικού, ίσως θα οδηγούσε σε μια ακόμα πιο αποτελεσματική χρήση του
- Η προσθήκη ινών στο μίγμα του υλικού είναι μια ενδιαφέρουσα πρόταση, για περαιτέρω διερεύνηση, ώστε να αυξηθούν οι αντοχές το, να μειωθεί το ποσοστό της ρητίνης καθώς και το τελικό κόστος

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <https://www.lawspot.gr/nomika-nea/plastika-apovlita-kai-anakyklosi-stin-eyropaiki-enosi-se-arithmoys-infographic>
2. Δελτίο τύπου του Συμβουλίου της ΕΕ, 22/05/2018
3. P. Kumar Mehta and Paulo J. M. Monteiro, 2006, Concrete: Structure, Properties and Materials
4. Mechanistic Design of Semi-Rigid Pavements - An Incremental Approach, Danish Road Institute, Report 138, 2004
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ ΘΡΑΥΣΤΟΥ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΣΤΗΝ ΒΑΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ, Ι.Χριστοδούλιας – Α.Παπακωνσταντίνου

Διερεύνηση της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών σε εύκαμπτα οδοστρώματα μέσω της αξιολόγησης του κύκλου ζωής

Ε. Αναστασίου, Ε. Μάνθος, Σ. Πότση

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 541 24

Λέξεις κλειδιά: ανακυκλωμένα αδρανή, εύκαμπτα οδοστρώματα, βιωσιμότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η χρήση ανακυκλωμένων υλικών στα οδοστρώματα μέσω της μεθόδου αξιολόγησης του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA), για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την εκτίμηση του αντίκτυπου του οδοστρώματος στο περιβάλλον και τη βιωσιμότητα. Επιπρόσθετα, αναλύθηκε η έννοια της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων, ο τρόπος με τον οποίο αυτή δύναται να εκτιμηθεί καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος και περιεγράφησαν τα στάδια από τα οποία αποτελείται ο κύκλος ζωής ενός οδοστρώματος. Ακολούθως, παρουσιάστηκε η ανακύκλωση των οδοστρωμάτων, η συνεισφορά της και τα οφέλη της ως προς τη βιωσιμότητα και τα ανακυκλωμένα υλικά κατασκευής που προκύπτουν από αυτή. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν συνοπτικά ορισμένα βασικά συμπεράσματα που έχουν προκύψει από προηγούμενες LCA μελέτες, στις οποίες ερευνήθηκε η χρήση των ανακυκλωμένων υλικών. Τέλος, διεξήχθη μελέτη αξιολόγησης του κύκλου ζωής ενός συμβατικού οδοστρώματος και δύο οδοστρωμάτων με διαφορετικούς τύπους ανακυκλωμένου υλικού στις στρώσεις βάσης/υπόβασης, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επιβάρυνση που προκαλούν τα τρία οδοστρώματα αλλά και να εκτιμηθεί το πόσο αυτή μπορεί να περιοριστεί από τη χρήση του ανακυκλώσιμου υλικού. Από την ανάλυση προέκυψε το συμπέρασμα πως είναι σημαντική η συνεισφορά της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών, στην προσπάθεια κατασκευής βιώσιμων οδοστρωμάτων, ενώ απαιτείται και περαιτέρω έρευνα για την ικανοποίηση του στόχου αυτού σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό.

Investigating the use of recycled materials on flexible pavements through the Life Cycle Assessment

E. Anastasiou, E. Manthos, S. Potsi

School of Civil Engineering, Engineering Faculty, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki 541 24

Keywords: recycled aggregates, flexible pavements, sustainability

ABSTRACT: This paper investigates the use of recycled materials in pavement infrastructure by using the Life Cycle Assessment (LCA) method for quantification of the pavements' environmental impacts with respect to sustainability. The LCA method, the steps and the structural elements that compose it are presented in detail. More specifically, this paper introduces and analyzes the concept of pavement sustainability and presents the pavement life cycle stages and the way pavement sustainability can be estimated. The sustainability of pavement recycling is also highlighted, presenting the benefits and the sustainable materials resulting from it. Moreover, it summarizes some key conclusions drawn from previous LCA studies investigating the use of recycled materials. Finally, a comparative LCA is carried out between a conventional pavement and two types of pavements using reclaimed materials coming from flexible and rigid pavements in the base/subbase layers. The

goal was to quantify the environmental impacts of the three types of pavements, and to assess whether those impacts can be limited by the use of the recycled materials. Results indicated that recycled materials can highly contribute to the construction of sustainable pavements but there is still need for further investigation in order to completely fulfil the goal of sustainability.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ζήτημα της βιώσιμης ανάπτυξης δεν αποτελεί καινούργιο θέμα, καθώς συχνά έχει συζητηθεί και εξεταστεί έμμεσα ή άμεσα στο παρελθόν. Ωστόσο, σε ό,τι αφορά τα οδοστρώματα, τα τελευταία χρόνια έχουν καταβληθεί μεγαλύτερες προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στη βιωσιμότητα, με σκοπό τη συστηματική ενσωμάτωσή τους στη διαδικασία λήψης των αποφάσεων με πιο οργανωμένο τρόπο (VanDam et al. 2015).

Ο κυριότερος ορισμός της βιώσιμης ανάπτυξης αναπτύχθηκε στη Γενική Συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών το 1987 ως εξής: «*Βιώσιμη ανάπτυξη είναι η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες της παρούσας γενιάς χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιούν τις δικές τους ανάγκες*» (WCED, Brundtland Commission). Η βιωσιμότητα περιγράφεται συχνά ως ένα «*τρίπτυχο*» με συνιστώσες τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές ανάγκες. Σε παγκόσμιο πλαίσιο, το 2015 εγκρίθηκε από την 70ή Γενική Συνέλευση του ΟΗΕ η Ατζέντα 2030 για τη βιώσιμη ανάπτυξη, η οποία αποτελεί δέσμευση για την εξάλειψη της φτώχειας και την επίτευξη της αειφόρου ανάπτυξης παγκοσμίως έως το 2030. Στο επίκεντρό της βρίσκονται 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ), οι οποίοι ενσωματώνουν με ισορροπημένο τρόπο τις τρεις διαστάσεις της βιώσιμης ανάπτυξης — την οικονομική, την κοινωνική και την περιβαλλοντική. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της Ατζέντας 2030 και έχει επίσης δεσμευτεί πλήρως να πρωτοστατήσει, στην υλοποίηση της Ατζέντας 2030 και των ΣΒΑ από κοινού με τα κράτη μέλη της και σύμφωνα με την αρχή της επικουρικότητας.

Στην κατεύθυνση της ενίσχυσης της βιωσιμότητας των συστημάτων μεταφοράς είναι σημαντικό να υπάρξει μελέτη και κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων. Για να γίνει αυτό εφικτό θα πρέπει να υιοθετηθούν κατάλληλες μεθοδολογίες εκτίμησης και μέτρησης των επιπτώσεων αυτών. Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA), αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και εφαρμοζόμενη μέθοδο.

2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ (LIFE CYCLE ASSESSMENT, LCA)

Η μέθοδος LCA παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιολόγηση της συνολικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης ενός συγκεκριμένου προϊόντος (όπως ενός τόνου αδρανών υλικών) ή πιο σύνθετων συστημάτων προϊόντων ή διαδικασιών (όπως μια μονάδα παραγωγής ή ένα δίκτυο μεταφορών), εξετάζοντας όλες τις εισροές και εκροές κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, από την παραγωγή των πρώτων υλών έως το τέλος ζωής.

Μία μελέτη LCA αποτελείται από τις εξής τέσσερις φάσεις (ISO 14040):

1. Ορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής (Goal and Scope Definition)
2. Ανάλυση απογραφής του κύκλου ζωής (Inventory Analysis)
3. Εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Impact Assessment)
4. Ερμηνεία (Interpretation)

2.1 Στόχος – Πεδίο Εφαρμογής

Οι στόχοι ενός LCA για οδοστρώματα καθορίζονται από τον οργανισμό που εκτελεί τη μελέτη προκειμένου να προσδιοριστεί ο τύπος της μελέτης, το πεδίο εφαρμογής και η προσέγγιση για την αξιολόγηση των επιπτώσεων και τη λήψη αποφάσεων. Τα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον καθορισμό του στόχου ενός LCA είναι (FHWA 2016): η προβλεπόμενη εφαρμογή, το κοινό στο οποίο απευθύνεται, τα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν και το αν η μελέτη προορίζεται για σύγκριση εναλλακτικών λύσεων ή για γνωστοποίηση μιας συγκεκριμένης απόφασης.

Το πεδίο εφαρμογής μιας LCA ανάλυσης θέτει τα όρια του συστήματος, δηλαδή τί πρόκειται να συμπεριληφθεί στο LCA και τι όχι. Προκειμένου να εξυπηρετεί ορθά τη μέθοδο, το πεδίο εφαρμογής που επιλέγεται θα πρέπει (FHWA 2016): να καλύπτει τα στάδια και τις διαδικασίες του κύκλου ζωής του οδοστρώματος, να προσδιορίζει τα γεωγραφικά και χρονικά όρια της ανάλυσης, να ορίζει τη λειτουργική μονάδα ανάλυσης, να καθορίζει την απαιτούμενη ποιότητα των δεδομένων και να εξαρτάται από τους καθορισμένους στόχους του LCA. Η λειτουργική μονάδα καθορίζει το σύστημα που θα μελετηθεί και λειτουργεί ως μονάδα αναφοράς των δεδομένων εισόδου και εξόδου, σε οποιοδήποτε από τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας (Kendall and Santero 2010). Για τα συστήματα οδοστρωμάτων, η λειτουργική μονάδα πρέπει να είναι μια αναπαράσταση των φυσικών διαστάσεων: πιο συχνά χρησιμοποιείται μια λωρίδα κυκλοφορίας ενός χιλιομέτρου ή ενός μιλίου. Σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της λειτουργικής μονάδας είναι η περίοδος ανάλυσης. Ως περίοδος ανάλυσης ορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο αξιολογείται η λειτουργική μονάδα της μεθόδου LCA.

2.2 Απογραφή του Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Inventory, LCI)

Στη φάση της απογραφής του κύκλου ζωής (LCI) συλλέγονται και αναλύονται όλα τα σχετικά δεδομένα, γιαορισμένα ή όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, κατά τρόπο σύμφωνο με τις μεθόδους, τους κανόνες και τις παραδοχές που έχουν καθοριστεί στο στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Τα δεδομένα μπορούν είτε να συλλέγονται από συγκεκριμένες διαδικασίες (πρωτογενή), ή να λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία και τις υπάρχουσες βάσεις δεδομένων (δευτερογενή). Τα αποτελέσματα από την ανάλυση LCI αποτελούν τη βάση για τη μετέπειτα αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (FHWA 2016).

2.3 Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Impact Assessment, LCIA)

Στη φάση της εκτίμησης των επιπτώσεων κύκλου ζωής (LCIA) μεταφράζονται τα αποτελέσματα της απογραφής (LCI) σε τιμές ανθρωπίνων και περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα αποτελέσματα εκχωρούνται στην αντίστοιχη κατηγορία επιπτώσεων και επιλέγεται ένας σχετικός δείκτης για κάθε κατηγορία. Σκοπός του LCIA είναι «η κατανοήση και η αξιολόγηση του μεγέθους και της σημασίας των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για ένα σύστημα προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος» (ISO 2006a).

Οι κατηγορίες επιπτώσεων μπορεί να σχετίζονται είτε με εισροές (αντικατοπτρίζουν π.χ. την κατανάλωση ενός πόρου), ή με εκροές (π.χ. επιπτώσεις ενός ρύπου). Τα περισσότερα LCIA οδοστρωμάτων περιλαμβάνουν τη χρήση ενέργειας ως αποτέλεσμα της ανάλυσης απογραφής και την υπερθέρμανση του πλανήτη ως αποτέλεσμα της εκτίμησης των επιπτώσεων, ως κύριες παραμέτρους αναφοράς. Παρόλα αυτά συνιστάται η συμπερίληψη ενός ευρύτερου συνόλου κατηγοριών επιπτώσεων, όπως αυτές που ορίζονται από τη μεθοδολογία TRACI (Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts).

2.4 Ερμηνεία (Interpretation)

Πρόκειται για την τελευταία φάση μιας LCA μελέτης, κατά την οποία αξιολογούνται τα αποτελέσματα των σταδίων LCI και LCIA, εξετάζοντας την

πληρότητα, την ευαισθησία, τη συνοχή και τη μεταβλητότητα (αβεβαιότητα) τους. Η φάση της ερμηνείας απαντά στις ερωτήσεις που τίθενται από το στόχο και το αντικείμενο της μελέτης και διατυπώνει συστάσεις βάσει αυτών των απαντήσεων. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία, τόσο μέσα στα δικά της πλαίσια, όσο και στα πλαίσια ολόκληρης της μελέτης LCA. Η επαναληπτική προσέγγιση της φάσης της ερμηνείας συμβάλλει στην ανάπτυξη, την αναθεώρηση και την επαναξιολόγηση του πεδίου εφαρμογής της μελέτης LCA. Η ύπαρξη διαφάνειας από τους υπεύθυνους λήψης των αποφάσεων και τους ενδιαφερόμενους οργανισμούς, κατά τη φάση της ερμηνείας, κρίνεται απαραίτητη.

3 ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

3.1 Βιωσιμότητα οδοστρωμάτων

Η κατασκευή ενός βιώσιμου οδοστρώματος αποτελεί έναν αρκετά φιλόδοξο στόχο. Ένα οδόστρωμα για να θεωρείται βιώσιμο θα πρέπει να ικανοποιεί τους στόχους της μηχανικής για τους οποίους κατασκευάστηκε, να διατηρεί και (ιδανικά) να επαναφέρει στην αρχική κατάσταση το οικοσύστημα της περιοχής, να χρησιμοποιεί με τον πλέον οικονομικό τρόπο τους οικονομικούς, ανθρώπινους και περιβαλλοντικούς πόρους, καθώς και να σέβεται βασικές ανθρώπινες ανάγκες (υγεία, ασφάλεια, άνεση κλπ.) (Zietsman et al. 2011).

Η ποσοτικοποίηση της «βιωσιμότητας» του πλανήτη στο σύνολό του δεν είναι εφικτή, ωστόσο χρήσιμες αντιπροσωπευτικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται συχνά, ως ένδειξη του ρόλου και του σχετικού αντίκτυπου του δικτύου μεταφορών και των οδοστρωμάτων. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHGs), που προκαλούνται από τον άνθρωπο, χρησιμοποιούνται ως αντιπροσωπευτικό μέγεθος για τον ποσοτικό προσδιορισμό των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στον πλανήτη. Οι εκπομπές GHG ενώνονται ένα χρήσιμο σημείο εκκίνησης για την ανάλυση, δεν αντιπροσωπεύουν όμως τις επιδράσεις στη βιωσιμότητα. Είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται πως η εκτίμηση της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες πέραν της εκπομπής των GHG (κατανάλωση ενέργειας, οικονομική ανάπτυξη κλπ.).

3.2 Κύκλος ζωής οδοστρωμάτων

Προκειμένου να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι επιπτώσεις των οδοστρωμάτων στην αειφορία, είναι χρήσιμο να διαιρεθεί ο κύκλος ζωής του οδοστρώματος στις σημαντικότερες φάσεις που τον χαρακτηρίζουν. Αυτές είναι: η παραγωγή των υλικών, ο σχεδιασμός του οδοστρώματος, η κατασκευή, η χρήση, η συντήρηση/αποκατάσταση και το τέλος της διάρκειας ζωής.

Η παραγωγή των υλικών αφορά στην απόκτηση και εξόρυξη των πρώτων υλών, τη μεταφορά τους και τη βιομηχανική επεξεργασία τους. Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος καθορίζει τη δομική σύνθεση και τις λειτουργικές απαιτήσεις, καθώς και τις διαδικασίες συντήρησης και αποκατάστασης. Το στάδιο της κατασκευής λαμβάνει υπόψη τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, τη μεταφορά των υλικών στο πεδίο και όλες τις κατασκευαστικές δραστηριότητες που ακολουθούν. Η φάση της χρήσης εξετάζει κυρίως την αλληλεπίδραση των οχημάτων με το οδόστρωμα. Το στάδιο της συντήρησης αναφέρεται στις ενέργειες εκείνες που συμβάλλουν στη μείωση του ρυθμού αλλοίωσης ενός οδοστρώματος, προσδιορίζοντας και αντιμετωπίζοντας συγκεκριμένες αδυναμίες του οδοστρώματος που συμβάλλουν στη συνολική φθορά. Το τέλος του κύκλου ζωής του οδοστρώματος αναφέρεται στην τελική διάθεση και στην επακόλουθη επαναχρησιμοποίηση, επεξεργασία ή ανακύκλωση οποιουδήποτε τμήματος από το σύστημα του οδοστρώματος, το οποίο έχει φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης ζωής του.

3.3 Ανακύκλωση Οδοστρωμάτων

3.3.1 Γενικά

Η κατασκευαστική βιομηχανία ασφαλικών και χωματουργικών εργασιών, όπως και άλλοι φορείς, αντιμετωπίζει τέσσερις βασικούς προβληματισμούς: τη μείωση των διαθέσιμων κονδυλίων, τη συνεχή ζήτηση πρώτων υλών (αδρανή και άσφαλτο), την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω υπάρχει άμεση ανάγκη να βελτιστοποιηθεί η χρήση του διαθέσιμου κεφαλαίου και να αξιοποιούνται στο έπακρο οι ιδιότητες των πρώτων υλών, να ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια που δαπανάται σε όλες τις δραστηριότητες των έργων κατασκευής ή συντήρησης/αποκατάστασης και να εξυρευθούν εναλλακτικές λύσεις που δε θα προσβάλλουν, δε θα επιδεινώνουν και δε θα αλλοιώνουν το περιβάλλον. Με λίγα λόγια, αναζητούνται λύσεις και πρακτικές που θα ικανοποιούν τις αρχές της βιωσιμότητας για το οδόστρωμα.

Μια σημαντικότερη συνεισφορά στην παραπάνω προσπάθεια προσφέρεται από την επαναχρησιμοποίηση ή την ανακύκλωση των υλικών των παλαιών οδοστρωμάτων, όπως ασφαλτόμιγμα, σκυρόδεμα ή αδρανή υλικά στρώσεων βάσης/υπόβασης.

Με την ανακύκλωση των οδοστρωμάτων επέρχονται σημαντικά οφέλη, όπως η προστασία και εξοικονόμηση των αποθεμάτων σε αδρανή, σε άσφαλτο και σε ενέργεια, η προστασία του περιβάλλοντος και η μείωση του κόστους κατασκευής.

3.3.2 Κατηγορίες Ανακύκλωσης

Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανακύκλωσης γίνεται σύμφωνα με την τεχνική που χρησιμοποιείται, το είδος των υλικών που πρόκειται να ανακυκλωθούν και το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει (δηλαδή απλή συντήρηση ορισμένων φθορών, βελτίωση της ποιότητας οδήγησης, ενίσχυση ή όχι της δομικής αντοχής του οδοστρώματος κλπ.). Έτσι, η ανακύκλωση διακρίνεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (Νικολαΐδης 2011):

- την επιφανειακή ανακύκλωση – απόξεση (Coldplanning, CP)
- την ανακύκλωση εν θερμώ (Hotrecycling, HR)
- την ανακύκλωση εν ψυχρώ (Coldrecycling, CR)
- την ανακύκλωση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Πλην της πρώτης κατηγορίας οι υπόλοιπες τρεις διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες: την ανακύκλωση επί της οδού ή επί του έργου (recycleinsitu) και την ανακύκλωση σε μόνιμη εγκατάσταση (recycleinplant).

3.3.3 Βιώσιμα Υλικά | (Sustainable materials)

3.3.3.1 Αδρανή Υλικά

Τα αδρανή υλικά καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο όγκο στην κατασκευή συμβατικών οδοστρωμάτων, ως κύριο συστατικό σε ασφατικά μίγματα και μίγματα σκυροδέματος. Επίσης, χρησιμοποιούνται ευρέως ως βασικό υλικό πλήρωσης για τις κατώτερες στρώσεις, όπως η βάση και η υπόβαση του οδοστρώματος. Το κόστος αγοράς τους είναι γενικά χαμηλό, η μεταφορά και η διάθεση τους όμως κατά μήκος του έργου, μπορεί να είναι αντικονομική, αλλά και συγχρόνως επιβαρυντική προς το περιβάλλον.

Τα πιο δημοφιλή αδρανή για την κατασκευή οδοστρωμάτων, διακρίνονται σε αδρανή προερχόμενα από το θρυμματισμό πετρωμάτων, σε τεχνητή άμμο και σε αμμοχάλικο. Προκύπτουν κυρίως έπειτα από τεχνική επεξεργασία αλλά συναντώνται και αυτούσια, σε φυσική μορφή και συγκεκριμένα σε αλλουβιακές αποθέσεις.

Τα χρησιμοποιούμενα προϊόντα ανακύκλωσης που αντικαθιστούν τα αδρανή υλικά έχουν σημαντικές προοπτικές βιωσιμότητας και προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από την

ανακύκλωση υφιστάμενων οδοστρωμάτων, όταν αυτά πλησιάζουν το τέλος του κύκλου ζωής τους. Κάποια από αυτά ερευνήθηκαν και συνεχίζουν να ερευνώνται με τη βοήθεια της μεθόδου LCA, για την ανάλυση των αποτελεσμάτων της χρήσης τους ως προς τον κύκλο ζωής των οδοστρωμάτων. Τα υλικά αυτά είναι τα εξής (FHWA 2015, NCPTC 2012):

- **Ανακτημένο Ασφαλτόμιγμα (Reclaimed Asphalt, RA)** – το οποίο συνήθως παράγεται από το φρεζάρισμα (απόξεση) ενός υπάρχοντος ασφαλτικού μίγματος κατά το στάδιο της συντήρησης ή αποκατάστασής του. Το υλικό που αφαιρείται αποθηκεύεται για χρήση σε νέο εύκαμπτο οδόστρωμα, είτε για την παρασκευή νέων ασφαλτικών μειγμάτων, ή ως αδρανές βάσης/υπόβασης. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΑΡΑ 2017, τα μεγαλύτερα ποσοστά για χρήση ως αδρανές βάσης/υπόβασης εμφανίζονται στην Τουρκία και τη Νορβηγία, ενώ στις υπόλοιπες χώρες το αντίστοιχο ποσοστό κυμαίνεται στο 20%. Στις ΗΠΑ μόλις το 4% χρησιμοποιείται ως αδρανές βάσης/υπόβασης, το υπόλοιπο 96% αξιοποιείται για την παρασκευή νέων ασφαλτομιγμάτων.
- **Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος (Recycled Concrete Material, RCM)** - τα οποία προέρχονται από τη θραύση στρώσεων οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα. Τα αδρανή αυτά είναι κυρίως γωνιώδη, και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή νέων οδοστρωμάτων, τις πλείστες περιπτώσεις ως βάση και ως υπόβαση. Παρά την ανακυκλώσιμη φύση τους, χαρακτηρίζονται από σημαντικά επίπεδα αντοχής, ικανή να συγκριθεί ακόμη και με αυτή των συμβατικών. Επιπλέον, παρέχουν εξαιρετικά επίπεδα δυσκαμψίας και μεταφοράς φορτίου. Δεδομένου ότι το RCM έχει χαμηλότερο ειδικό βάρος από τα περισσότερα ορυκτά αδρανή, παρέχει υψηλότερο όγκο για ίδιο βάρος αδρανούς υλικού και επομένως είναι οικονομικά ελκυστικό για τους κατασκευαστές.
- **Ανακυκλωμένες Ασφαλτικές Πλάκες κτιριακών στεγών (Recycled Asphalt Shingles, RAS)** – είναι αποτέλεσμα ανακύκλωσης ασφαλτικών πλακών, που χρησιμοποιούνται ως υδρομόνωση στεγών σε κατοικίες κυρίως των ΗΠΑ. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αργότερα, σε ποσοστά της τάξεως του 50% ως ένας συνδυασμός ασφαλτικού συνδετικού υλικού, μαζί, συνήθως με λεπτόκοκκα αδρανή, σε νέα ασφαλτικά μίγματα.
- **Μεταλλουργική Σκωρία (Steel Furnace Slag, SFS)** – είναι ένα παραπροϊόν που προκύπτει έπειτα από διάφορες διαδικασίες παρασκευής και επεξεργασίας χάλυβα. Αν και παρουσιάζει μερικές ιδιορρυθμίες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ασφαλτικά μίγματα, ίσως και σε περιπτώσεις σκυροδέτησης, έπειτα όμως από λεπτομερή μελέτη. Προτείνεται επίσης για αντιολισθηρές στρώσεις κυκλοφορίας.
- **Άμμος Χυτηρίου (Foundry Sand)** – είναι παράγωγο επεξεργασίας μετάλλων. Οι δυνατότητες χρήσης της ποικίλουν, με τη μερική αντικατάσταση λεπτόκοκκων αδρανών και παιπάλης σε ασφαλτικά μίγματα να είναι η δημοφιλέστερη. Επίσης, απαιτείται επαρκής μελέτη για την πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς της, για την αποφυγή δυσλειτουργιών και πρόωρων αστοχιών.
- **Απόβλητα από γυαλί (Waste Glass, WG)**, προτεινόμενα ως εναλλακτική πηγή αδρανών υλικών στην κατασκευή εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν, όπως η συνάφεια της ασφάλτου και του τσιμέντου με το γυαλί. Η χρήση του σε στρώσεις βάσης/ υπόβασης, ως ασύνδετο αδρανές, προτείνεται να γίνεται συνδυαστικά με αδρανή υψηλής ποιότητας, καθώς τα απόβλητα από γυαλί είναι δυνατό να θραυτούν υπό μεγάλα φορτία. Για το λόγο αυτό επιλέγονται κυρίως για οδοστρώματα που δε δέχονται υψηλούς φόρτους (Jamshidi et. al. 2016).

3.3.3.1 Ασφαλτικά Υλικά

Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες σε υλικά για την κατασκευή των οδοστρωμάτων παράγεται μία μεγάλη ποσότητα αδρανών και ασφάλτου ανά τον κόσμο. Κατά την περίοδο 2000 έως 2017 η συνολική ποσότητα θερμών και ζεστών ασφαλτομιγμάτων που

παράχθηκε στην Ευρώπη ήταν της τάξης των 296,7 εκατομμυρίων τόνων, ενώ για τις ΗΠΑ η ποσότητα αυτή έφτασε τα 344,0 εκατομμύρια τόνους (ΕΑΡΑ 2017).

Η ασφαλτος είναι γνωστή και χρησιμοποιείται από αρχαιοτάτων χρόνων. Είναι το παλαιότερο και πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό. Χρησιμοποιείται από το 6.000 π.Χ. ως αρίστης ποιότητας μονωτικό και συνδετικό υλικό. Η ασφαλτος που χρησιμοποιήθηκε μέχρι και τις αρχές του εικοστού αιώνα ήταν φυσικό προϊόν από διάφορα φυσικά αποθέματα του πλανήτη. Η φυσική ασφαλτος πλέον χρησιμοποιείται περιστασιακά στην κατασκευή οδοστρωμάτων για οικονομικούς κυρίως λόγους, λόγω της δυσκολίας καθαρισμού και συλλογής σε σύγκριση με την ασφαλτο που εξάγεται από την κλασματική απόσταξη του πετρελαίου.

Η τεχνητή ασφαλτος είναι κατάλοιπο κλασματικής απόσταξης πρωτογενούς (αργής) πίσσας (crudetar) ή αργού πετρελαίου (crudeoil). Στην πρώτη περίπτωση παράγεται ο πισσίτης ή κοινώς πίσσα και στη δεύτερη η πετρελαϊκή ασφαλτος ή κοινώς ασφαλτος. Και τα δύο προϊόντα οπτικώς είναι όμοια, έχουν παρόμοιες τεχνολογικές ιδιότητες με αυτές της φυσικής ασφάλτου και χρησιμοποιούνται για τις ίδιες εφαρμογές. Διαφέρουν ωστόσο ριζικά ως προς τη φυσική και χημική σύστασή τους, καθώς επίσης και ως προς την οσμή. Η πίσσα έχει περισσότερο έντονη και χαρακτηριστική αρωματική μυρωδιά από αυτήν της ασφάλτου (Νικολαΐδης 2011).

Τα ασφατικά υλικά παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατασκευή των οδοστρωμάτων καθώς τα περισσότερα συμβατικά οδοστρώματα είναι εύκαμπτα, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει πως τα δύσκαμπτα οδοστρώματα δε συναντώνται. Τα ασφατικά υλικά χρησιμοποιούνται και ως συνδετικά υλικά σε διάφορα ασφατικά μίγματα ή και για τη σύνδεση των ασφατικών στρώσεων.

Κατά τη τελευταία δεκαετία ωστόσο παράγοντες όπως η εξάντληση των φυσικών πηγών και πόρων, καθώς και η οικονομική κρίση έχουν αυξήσει αρκετά την εμπορική αξία των διαφόρων ασφατικών υλικών. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών σε συνεργασία με την ανακύκλωση των παλαιών οδοστρωμάτων έχουν συμβάλει στη ανάπτυξη νέων πρωτοποριακών υλικών τα οποία αποτελούν ένα σημαντικό βήμα προς την κατασκευή όλο και περισσότερο βιώσιμων οδοστρωμάτων. Ειδικότερα, τα κυριότερα βιώσιμου χαρακτήρα ασφατικά υλικά και μίγματα είναι (FHWA 2015, Νικολαΐδης 2011):

- **Ασφαλτος**(asphalt): είναι το απόσταγμα του αργού πετρελαίου που χρησιμοποιείται απευθείας στην οδοποιία και έχει ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό (binder) για την παρασκευή διαφόρων τύπων ασφαλτομιγμάτων καθώς και ασφατικών υλικών.
- **Ασφατικό γαλάκτωμα** (asphalt emulsion): είναι ένα υδατικό διάλυμα ασφάλτου το οποίο παρασκευάζεται σε διάφορες αναλογίες και υπό την παρουσία μικρών ποσοτήτων σε χημικά πρόσθετα. Η χρήση του συναντάται σε αρκετές περιπτώσεις, όπως για τη σύνδεση και συγκόλληση δύο ασφατικών στρώσεων, σε ψυχρά μίγματα και γενικότερα σε διάφορα ασφατικά μίγματα χαμηλής σχετικά αντοχής. Χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως σε τεχνικές συντήρησης.
- **Θερμό Ασφατικό Μείγμα** (Hot-Mix Asphalt, HMA), με χρήση αδρανών πυκνής κοκκομετρικής διαβάθμισης και θερμοκρασίες ανάμιξης 135 με 165°C. Το θερμό ασφαλτόμειγμα, ανάλογα με την κοκκομετρική του διαβάθμιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις ασφατικές στρώσεις.
- **Θερμό Ασφατικό μείγμα ανοικτής διαβάθμισης** (Open-graded asphalt), με χρήση κυρίως χονδρόκοκκων αδρανών «ανοιχτής» κοκκομετρικής διαβάθμισης που έχει ως αποτέλεσμα το υψηλό ποσοστό κενών αέρος στο μείγμα. Είναι γενικώς υδατοδιαπερατό μείγμα και έχει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η μείωση του θορύβου, η βελτίωση της αντιολισθηρότητας και η μείωση του κινδύνου υδρολίθωσης.
- **Ζεστό Ασφατικό Μείγμα** (Warm-Mix Asphalt, WMA), το οποίο έχει παρόμοια σύσταση με το αντίστοιχο θερμό ασφαλτόμειγμα, με διαφορά όμως την

παρουσίαχημικών προσθέτων, τα οποία ευθύνονται για την εργασιμότητα και τη δυνατότητα επαρκούς συμπίκνωσης του ασφαλτικού μείγματος, σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες, της τάξεως των 40°C. Αποτελεί μία νέα, πρωτοποριακή τεχνική, με αρκετές βιώσιμες προοπτικές, χάρη στη μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και στη διευκόλυνση σε θέματα μεταφοράς. Προσοχή απαιτείται στις επιπτώσεις των χημικών προσθέτων στο περιβάλλον, καθώς η παρασκευή αυτών έχει σημαντική επίδραση στο βαθμό της βιωσιμότητας. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των ζεστών ασφαλτομιγμάτων είναι (Rubio et al., 2012): μείωση εργοστασιακών εκπομπών, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, αύξηση της περιεκτικότητας σε ανακτημένο ασφαλτόμιγμα (RA), αύξηση εργασιμότητας και ταχύτερη παράδοση του έργου στην κυκλοφορία καθώς απαιτείται λιγότερος χρόνος για την ψύξη του υλικού.

- **Σκυρομασטיκό ασφαλτόμιγμα** (StoneMasticAsphalt, SMA), το οποίο χρησιμοποιείται για τις στρώσεις κυκλοφορίας σε όλες τις κατηγορίες οδών, καθώς και σε αεροδρόμια, γέφυρες κλπ. Η ιδιαιτερότητα του SMA έγκειται στο ότι ο σκελετός του μείγματος αποτελείται από χονδρόκοκκα αδρανή του οποίου τα κενά γέμισαν με μαστιχικό κονίαμα (μείγμα ασφάλτου, άμμου και παιπάλης). Το τελικό μείγμα είναι κλειστού έως ημίκλειστου τύπου ασφαλτόμιγμα μη συνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης. Χαρακτηριστικό του SMA είναι το υψηλότερο ποσοστό ασφάλτου που περιέχει σε σύγκριση με τα συμβατικά ασφαλτικά σκυροδέματα, γεγονός που του προσδίδει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής έναντι αυτών.

- **Ψυχρά ασφαλτομίγματα** (chipseals, fogseals, slurryseals), αποτελούμενα από ασφαλτικό γαλάκτωμα και αδρανή. Γνωρίζουν ευρεία χρήση σε εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης των οδοστρωμάτων, με σκοπό τη βελτίωση των επιφανειακών χαρακτηριστικών.

- **Ψίχα από Καουτσούκ** (CrumbRubber) προερχόμενη κυρίως από φθαρμένα ελαστικά, αφού πρώτα αφαιρεθούν με κατάλληλη επεξεργασία τα λινά, ο χάλυβας και τα λοιπά πρόσθετα. Προορίζεται για χρήση σε ασφαλτικά μίγματα, είτε σαν πρόσθετο στην άσφαλτο, είτε για αντικατάσταση μέρους των λεπτόκοκκων αδρανών. Αποτελεί μία αξιόλογη βιώσιμη πρόταση, καθώς αξιοποιεί υλικά που θεωρούνταν άχρηστα, μειώνοντας ταυτόχρονα τη ζήτηση για νέα ασφαλτικά υλικά.

- **Ανακτημένο ασφαλτόμιγμα** (ReclaimedAsphalt). Ασφαλτικό υλικό μπορεί να θεωρηθεί και το ανακτημένο ασφαλτόμιγμα, για το οποίο έγινε λόγος στην κατηγορία των εναλλακτικών αδρανών υλικών προϊόντων ανακύκλωσης, λόγω της συνύπαρξης αδρανών και συνδετικού ασφαλτικού υλικού. Διάφορα στοιχεία σχετικά με τη χρήση του σε ασφαλτικά μίγματα, αφορούν την απαιτούμενη αναλογία, αλλά και την τοποθέτηση στην κατάλληλη στρώση.

Για στρώσεις όπως η βάση ή η υπόβαση ενός τυπικού οδοστρώματος, διάφοροι οργανισμοί προτείνουν το ποσοστό αντικατάστασης των νέων αδρανών να ανέρχεται σε 50% το μέγιστο, λόγω σχετικά χαμηλών εντατικών απαιτήσεων. Για τις ασφαλτικές στρώσεις το ποσοστό αυτό μειώνεται σε 15% με 30%, εξαιτίας των υψηλότερων απαιτήσεων σε αντοχή και λόγω των αντίστοιχα κρίσιμων λειτουργικών χαρακτηριστικών.

Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να τονισθεί πως ο μέγιστος κόκκος D των αδρανών που εμπεριέχονται στο ανακτηθέν ασφαλτόμιγμα δε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος του μέγιστου κόκκου D του προς σύνθεση μείγματος. Επίσης, οι ιδιότητες των αδρανών υλικών στο ανακτηθέν ασφαλτόμιγμα θα πρέπει να ικανοποιούν τις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος (Νικολαΐδης 2011).

4 ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ LCA

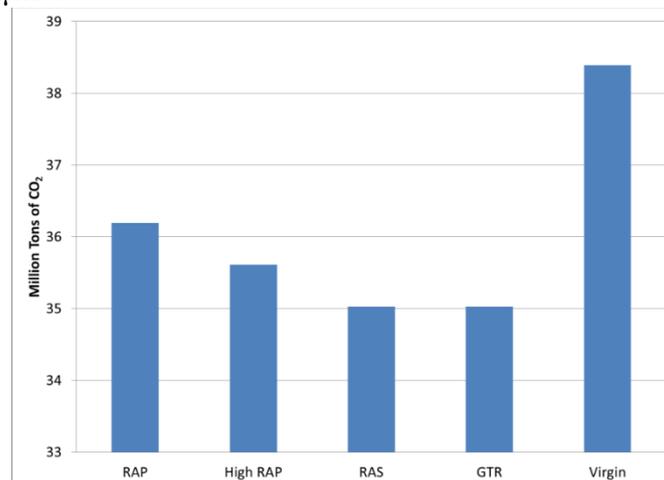
4.1 Εισαγωγή

Κατά καιρούς, αρκετοί ερευνητές (Stripple 2001, Vidal et al. 2013; Willis 2014, Santero et al. 2011a,b, Muench 2010) έχουν μελετήσει τις επιπτώσεις του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων στο περιβάλλον, καθώς και τη συνεισφορά των νέων τεχνολογιών στον περιορισμό των επιπτώσεων αυτών. Οι μελέτες αυτές βασίζονται στην εφαρμογή της μεθόδου της αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA). Η μέθοδος LCA γίνεται αποδεκτή και εφαρμόζεται από την οδική βιομηχανία, για την εκτίμηση και τη σύγκριση των κυρίων περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των ασφαλτικών υλικών, καθώς και των διαδικασιών επίστρωσης. Κάποιες μελέτες περιλαμβάνουν όλα τα στάδια του κύκλου ζωής από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως και την τελική απόρριψη, ενώ κάποιες άλλες εξετάζουν ορισμένα από τα στάδια του κύκλου ζωής. Η αποκοπή σταδίων γίνεται εφαρμόζοντας με προσοχή κριτήρια αποκοπής.

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις έρευνες αυτές είναι:

- Η περισσότερο ενεργοβόρα διαδικασία είναι η παραγωγή των υλικών
- Οι συνολικές επιπτώσεις των οδοστρωμάτων μειώνονται σημαντικά εάν στο ασφαλτόμιγμα προστεθεί κάποιο ανακυκλωμένο υλικό (RA, RCM, RAS).
- Η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι μεγαλύτερη όταν εφαρμόζεται επί τόπου ψυχρή ανακύκλωση του οδοστρώματος (CIR), έναντι της ανακύκλωσης στο εργοστάσιο.
- Η επιλογή WMA για την παρασκευή του οποίου έχει χρησιμοποιηθεί RA είναι η περισσότερο βιώσιμη πρακτική, έναντι της χρήσης HMA.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται οι εκπομπές σε διοξείδιο του άνθρακα κατά την παραγωγή διαφορετικών τύπων ασφαλτομιγμάτων (Willis 2014). Για τα περισσότερα μίγματα παρουσιάστηκε μείωση των εκπομπών CO₂ στο εργοστάσιο της τάξεως του 5 έως 9%. Η μείωση αυτή συνδέεται με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες παρασκευής των μειγμάτων και την εξοικονόμηση καυσίμων.



Σχήμα 6. Εκπομπές CO₂ από την παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων (Willis 2014)

4.2 Πειραματική Ανάλυση

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών ως υλικό στη βάση και υπόβαση του οδοστρώματος, ώστε να εκτιμηθούν τα πιθανά οφέλη στο περιβάλλον. Η ανάλυση γίνεται χρησιμοποιώντας τη δωρεάν ηλεκτρονική πλατφόρμα Athena Pavement η οποία χρησιμοποιείται σε Καναδά και ΗΠΑ και βασίζεται στη μέθοδο LCA.

Εξετάζονται τρία είδη οδοστρώματος:

- Το πρώτο κατασκευάζεται κατά αποκλειστικότητα από συμβατικά υλικά.
- Στο δεύτερο γίνεται χρήση αδρανών από ανακτημένο ασφαλτόμιγμα, RA στην πρώτη στρώση της βάσης/υπόβασης. Η δεύτερη στρώση της βάσης/υπόβασης αποτελείται από συμβατικά αδρανή.
- Στο τρίτο χρησιμοποιούνται ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος, RCM στην πρώτη στρώση της βάσης/υπόβασης. Η δεύτερη στρώση της βάσης/υπόβασης αποτελείται από συμβατικά αδρανή.

4.2.1 Βασικά στοιχεία της ανάλυσης

Οι αποστάσεις και στις τρεις περιπτώσεις οδοστρωμάτων θα είναι οι ίδιες, καθώς και η τοποθεσία, συνεπώς η επιλογή δεν επηρεάζει το τελικό συμπέρασμα σύγκρισης των τριών περιπτώσεων. Ως τοποθεσία του έργου λαμβάνεται η Καλιφόρνια, καθώς θεωρείται πως σε σχέση με τις υπόλοιπες πολιτείες των ΗΠΑ είναι πιο κοντά στα ελληνικά δεδομένα. Η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του έργου λαμβάνεται ίση με τριάντα (30) έτη.

Η προσομοίωση αφορά οδόστρωμα μήκους ενός χιλιομέτρου, το οποίο περιλαμβάνει δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση, πλάτους τριών μέτρων και πενήντα εκατοστών (3,50m) καθώς επίσης και Λωρίδα Έκτακτης Ανάγκης (ΛΕΑ) πλάτους δύο μέτρων και πενήντα εκατοστών (2,50m) εκατέρωθεν του δρόμου. Στο σημείο αυτό σημειώνεται πως η διατομή του οδοστρώματος είναι ακριβώς ίδια σχεδιαστικά και για τους τρεις τύπους της ανάλυσης.

Το συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων λαμβάνεται ίσο με δεκαπέντε εκατοστά (15cm), ενώ οι στρώσεις από ασύνδετα αδρανή είναι σαράντα εκατοστά (40cm): είκοσι εκατοστά συμβατικού αδρανούς και είκοσι ανακυκλωμένου (RA, RCM). Οι ασφαλτικές στρώσεις και στις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις κατασκευάζονται από θερμό ασφαλτικό σκυρόδεμα με PG-64-22, όπου το 64 αντιστοιχεί στη μέγιστη θερμοκρασία σχεδιασμού του οδοστρώματος και το 22 στην ελάχιστη.

4.2.2 Αποτελέσματα

Όπως είναι αναμενόμενο, οι επιπτώσεις του συμβατικού οδοστρώματος είναι υψηλότερες σε σχέση με τα οδοστρώματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένο υλικό. Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται σε ποσοστά επί τοις εκατό η βελτίωση σε κάθε κατηγορία επιπτώσεων, από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, για τα στάδια της παραγωγής και της κατασκευής. Για να προκύψουν τα ποσοστά σε κάθε κατηγορία, η σύγκριση γίνεται με βάση τις τιμές που εμφανίζει το συμβατικό οδόστρωμα, στα στάδια της παραγωγής των υλικών και της κατασκευής.

Όπως παρατηρείται, στο στάδιο της παραγωγής οι μεγαλύτερες μειώσεις εντοπίζονται στις κατηγορίες του φωτοχημικού νέφους, της εξάντλησης του όζοντος και της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Ειδικότερα, στην κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη, παρουσιάζεται μείωση της εκπομπής CO₂ κατά 3.81% και 2.93% από τη χρήση RA και RCM αντίστοιχα. Όσον αφορά στο φωτοχημικό νέφος, οι εκπομπές O₃ περιορίζονται κατά 4.34% χρησιμοποιώντας RA και 2.99% χρησιμοποιώντας RCM.

Στο στάδιο της κατασκευής, τα ποσοστά βελτίωσης παρουσιάζουν για όλες τις κατηγορίες μία σύγκλιση ως προς τις τιμές τους. Για το οδόστρωμα με βάση/υπόβαση από RA τα ποσοστά κυμαίνονται από 11.92 έως 11.94% και για το οδόστρωμα με το RCM στη βάση/υπόβαση τα ποσοστά βελτίωσης συγκλίνουν στο 1.53%.

Το οδόστρωμα στο οποίο εφαρμόζεται RA προκύπτει συνεπώς πως εμφανίζει τη μεγαλύτερη βελτίωση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και θεωρείται περισσότερο βιώσιμο.

Εξαίρεση αποτελεί το στάδιο της παραγωγής των RA, RCM στην κατηγορία «Ανθρώπινη Υγεία – Σωματίδια», στην οποία τα δύο εναλλακτικά οδοστρώματα εμφανίζουν υψηλότερες

τιμές. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διαδικασία της απόξεσης και καταστροφής του παλαιού οδοστρώματος προκειμένου να ανακτηθεί το ανακυκλώσιμο υλικό.

Πίνακας 12. Μείωση επιπτώσεων από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, σε ποσοστά επί τοις εκατό (%)

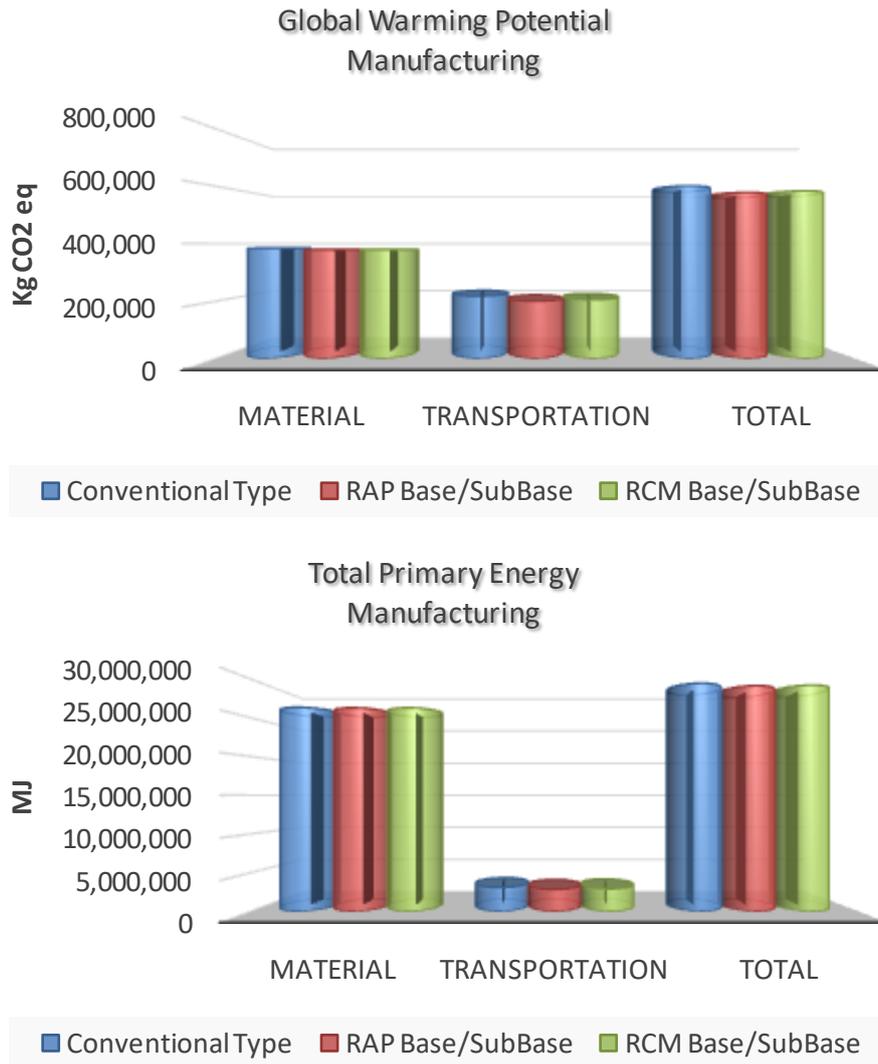
	ΠΑΡΑΓΩΓΗ		ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	
	RA	RCM	RA	RCM
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO ₂ eq)	3,81	2,93	11,92	1,53
Οξίνιση του περιβάλλοντος (kg SO ₂ eq)	2,74	1,90	11,96	1,53
Ανθρώπινη υγεία – Σωματίδια (kg PM _{2.5} eq)	56,21	57,08	11,96	1,53
Ευτροφισμός (kg N eq)	3,81	2,79	11,96	1,53
Εξάντληση όζοντος (kg CFC-11 eq)	23,28	23,13	11,91	1,53
Φωτοχημικό νέφος (kg O ₃ eq)	4,34	2,99	11,96	1,53
Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MJ)	1,08	0,82	11,92	1,53
Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (MJ)	1,08	0,82	11,92	1,53
Κατανάλωση Ορυκτών Καυσίμων (MJ)	1,08	0,82	11,92	1,53

*Το πρόσημο “+” στην κατηγορία «Ανθρώπινη Υγεία – Σωματίδια» εκφράζει αύξηση των επιπτώσεων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά υπό μορφή πινάκων και διαγραμμάτων τα αποτελέσματα για την κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, τόσο κατά τη φάση της παραγωγής, όσο και για την κατασκευή.

Πίνακας 13. Συγκριτικά αποτελέσματα για την επίπτωση στην Υπερθέρμανση του Πλανήτη (kg CO₂ eq) των τριών τύπων οδοστρώματων, για τα στάδια της παραγωγής και της κατασκευής

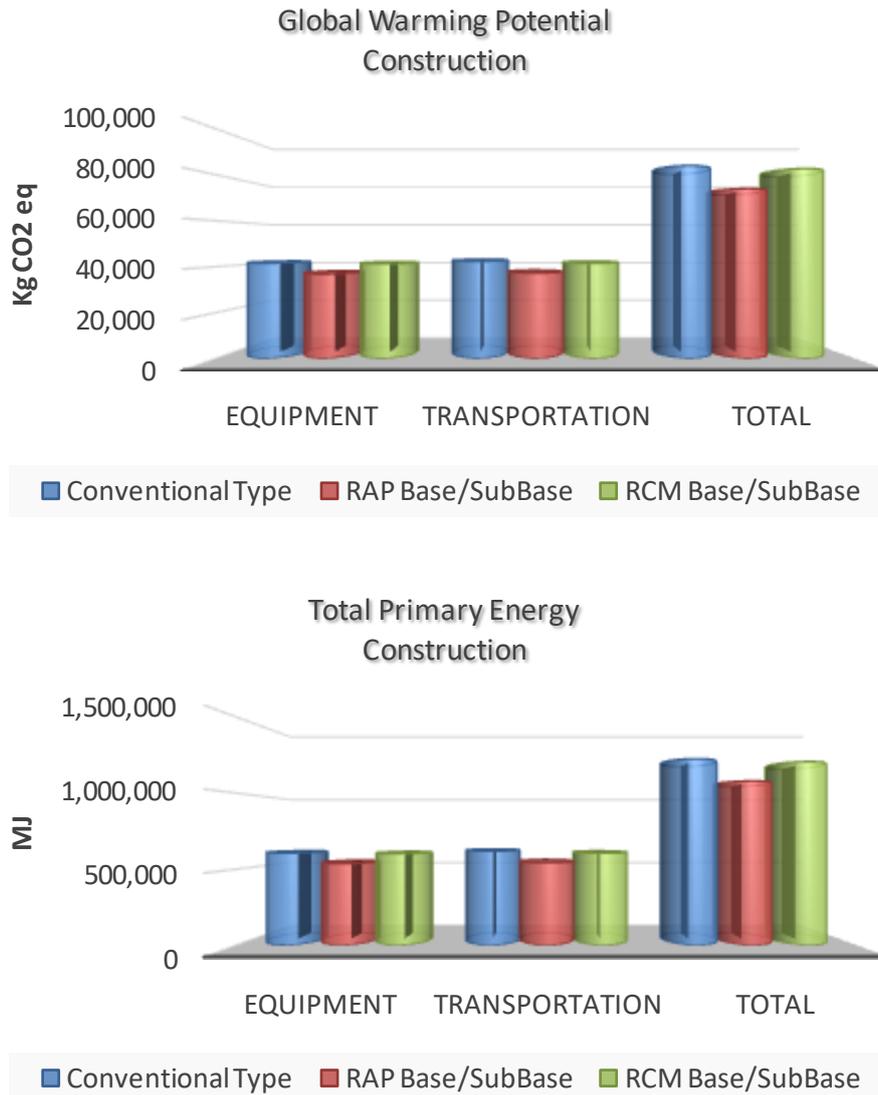
Τύπος υλικού	Παραγωγή			Κατασκευή		
	Υλικό	Μεταφορά	Σύνολο	Εξοπλισμός	Μεταφορά	Σύνολο
Συμβατικό	383.984,32	217.598,44	601.582,77	41.585,59	42.440,74	84.026,33
RA	378.675,07	200.014,90	578.689,97	36.817,32	37.191,18	74.008,50
RCM	378.675,07	205.271,48	583.946,55	41.243,91	41.497,89	82.741,81



Σχήμα 1. Υπερθέρμανση του Πλανήτη και Συνολική Πρωτογενής Ενέργεια κατά τη φάση της παραγωγής των υλικών.

Πίνακας 14. Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας (MJ) των τριών τύπων οδοστρωμάτων, στα στάδια της παραγωγής και της κατασκευής.

Τύπος υλικού	Υλικό	Παραγωγή			Κατασκευή	
		Μεταφορά	Σύνολο	Εξοπλισμός	Μεταφορά	Σύνολο
Συμβατικό	26.345.094,08	3.108.016,19	29.453.110,27	606.464,69	618.888,41	1.225.353,11
RA	26.282.321,15	2.851.605,70	29.133.926,85	536.931,90	542.337,16	1.079.269,07
RCM	26.282.321,15	2.928.259,42	29.210.580,57	601.482,29	605.139,41	1.206.621,70



Σχήμα 2. Υπερθέρμανση του Πλανήτη και Συνολική Πρωτογενής Ενέργεια κατά τη φάση της κατασκευής.

4.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Συμπληρώνοντας την ανάλυση, επιλέγεται σε αυτή τη φάση η κατασκευή των στρώσεων από ασύνδετα αδρανή να κατασκευαστεί πλήρως από ανακυκλωμένα υλικά (RA, RCM). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα που προκύπτουν για το συμβατικό οδόστρωμα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 που ακολουθεί.

Πίνακας 15. . Μείωση επιπτώσεων από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, σε ποσοστά επί τοις εκατό (%)

	ΠΑΡΑΓΩΓΗ		ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	
	RA	RCM	RA	RCM
Υπερθέρμανση του πλανήτη (kg CO ₂ eq)	7,61	5,86	25,33	4,55
Οξίνιση του περιβάλλοντος (kg SO ₂ eq)	5,48	3,78	25,41	4,56
Ανθρώπινη υγεία – Σωματίδια (kg PM _{2.5} eq)	+112,42	+114,17	25,41	4,56
Ευτροφισμός (kg N eq)	7,62	5,59	25,41	4,56
Εξάντληση όζοντος(kg CFC-11 eq)	46,56	46,27	25,32	4,54
Φωτοχημικό νέφος(kg O ₃ eq)	8,72	5,98	25,42	4,57
Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MJ)	2,17	1,65	25,34	4,55
Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας(MJ)	2,17	1,65	25,34	4,55
Κατανάλωση Ορυκτών Καυσίμων (MJ)	2,16	1,64	25,34	4,55

*Το πρόσημο “+” στην κατηγορία «Ανθρώπινη Υγεία – Σωματίδια» εκφράζει αύξηση των επιπτώσεων.

Όπως ήταν αναμενόμενο οι επιπτώσεις του συμβατικού οδοστρώματος παραμένουν υψηλότερες σε σχέση με τα οδοστρώματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένο υλικό. Η χρήση RA εξακολουθεί να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση επιπτώσεων. Στο στάδιο της παραγωγής οι μεγαλύτερες μειώσεις εξακολουθούν να εντοπίζονται στις κατηγορίες του φωτοχημικού νέφους, της εξάντλησης του όζοντος και της υπερθέρμανσης του πλανήτη, ενώ τα ποσοστά σχεδόν διπλασιάζονται.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διερεύνηση της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών, τόσο μέσω βιβλιογραφικής έρευνας, όσο και με τη χρήση πειραματικής ανάλυσης έδειξε πως η ανακύκλωση παλαιών οδοστρωμάτων και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών είναι ένα σημαντικό βήμα προς την επίτευξη του στόχου της βιωσιμότητας.

Μέσω σωστής επεξεργασίας παράγονται από την ανακύκλωση βιώσιμα υλικά ικανά να ανταγωνιστούν σε μηχανικές ιδιότητες τα συμβατικά υλικά. Η χρήση των ανακυκλωμένων αυτών υλικών, σε συνδυασμό με τις νέες τεχνολογίες δύναται να περιορίσει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- European Asphalt Pavement Association (EAPA) 2017. “Asphalt in Figures 2017”, Rue de Commerce 77, Brussels–Belgium.
- Federal Highway Administration (FHWA) 2016. “Pavement Life-Cycle Assessment Framework”, FHWA-HIF-16-014, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.

- International Organization for Standardization (ISO). 2006a. “*Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*”, ISO Standard 14040, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jamshidi A., Kurumisawa K., Nawa T. & T. Igarashi 2016. “*Performance of pavements incorporating waste glass: The current state of the art*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64, 211-236
- Kendall, A. and N. Santero, 2010. “*Introduction to Life Cycle Assessment*”, Pavement Life Cycle Assessment Workshop, Technical Presentation, University of California Pavement Research Center, Davis and Berkeley, CA.
- Muench, S., and T. Van Dam, 2015. “*Climate Change Adaptation for Pavements*”, Tech Brief, FHWA-HIF-15-015, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- National Concrete Pavement Technology Center (NCPTC) 2012. “*Sustainable Concrete Pavements: A Manual of Practice*”, Iowa State University, Institute for Transportation, Ames, IA.
- Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L., Moreno, F., 2012. “*Warm mix asphalt: an overview*”. J. Clean. Prod. 24, 76–84.
- Santero, N.J., E. Masanet, and A. Horvath, 2011a. “*Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps*”, Resources, Conservation and Recycling 55, 810-818.
- Santero, N.J., E. Masanet, and A. Horvath 2011b. “*Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review*”, Resources, Conservation and Recycling 55, 801-809.
- Stripple, H. 2001. “*Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis (Second Revised Edition)*”, Swedish National Road Administration, IVL B 1210 E.
- Van Dam, T. J., J. T. Harvey, S. T. Muench, K. D. Smith, M. B. Snyder, I. L. Al-Qadi, H. Ozer, J. Meijer, P. V. Ram, J. R. Roesler, and A. Kendall, 2015. “*Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document*”, FHWA-HIF-15-002, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., Rubio, M.C., 2013. “*Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement*”, Resources, Conservation and Recycling 74, 101– 114.
- Willis, J.R., 2014. “*Life Cycle Assessment of 2012 NCAT Pavement Test Track Green Group Mixtures*”, NCAT Report, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama, USA.
- Zietsman, J., T. Ramani, J. Potter, V. Reeder, and J. DeFlorio. 2011. *A Guidebook for Sustainability Performance Measurement for Transportation Agencies*. NCHRP Report 708. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Νικολαΐδης Αθ. Φ., 2011. “*Οδοποιία: Οδοστρώματα – Υλικά, Έλεγχος Ποιότητας*”, 3η Έκδοση.

Χρήση της απορριφθείσας παιπάλης ασφαλικών συγκροτημάτων ως πληρωτικό υλικό – εφαρμογή σε τσιμεντένιο κεραμίδι.

Η. Ψυχίδης¹, Ι. Μαλλιούρης²

¹ TITAN AE, Υπηρεσία Τεχνικής Υποστήριξης Πελατών, 11143, Αθήνα

² ALMA Κεραμίδι, 4^ο χλμ Σίνδου - Χαλάστρας, 57300, Θεσσαλονίκη

Λέξεις κλειδιά: ασφαλτικό συγκρότημα, απορριφθείσα παιπάλη, τσιμεντένιο κεραμίδι

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια έντονη προσπάθεια σε ερευνητικό κυρίως αλλά και σε πρακτικό επίπεδο, να γίνει η βέλτιστη αξιοποίηση των παραπροϊόντων που προκύπτουν από παραγωγικές διαδικασίες. Αυτό οφείλεται στην προσπάθεια μεν εύρεσης των βέλτιστων οικονομοτεχνικών πρακτικών αλλά και στη ανάγκη δε μείωσης του οικολογικού αποτυπώματος των δομικών προϊόντων.

Ένα παραπροϊόν που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η απορριφθείσα παιπάλη από ασφαλικά συγκροτήματα, που συλλέγεται από τα απαέρια του ασφαλικού συγκροτήματος, με τα υφασμάτινα κυρίως φίλτρα τύπου baghouse. Το πλεονέκτημά της είναι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποιες εφαρμογές, χωρίς επεξεργασία.

Usage of baghouse fines as an additive – use in concrete roof tile.

I. Psychidis¹, I. Malliouris²

¹ TITAN S.A., Customer Sales Support, Athens, 1143, Greece

² ALMA KERAMIDI, 4th km Sindou –Halastras, 57300, 73100, Greece

Keywords: asphalt concrete plant, baghouse fines, concrete roof tile

ABSTRACT: Recently, there is a great effort in a research and in practical level, to take advantage of the by-products from the productive processes. This is due to the effort to find the best economical and practical practices, but also in need of reducing the ecological footprint of the building products.

An interesting by-product is baghouse fines from asphalt plants, which could be collected from gases of the asphalt plant, with baghouse type filters. The main advantage is that it can be used in some cases, without preprocessing.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ασφαλική παιπάλη, αποτελεί παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας των ασφαλικών σκυροδεμάτων. Εκτιμάται ότι στις ΗΠΑ, παράγονται ετησίως 6 με 8 εκ τν, από όπου σχεδόν το 80-90 % ανακυκλώνεται στη παραγωγή. Ο υπολογισμός έγινε με τη παραδοχή ότι από 1 τόνο αδρανών προκύπτει 2,5% παιπάλης.

Στην Ελλάδα λόγω της ασβεστολιθικής προέλευσης των πετρωμάτων αλλά και της διαδικασίας παραγωγής, υπάρχει παραγωγή ασβεστολιθικής άμμου με 14 – 16% παιπάλης.

Πίνακας 1. Όρια ασφαλτικών στρώσεων.

Τύπος ασφαλτικής στρώσης	Παιπάλη	Επιτρεπόμενα όρια %
Βάση	A-260B	0-4%
	A-260Δ	0-4%
Ισοπεδωτική	A-265B	4-8%
Κυκλοφορίας	A-265B	5-12%

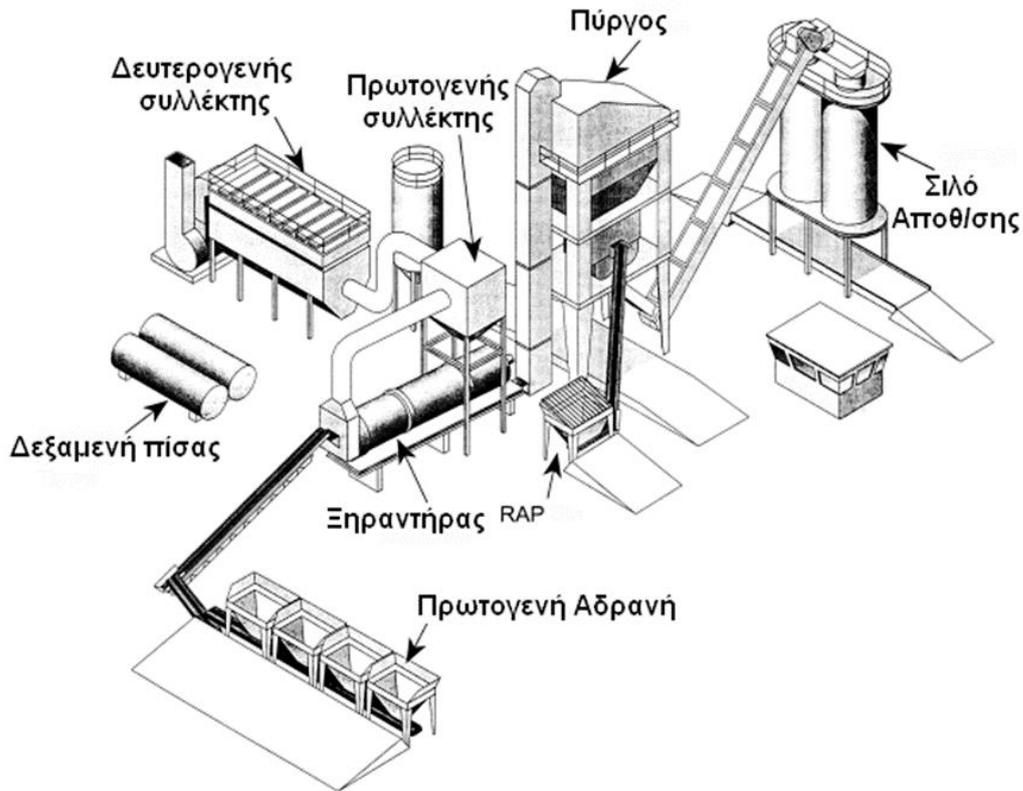
Είναι φανερό από το πίνακα 1, ότι περισσεύει ανά στρώση αρκετό υλικό, που συσσωρεύεται γιατί δε μπορεί να επαναισαχθεί στα ασφαλτικά μίγματα.

2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΣΥΛΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ

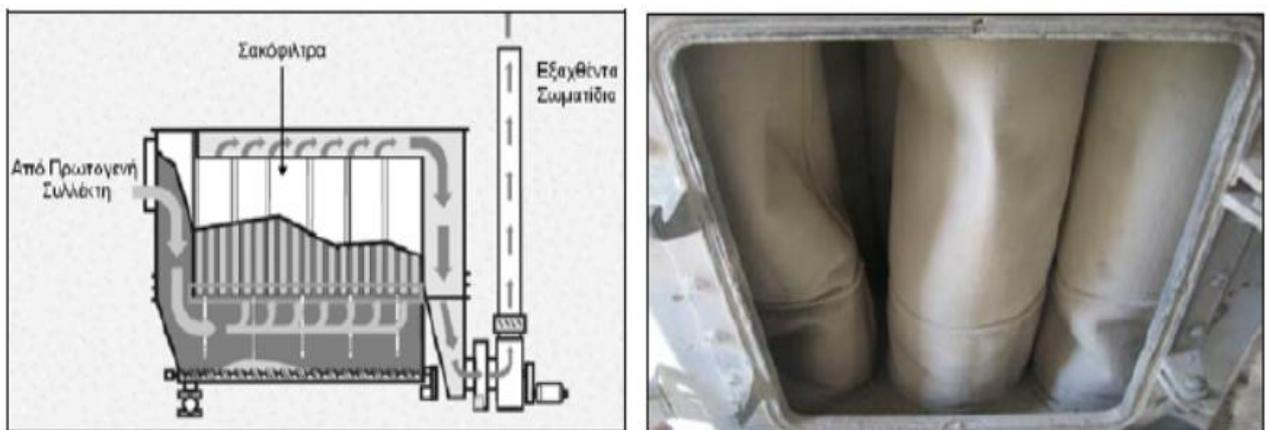
Τα υγρά αδρανή υλικά, μεταφέρονται με ταινία στο περιστρεφόμενο μεταλλικό κύλινδρο (ξηραντήρας) όπου ξηραίνονται, αποβάλλουν την υγρασία τους και αποκτούν την επιθυμητή θερμοκρασία. Στον ξηραντήρα υπάρχει προσαρτημένο σύστημα απαγωγής σκόνης, για τη μείωση της ατμοσφαιρικής σκόνης, στον οποίο (ειδικά υφασμάτινα κυρίως) φίλτρα συγκρατούν το μεγαλύτερο μέρος της σκόνης. Ακολούθως μεταφέρεται στο δευτερογενή συλλέκτη. Σε κάποια ασφαλτικά συγκροτήματα υπάρχει μεταλλικό σιλό για τη προσωρινή αποθήκευση της παιπάλης, το οποίο όμως δεν επαρκεί για την αποθήκευση της παραγωγής οπότε η παιπάλη αποτελεί ένα συνεχώς διογκούμενο πρόβλημα.

Τα θερμά αδρανή μεταφέρονται στη μονάδα διαχωρισμού με κατακόρυφο σύστημα κάδων, όπου διαχωρίζονται σε κλάσματα και αποθηκεύονται προσωρινά σε θαλάμους (διαμερίσματα). Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με μία σειρά από κόσκινα, τα οποία είναι τοποθετημένα ακριβώς επάνω από τους θαλάμους αποθήκευσης. Από τους θαλάμους προσωρινής αποθήκευσης λαμβάνονται διαδοχικά ποσότητες αδρανών, οι οποίες αφού ζυγιστούν ανακατεύονται για καθορισμένο χρόνο στο mixer με ήδη προζυγισθείσα άσφαλτο.

Ο ξηραντήρας αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο μεταλλικό κύλινδρο και έναν καυστήρα ελαίου ή αερίου. Ο καυστήρας στο Συγκρότημα Παραγωγής ανά παρτίδες, είναι τοποθετημένος στο κατώτατο άκρο του τυμπάνου, δηλαδή στο άκρο της εξόδου.



Σχήμα 1. Παρασκευαστήριο Ασφαλτοσκυροδέματος.



Σχήμα 2. Συλλογή παιπάλης – υφασμάτινα φίλτρα.

Η παιπάλη στα συνήθη σκυροδέματα δε μπορεί να απορροφηθεί εύκολα γιατί δε μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια η υγρασία απορρόφησης μιας και δεν υπάρχει πρότυπη δοκιμή. Υπάρχει εμπειρική δοκιμή μέτρησης και έχει αναφερθεί η εφαρμογή της σε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, ως πληρωτικό υλικό. Παράλληλα η άμμος σκυροδεμάτων, έχει περίπου την ίδια ποσότητα παιπάλης 14 -16%, ποσοστό που είναι ήδη αρκετό.

Στο πίνακα 2 υπάρχει η χημική σύσταση του υλικού που δείχνει τη σύσταση του μητρικού υλικού:

Πίνακας 2. Χημική σύσταση (%κ.β.) της παιπάλης.

Παιπάλη	
SiO ₂	14.03
CaO	67.9
Na ₂ O	0.236
Al ₂ O ₃	0.00
MgO	2.3
K ₂ O	0.630
Fe ₂ O ₃	1.37
TiO ₂	1.05
SO ₃	0,35
LOI	55,87

Χαρακτηριστική είναι επίσης η κοκομετρία παιπάλης από διάφορα ασφαλτικά παρασκευαστήρια στις ΗΠΑ.

Πίνακας 3. Κοκομετρία παιπάλης από στοιχεία ασφαλτικών παρασκευαστηρίων ΗΠΑ.

Υλικό	0,6(mm)	0,3(mm)	0,075(μm)
Μέγιστο	100	100	100
Ελάχιστο	95	82	28

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Μια πιθανή χρήση θα μπορούσε να αφορά τα προϊόντα ελαφράς προκατασκευής, όπως το τσιμεντένιο κεραμίδι. Το προϊόν αυτό παράγεται ως ύφυγρο σκυρόδεμα, χωρίς καλούπι, dry cast, με αυξημένη «πράσινη δύναμη», με extruder, χωρίς δόνηση. Έτσι επιλέχθηκε η εταιρεία ΑΛΜΑ Κεραμίδι στη Χαλάστρα Θεσσαλονίκης, όπου διέθεσε το χώρο, τα υλικά, τον εξοπλισμό και τις εγκαταστάσεις για τις δοκιμές.

Πίνακας 4. Τυπική σύνθεση τσιμεντένιου κεραμιδιού

Φυσική άμμος	1650 κιλά/ κυβικό
Τσιμέντο	450 κιλά/ κυβικό
Νερό	175 κιλά/ κυβικό
Πιγμέντο	10 κιλά/ κυβικό

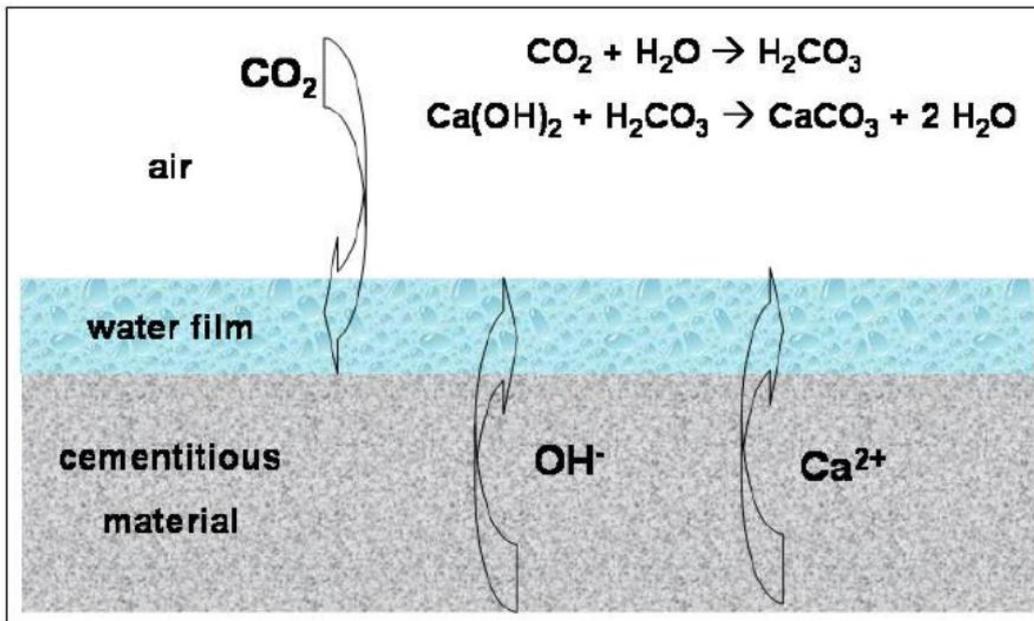


Σχήμα 3. Τσιμεντένιο κεραμίδι.

Ένα εποχικό πρόβλημα που υπάρχει στα ύφυγρα σκυροδέματα είναι η εξάνθιση (efflorescence) και επίσης η κακή τελική επιφάνεια.

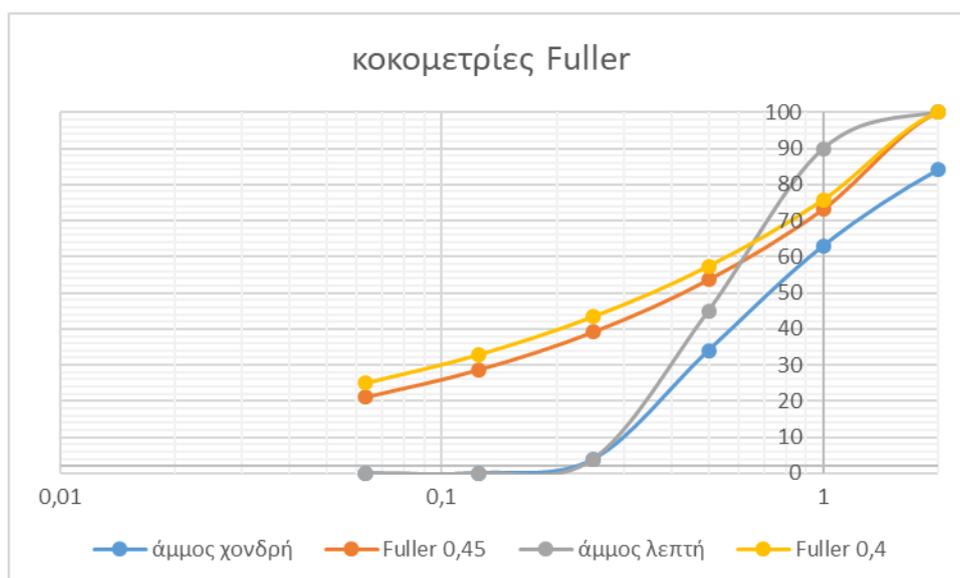
Η εξάνθιση χωρίζεται σε πρωτογενή – δευτερογενή – τριτογενή, είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, συνδέεται με την εμφάνιση της επιφάνειας, από το γεγονός της ύπαρξης κενών λόγω της έλλειψης λεπτόκοκκων υλικών αλλά και με την ύπαρξη τριχοειδών όπου το νερό μεταφέρει άλατα στην επιφάνεια που λόγω εξάτμισης αποτίθενται. Είναι ένα εποχικό φαινόμενο που επηρεάζεται από τη περιοδικότητα ατμοσφαιρικής υγρασίας - μεταβολής θερμοκρασίας.

Το φαινόμενο αντιμετωπίζεται ανά περίπτωση, με τη προσθήκη υγρών ή στερεών προσθέτων, με τη χρήση σωστής κοκκομετρίας πρώτων υλών, σταγανοποιητικών επαλείψεων και βελτίωσης συνθηκών συντήρησης.



Σχήμα 4. Εξάνθιση σε τσιμεντοειδές υλικό.

Δύο διαφορετικές φυσικές άμμοι προσκομίστηκαν, και οι κοκκομετρίες δείχνουν φανερά ότι υπάρχει έλλειμμα υλικού στο κλάσμα της άμμου 0,5 έως το 0,063 mm:



Σχήμα 5. Σύγκριση άμμων με απλοποιημένο μοντέλο Fuller.

Το κενό αυτό καλείται να καλύψει λόγω μεγέθους κόκκων, η απορριφθείσα παιπάλη.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικά αναμίγματα όπου ποσοστό επί της παιπάλης εισήχθη στη πιο χοντρή άμμο. Τα ποσοστά προσθήκης κυμάνθηκε από 4,5% έως 10% κ.β. της άμμου. Παρατηρήθηκαν τα εξής:

Για μεγάλα ποσοστά εισαγωγής υπήρχε μια ανεπιθύμητη πλαστικότητα της τελικής επιφάνειας, υπάρχει δηλαδή ένα σημείο κορεσμού όπου περαιτέρω προσθήκη, προκαλεί προβλήματα

Το βέλτιστο ποσοστό για την συγκεκριμένη εφαρμογή, ήταν το 5%, όπου βελτιώθηκε η τελική επιφάνεια, ενώ είχαμε ισοδύναμη αντοχή, ελαττώθηκε η υδατοαπορροφητικότητα του τελικού προϊόντος, και έτσι δε παρατηρήθηκε εξάνθιση του κεραμιδιού που ήταν και ο πρωταρχικός στόχος.

Σημαντική εξοικονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί από τη χρήση του υλικού, απαιτείται όμως αυτοματισμός και ζύγιση του υλικού για να αποφευχθεί το πρόσθετο εργατικό κόστος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Handbook 2000, Hot-Mix Asphalt Paving, (2000).
- NAPA, Evaluation of Baghouse Fines for Hot Mix Asphalt, (1999).
- Νικολαΐδης, Αθ. Φ. Οδοποιία Οδοστρώματα-Υλικά Έλεγχος Ποιότητας, (1996).
- Kuch/Schwabe/ Palzer Manufacturing of concrete Products and Precast Elements, (2009).
- Collins, Robert J. and Stanley Ciesielski. Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction, Washington DC, (1994).
- Dow, C. and Glasser, F.P. Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials. Cement and Concrete Research, 33, 147-154, (2003).
- Λυκούδης Σπ., Χρήση της απορριφθείσας παιπάλης Ασφαλτικού Συγκροτήματος ως Πληρωτική Κονία για Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος, (2009).

Έλεγχος δραστηριότητας με ιπτάμενη τέφρα και αλκαλική ενεργοποίηση λούμης

Φ. Κεσικίδου, Ι. Αγαθαγγελίδης, Στ. Κονοπίση, Ε. Αναστασίου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: λούμη, ιπτάμενη τέφρα, αλκαλική ενεργοποίηση,

Περίληψη: Η ολοένα αυξανόμενη παραγωγή σκυροδέματος με χρήση παραπροϊόντων, οδηγεί σε πλήθος τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών, που συμβάλουν στη διατήρηση και βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του πλανήτη. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της χρήσης παραπροϊόντων όπως η λούμη και η ιπτάμενη τέφρα. Δημιουργήθηκαν μια σειρά από συνθέσεις κονιαμάτων με και χωρίς τη χρήση αλκαλικού ενεργοποιητή με σκοπό τον έλεγχο της δραστηριότητας της λούμης και την εύρεση της βέλτιστης αναλογίας με στόχο την ανάπτυξη αντοχών. Μετρήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων (καμπτική και θλιπτική αντοχή) στις 7, 28 και 90 ημέρες. Προσδιορίστηκε το πορώδες των συνθέσεων και η σταθερότητα όγκου στις 28 ημέρες.

Investigation of activity index with fly ash and alkali-activation of cement sludge

F. Kesikidou, I. Agathagelidis, St. Konopisi, E. Anastasiou

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Keywords: sludge, fly ash, alkali-activation

Abstract: The increasing production of concrete by using by-products leads to several technical, economic and environmental benefits that contribute to preserve and improve the environmental footprint of the planet. The aim of this research is to investigate the use of by-products like cement sludge and fly ash. Several mortar mixtures were produced in order to test the activity index of cement sludge and specify the optimum ratio of the binders for strength development. Flexural and compressive strength of the mortars were measured at the ages of 7, 28 and 90 days. Porosity and shrinkage of the specimens were also determined.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις των χωρών ανά τον κόσμο και η συνεχής χρήση του σκυροδέματος ως βασικό υλικό δόμησης, έχουν οδηγήσει στην υπέρμετρη αύξηση των παραγόμενων παραπροϊόντων αφενός του λιγνίτη (όπως η ιπτάμενη τέφρα), λόγω της σχεδόν αποκλειστικής καύσης του στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και αφετέρου του σκυροδέματος, λόγω της έκπλυσης των οχημάτων μεταφοράς του (λούμη)(Xi, 2019)(Zervaki, 2013). Έτσι αναπτύχθηκε η ανάγκη εύρεσης μεγαλύτερων χώρων ασφαλούς απόθεσης των υλικών αυτών, αλλά και η ανάγκη εύρεσης τρόπων αξιοποίησής τους σε ένα μεγάλο εύρος διαδικασιών, με χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό της παραγωγής σκυροδέματος ικανοποιητικών προδιαγραφών, με χρήση παραπροϊόντων.

Σε αυτά τα πλαίσια, τις τελευταίες δεκαετίες, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μελέτη της αλκαλικής ενεργοποίησης, η οποία αποτελεί έναν χημικό μηχανισμό κατά τον οποίο κονίες αργιλοπυριτικά υλικά μπορούν να μετατραπούν σε χρήσιμα, με βελτιωμένες ιδιότητες προϊόντα (Provis,2014) (Papayianni, 2014).

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δραστηριότητα της λούμης σε συνδυασμό με την ιπτάμενη τέφρα και μέσω του μηχανισμού της αλκαλικής ενεργοποίησης. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν συνθέσεις κονιαμάτων με ιπτάμενη τέφρα και λούμη σε διαφορετικά ποσοστά με και χωρίς την προσθήκη αλκαλικού ενεργοποιητή. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων για τις 7, 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Ως πρώτες ύλες χρησιμοποιήθηκαν ιπτάμενη τέφρα από τον ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου και λούμη της εταιρίας TITAN. Η λούμη χρησιμοποιήθηκε κοσκινισμένη και αλεσμένη σε λεπτότητα άλεσης <75μm και <200μm. Τα αποτελέσματα από τη χημική ανάλυση (Πίνακας 1) δείχνουν ότι οι πρώτες ύλες έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδια του ασβεστίου. Συγκεκριμένα, η ιπτάμενη τέφρα με υψηλό ποσοστό CaO (22,58%) και CaO_{free} (5,61%) κατατάσσεται στην κατηγορία των τεφρών υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (ASTM C618). Επιπλέον, φαίνεται ότι το κλάσμα της λούμης <200μm έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε οξείδια του πυριτίου (15,01%) σε σχέση με το <75μm (2,28%) και μικρότερη περιεκτικότητα σε οξείδια του ασβεστίου (39,95%).

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση πρώτων υλών

Δείγμα	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	A.Π. %	pH
Ιπτάμενη τέφρα	0,92	1,14	22,58	1,87	5,08	17,85	46,83	2,92	13,75
Λούμη <75μm	0,18	0,28	53,40	2,58	1,96	3,20	2,28	35,42	13,22
Λούμη <200μm	0,18	0,09	39,95	1,56	1,18	3,55	15,01	38,17	11,87

Δημιουργήθηκαν 12 διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων με διαφορετικά ποσοστά τέφρας και λούμης. Αρχικά έγινε η σύνθεση απλά ενυδατωμένων κονιαμάτων με τέφρα και λούμη σε διαφορετικά ποσοστά (F, FS20, FS30, FS50, FS50 και FS60). Το κλάσμα της λούμης που χρησιμοποιήθηκε ήταν <75μm. Έπειτα, προκειμένου να αξιολογηθεί η δραστηριότητα της λούμης παρασκευάστηκε μία σύνθεση με ιπτάμενη τέφρα και ασβεστολιθικό φύλλερ (FF). Στη συνέχεια με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκαν άλλες πέντε αλκαλικά ενεργοποιημένες συνθέσεις (AF, AFS20, AFS50, AN και AT). Για τις AF, AFS20 και AFS50 χρησιμοποιήθηκε λούμη με κοκκομετρία <75μm. Αντιθέτως, για τις AN και AT χρησιμοποιήθηκε κλάσμα <200μm. Επιπλέον, η σύνθεση AT τοποθετήθηκε για ωρίμανση σε κλίβανο στους 40ο C για 24 ώρες. Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι αναλογίες των συνθέσεων. Σε όλες τις συνθέσεις ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι 1:3 και έγινε προσπάθεια ο λόγος υγρών/κονιάς να διατηρηθεί σταθερός, προσαρμόζοντας αντίστοιχα το ποσοστό του ρευστοποιητή (πολυκαρβοξυλικής βάσης) με στόχο την κατάλληλη εργασιμότητα. Ως αλκαλικός ενεργοποιητής χρησιμοποιήθηκε διάλυμα που αποτελούταν από 64% νερό, 18% NaOH (καυστικό νάτριο) και 18% Na₂SiO₃(πυριτικό νάτριο). Η εργασιμότητα ελέγχθηκε με τη μέθοδο της τράπεζας εξάπλωσης σύμφωνα με το πρότυπο EN196-3.

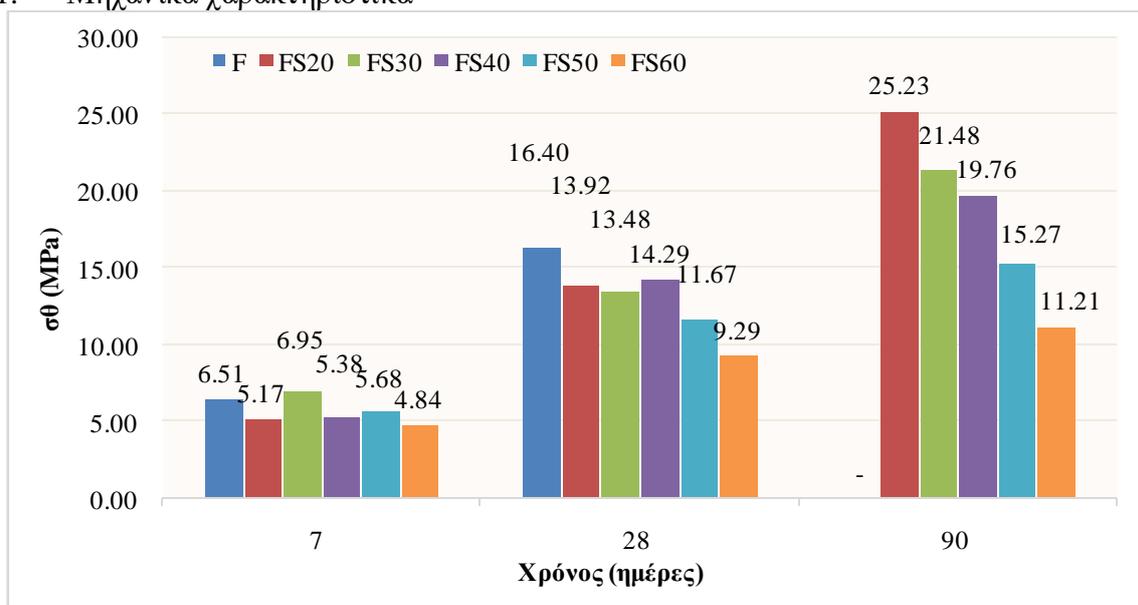
Πίνακας 2. Αναλογίες συνθέσεων

Κωδικός σύνθεσης	Ιπτάμενη Τέφρα	Λούμη	Υγρά/Κονία	Ρευστοποιητής % κ.β. κονίας	Εξάπλωση (cm)	
F	1	-	0,67	3,00	14,00	11,80
FS20	0,8	0,2	0,6	3,00	13,50	15,50
FS30	0,7	0,3	0,6	3,00	15,50	16,00
FS40	0,6	0,4	0,6	1,50	13,40	13,60
FS50	0,5	0,5	0,6	1,50	13,50	13,50
FS60	0,4	0,6	0,6	1,50	12,80	12,50
FF	0,5	0,5	0,6	-	10,90	11,30
AF	1	-	0,73	3,00	11,20	12,40
AFS20	0,8	0,2	0,67	3,00	15,70	14,50
AFS50	0,5	0,5	0,67	2,00	15,80	16,40
AN	0,7	0,3	0,67	3,00	11,50	12,20
AT	0,7	0,3	0,67	3,00	12,70	12,80

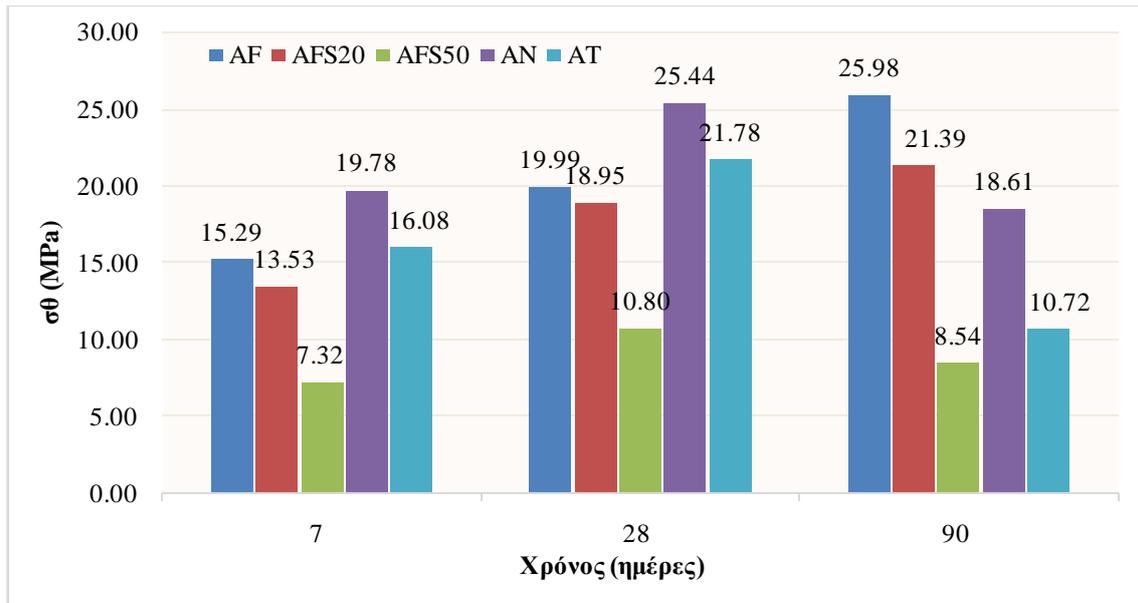
Δημιουργήθηκαν δοκίμια διαστάσεων (40x40x160) mm, τα οποία αφού ξεκαλουπώθηκαν συντηρήθηκαν σε υγρές λινάτσες μέχρι τον έλεγχο τους. Μετρήθηκαν η αντοχή σε κάμψη και θλίψη στις 7, 28 και 90 ημέρες σύμφωνα με το πρότυπο EN1015-11. Προσδιορίστηκε το πορώδες το συνθέσεων στις 28 ημέρες ακολουθώντας τη μέθοδο RILEM CPC 11.3 και καταγράφηκε η σταθερότητα όγκου των δοκιμίων για τις πρώτες 28 ημέρες σε θάλαμο με σταθερές συνθήκες (20° C και 50% RH).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Μηχανικά χαρακτηριστικά



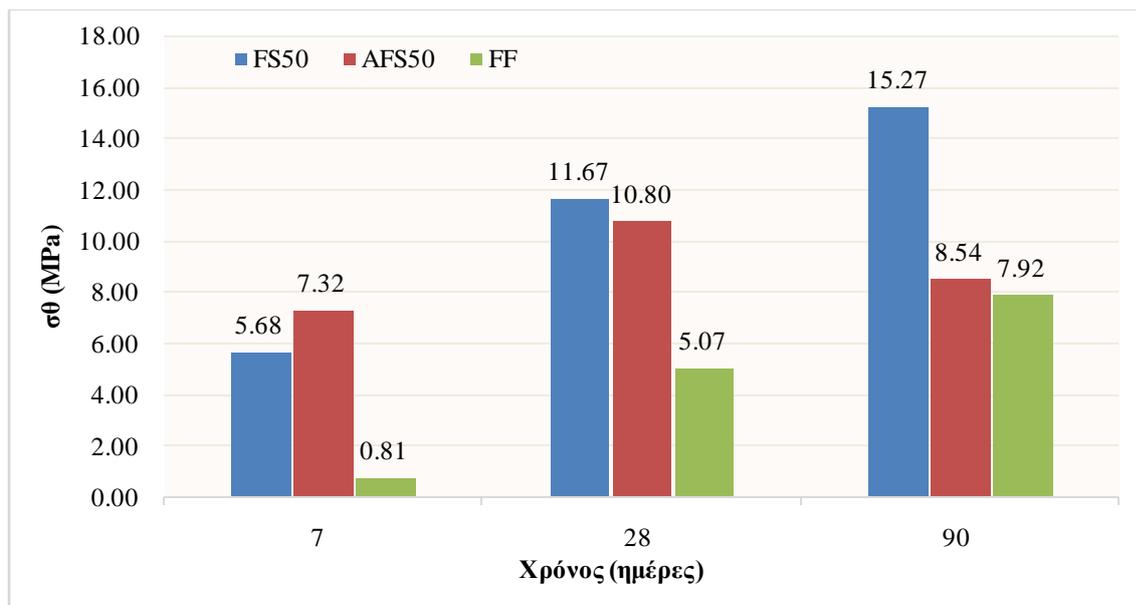
Διάγραμμα 1. Θλιπτική αντοχή των απλά ενυδατωμένων συνθέσεων



Διάγραμμα 2. Θλιπτική αντοχή των αλκαλικά ενεργοποιημένων συνθέσεων

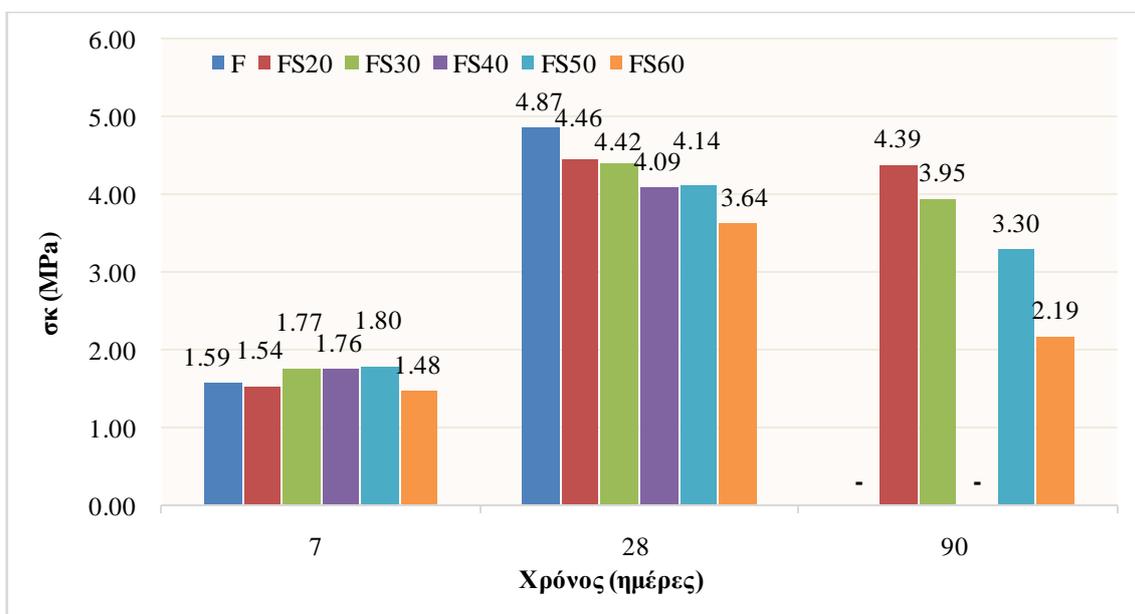
Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής για τις συνθέσεις χωρίς αλκαλική ενεργοποίηση για τις 7, 28 και 90 ημέρες. Συνολικά, παρατηρείται ότι η αύξηση του ποσοστού της λούμης οδηγεί σε μείωση της αντοχής μακροπρόθεσμα. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση μόνο ιπτάμενης τέφρας ως κονία, οδηγεί σε σχετικά υψηλά επίπεδα αντοχών και οι βέλτιστες αναλογίες ιπτάμενης τέφρας - λούμης, που οδηγούν στην ανάπτυξη υψηλών αντοχών, τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα, είναι 80%-20%, 70%-30% και 60%-40%, ενώ με την αύξηση του ποσοστού λούμης άνω του 40% παρατηρούνται χαμηλά επίπεδα πρόωρης αντοχής 7 ημερών και αισθητά χαμηλότερη μακροπρόθεσμη αύξηση αντοχών ως και τις 90 ημέρες.

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζονται οι τιμές από τον έλεγχο της θλιπτικής αντοχής όλων των αλκαλικά ενεργοποιημένων συνθέσεων. Η προσθήκη του αλκαλικού ενεργοποιητή οδηγεί σε διπλασιασμό της αντοχής (σύνθεση AF) από τις πρώτες 7 ημέρες συγκριτικά με την απλά ενυδατωμένη σύνθεση F (Διάγραμμα 1). Η αύξηση αυτή αν και μικρότερη, συνεχίζει με την πάροδο του χρόνου για τις 28 και 90 ημέρες. Όπως φαίνεται, η αντικατάσταση της τέφρας με λούμη (<75μm) σε ποσοστά 20% (AFS20) και 50% (AFS50) οδηγεί σε μείωση των αντοχών. Ωστόσο, η κοκκομετρία της λούμης δείχνει να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη των αντοχών, καθώς για τις συνθέσεις με κλάσμα <200μm, οι αντοχές παρουσιάζουν αύξηση της τάξης του 30% (σύνθεση AN). Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη χημική ανάλυση των πρώτων υλών (Πίνακας 1), καθώς το χονδρόκοκκο κλάσμα της λούμης έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε οξείδια του πυριτίου (15,01%) σε σχέση με το μικρότερο των 75μm κλάσμα (2,28%). Επιπλέον, είναι φανερό ότι η συντήρηση σε φούρνο για 24 ώρες στους 40ο C δεν ευνοεί περαιτέρω τις αντοχές (σύνθεση AT). Ωστόσο, στις 90 ημέρες, υπάρχει μια πτώση της αντοχής των συνθέσεων AN και AT, κάτι που πιθανόν να οφείλεται στη συντήρηση των δοκιμίων.

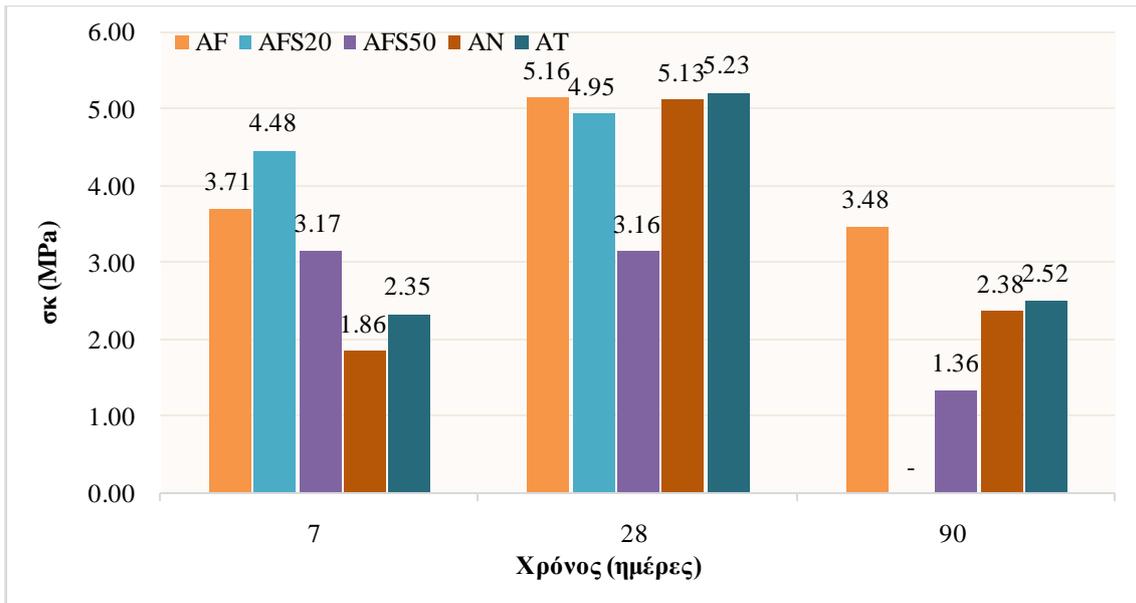


Διάγραμμα 3. Θλιπτική αντοχή των συνθέσεων FS50, AFS50, FF

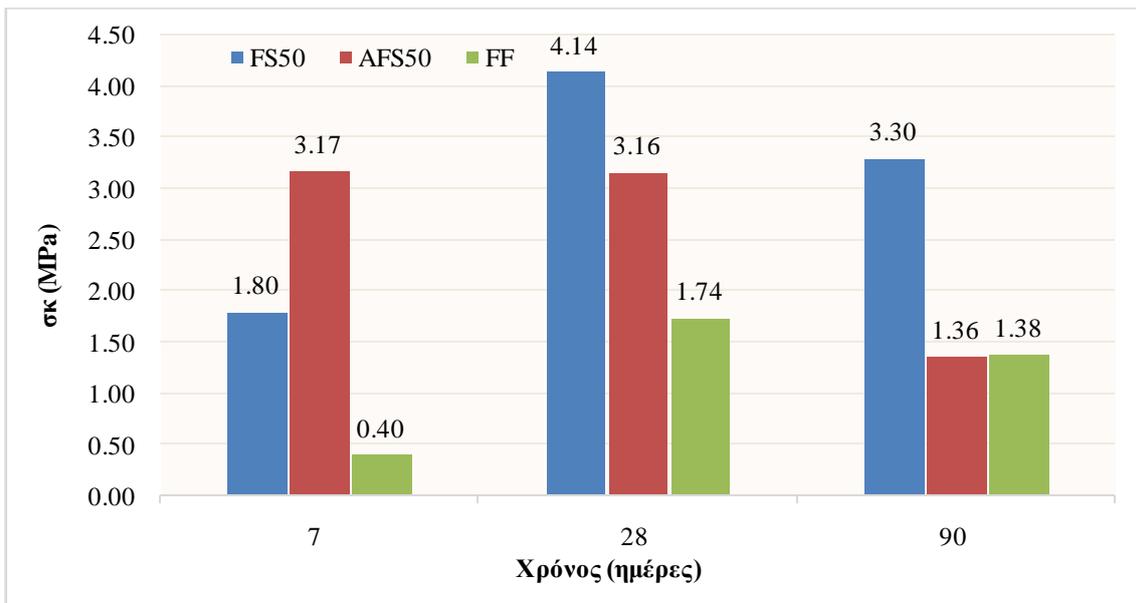
Στο Διάγραμμα 3 φαίνονται οι τιμές της θλίψης για τις συνθέσεις με 50% λούμη (με και χωρίς αλκαλική ενεργοποίηση) και της σύνθεσης με 50% ασβεστολιθικό φύλλερ. Παρατηρείται ότι για τις πρώτες 7 ημέρες η αλκαλικά ενεργοποιημένη σύνθεση (AFS50) παρουσιάζει μια αύξηση 28% σε σχέση με την απλά ενυδατωμένη FS50, που όμως δεν συνεχίζεται με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, είναι φανερό ότι η λούμη συμμετέχει ενεργά ως κονία και δεν λειτουργεί ως φύλλερ, καθώς όπως παρατηρείται στη σύνθεση FF η θλιπτική αντοχή είναι πολύ χαμηλή και ιδιαίτερα στις 7 ημέρες είναι μόλις 0,81MPa. Την ίδια πορεία ακολουθούν γενικά και τα αποτελέσματα του ελέγχου κάμψης των δοκιμίων που παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4 έως 6.



Διάγραμμα 4. Καμπτική αντοχή απλά ενυδατωμένων συνθέσεων



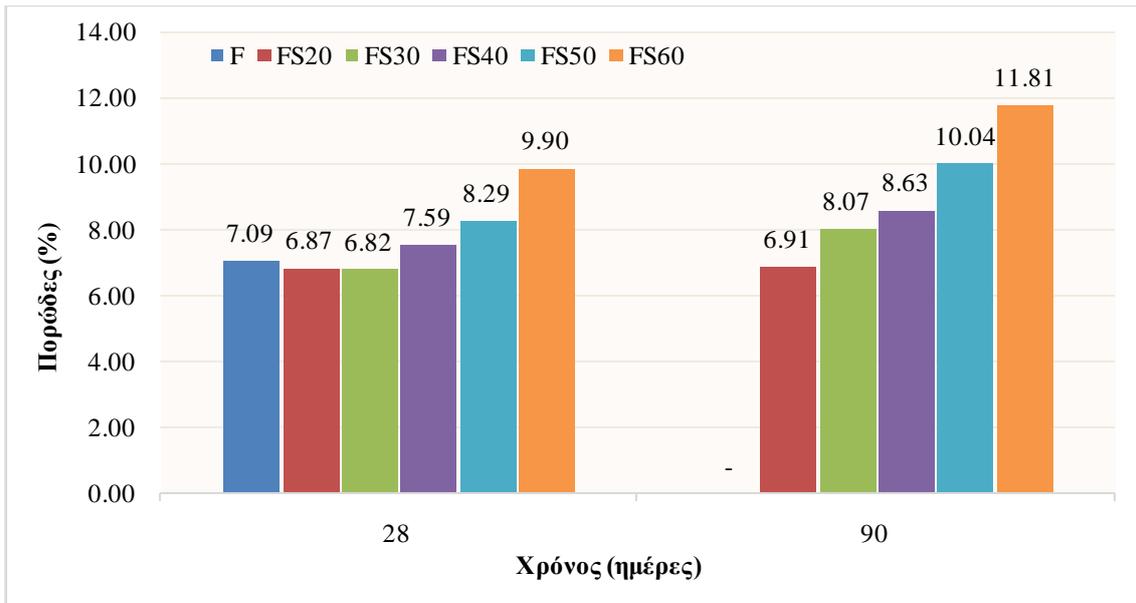
Διάγραμμα 5. Καμπτική αντοχή αλκαλικά ενεργοποιημένων συνθέσεων



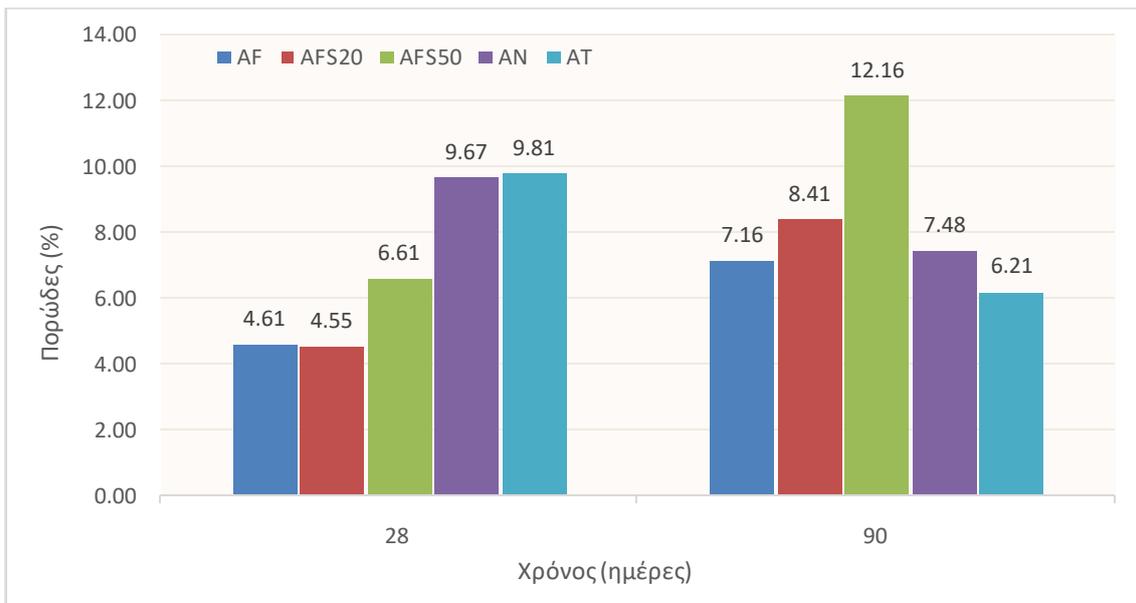
Διάγραμμα 6. Καμπτική αντοχή των συνθέσεων FS50, AFS50, FF

3.2. Φυσικά χαρακτηριστικά

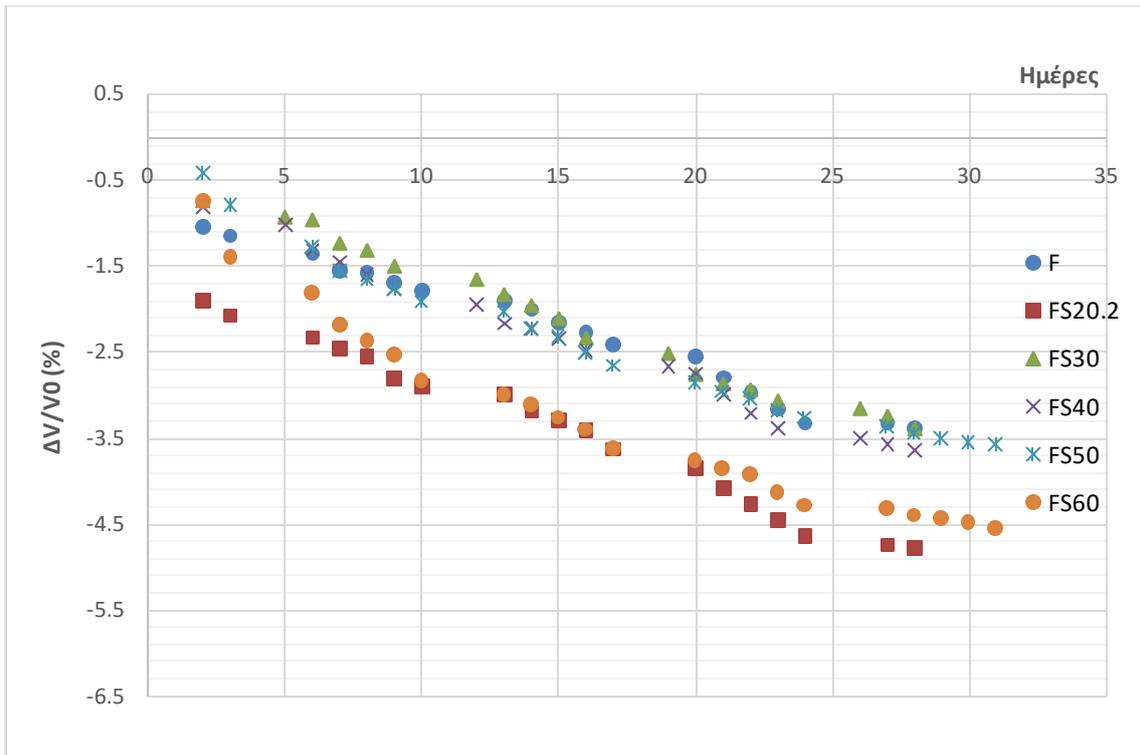
Η αύξηση του ποσοστού της λούμης οδηγεί σε αύξηση του πορώδους των κονιαμάτων, όπως προκύπτει από τα Διαγράμματα 7 και 8. Η προσθήκη του αλκαλικού ενεργοποιητή μείωσε το πορώδες των συνθέσεων, ιδιαίτερα στις 7 πρώτες ημέρες. Οι τιμές αυτές ακολουθούν την πορεία ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής, με εξαίρεση τις δύο συνθέσεις AN και AT, όπου η αύξηση του πορώδους συνοδεύεται με την αύξηση των αντοχών.



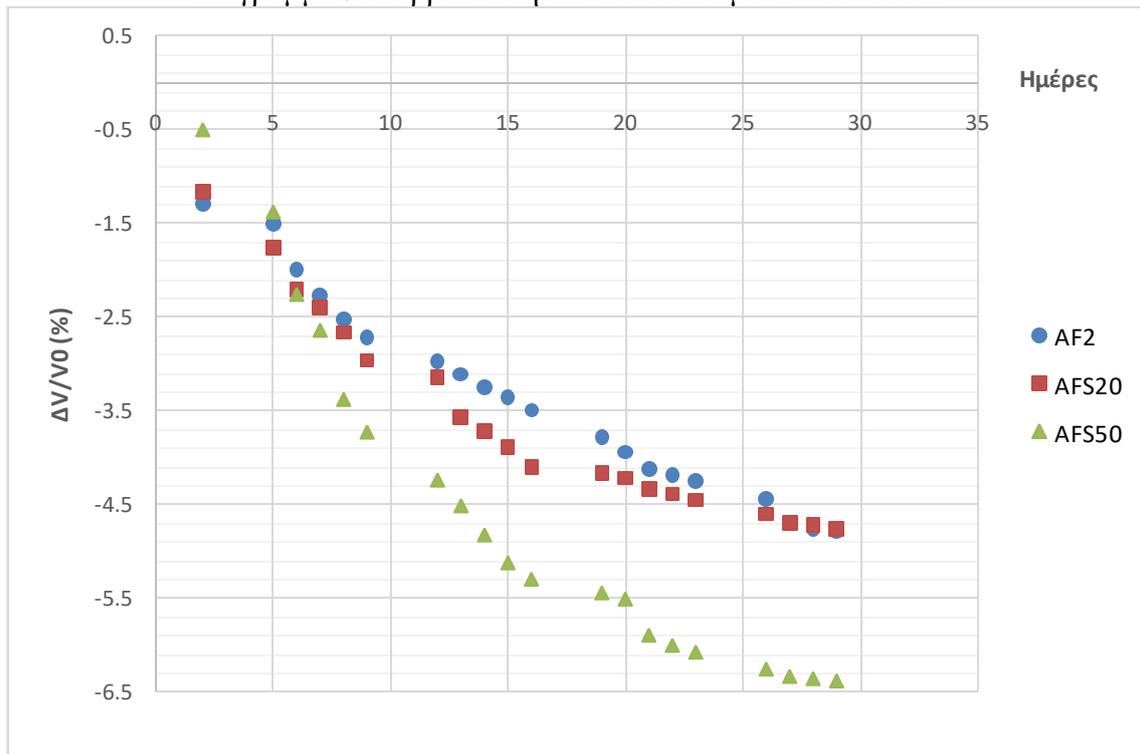
Διάγραμμα 7. Πορώδες απλά ενυδατωμένων συνθέσεων



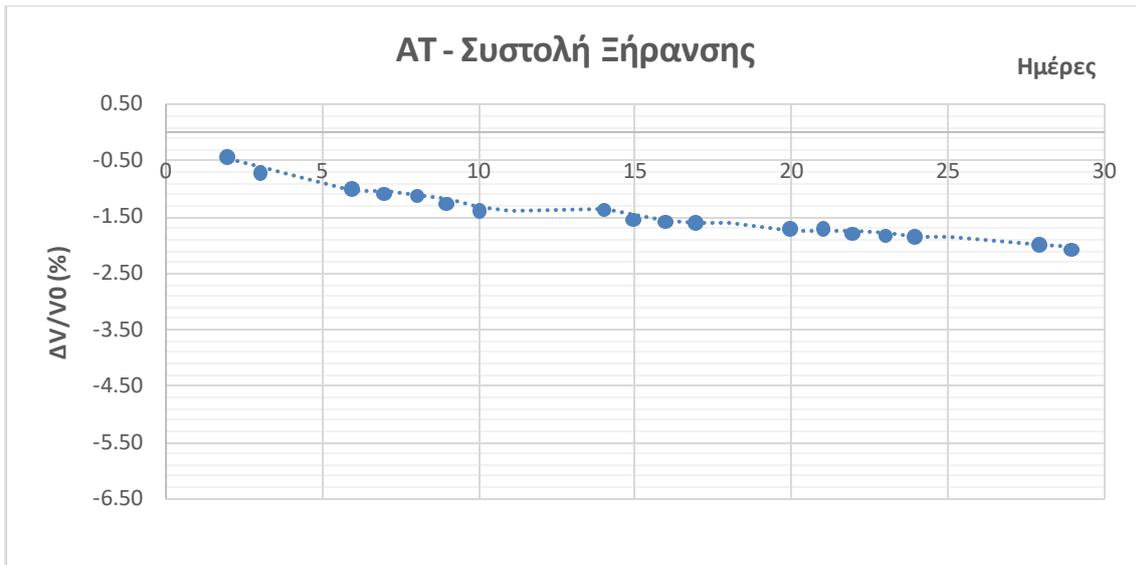
Διάγραμμα 8. Πορώδες αλκαλικά ενεργοποιημένων συνθέσεων



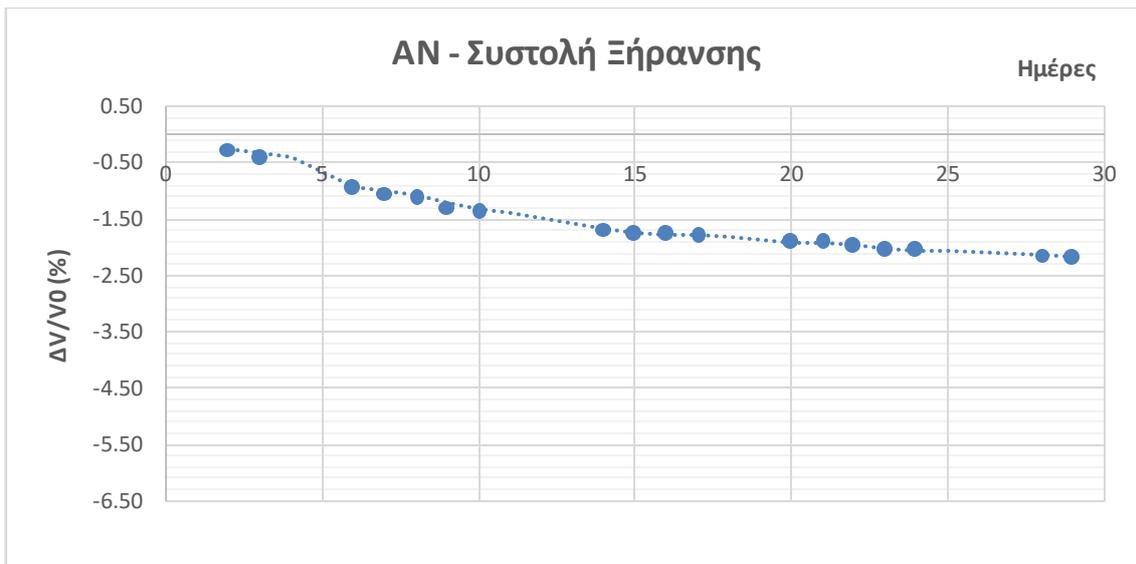
Διάγραμμα 9. Συρρίκνωση απλά ενυδατωμένων συνθέσεων



Διάγραμμα 9. Συρρίκνωση αλκαλικά ενεργοποιημένων συνθέσεων (λούμη <75μm)



Διάγραμμα 10. Συρρίκνωση αλκαλικά ενεργοποιημένης σύνθεσης με θέρμανση (λούμη <200μm)



Διάγραμμα 11. Συρρίκνωση αλκαλικά ενεργοποιημένης σύνθεσης με λούμη (λούμη <75μm)

Σχεδόν όλες οι συνθέσεις παρουσιάζουν έντονη μεταβολή του όγκου τους, από περίπου 2,50 μέχρι 6,00% με τη σταθεροποίηση αυτού να εμφανίζεται περίπου στις 20 - 22 ημέρες. Εξαιρέση αποτελούν οι συνθέσεις με χρήση ποσοστού λούμης (<200μm) 30% και προσθήκη αλκαλικού ενεργοποιητή. Οι συνθέσεις αυτές παρουσιάζουν εμφανώς μικρότερη μεταβολή του όγκου τους, περίπου 2,00% και σταθεροποίηση αυτού, για τη μεν σύνθεση με ωρίμανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος στις 15 ημέρες και τη δε σύνθεση με ωρίμανση στους 40°C στις 10 ημέρες. Η αντίστοιχη σύνθεση με νερό εμφανίζει μεταβολή όγκου περίπου 3% και σταθεροποίηση στις 22 περίπου ημέρες.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, προκύπτει η λούμη συμμετέχει ενεργά ως κονία στην ανάπτυξη αντοχών και δεν δρα ως φύλλερ. Με την προσθήκη του αλκαλικού ενεργοποιητή τα κονιάματα με αναλογία 70% ιπτάμενη τέφρα και 30% λούμη άγγιξαν τα 25MPa στις 28 ημέρες. Ωστόσο, περαιτέρω διερεύνηση απαιτείται για τη εύρεση της κατάλληλης λεπτότητας άλεσης, της βέλτιστης αναλογίας των κονιών και του αλκαλικού ενεργοποιητή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Y. Xi, E. Anastasiou, A. Karozou, S. Silvestri, Fresh and hardened properties of cement mortars using marble sludge fines and cement sludge fines, *Construction and Building Materials*, Volume 220, 2019, 142-148
- Monika Zervaki, Christos Leptokaridis, Stamatis Tsimas, “Reuse of By-Products from Ready-Mixed Concrete Plants for the Production of Cement Mortars”, article, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2013
- Provis J.L., van Deventer J.S.J.: *Alkali-activated Materials - State of the Art Report*, RILEM TC 224-AAM, ISBN 978-94-007-7671-5, 2014
- Papayianni I, Konopisi S, Datsiou K and Kesikidou F (2014) Products of alkali-activated calcareous fly ash and glass cullet. *Int. J. Res. in Eng. and Technology* 03 (13), 43-51