

Ανάπτυξη και έλεγχος κονιαμάτων με αυξημένα πυράντοχα και θερμομονωτικά χαρακτηριστικά

Σ. Μουσιάδης, Μ. Παπαχριστοφόρου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, κονιάματα, ξυλάνθρακας, πυροπροστασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Καταστροφικές πυρκαγιές και ανθρώπινα θύματα έθεσαν στο προσκήνιο την ανάγκη δημιουργίας προδιαγραφών πυροπροστασίας. Στη φύση υπάρχουν πολλά ορυκτά που ύστερα από επεξεργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτικά υλικά πυροπροστασίας στις κατασκευές. Ωστόσο, η επεξεργασία τους απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας και ενέχουν περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Στην παρούσα εργασία ελέγχεται η χρήση κονιορτοποιημένου ξυλάνθρακα ως πρόσθετο για την παραγωγή κονιαμάτων επιχρίσματος με αυξημένα πυράντοχα και θερμομονωτικά χαρακτηριστικά. Προϊόντα απόσταξης λιθανθράκων (οπτάνθρακες) έχουν χρησιμοποιηθεί για τη θωράκιση των διαστημοπλοίων ενάντια στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών κατά την είσοδο τους στην ατμόσφαιρα. Κατ' αναλογία εξετάζεται η χρησιμοποίηση του ξυλάνθρακα, ο οποίος προέρχεται από την ξηρή απόσταξη των ξύλων και τη θέρμανση χωρίς αέρα ως βιοτεχνικό παραπροϊόν, για την πυροπροστασία κονιαμάτων και σκυροδεμάτων.

Development and testing of mortars with increased thermal insulation and fire resistant characteristics

Moysiadis S., M. Papachristoforou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: using industrial by-products, mortar, charcoal, fire protection.

ABSTRACT: Catastrophic fires and casualties have put forth the need for fire protection standards. In nature there are many minerals which, after processing can be used as fire insulating materials. However, their processing requires substantial amounts of energy and have a serious environmental impact. In this study, the use of powdered charcoal as an additive to produce mortar coating with increased thermal insulation and fire resistant characteristics is tested. Distillates of coal (coke) are used for shielding spacecraft against the development of high temperature on entering the atmosphere. Analogously it is examined the use of charcoal, which comes from the dry distillation of wood and heating air without an industrial by-product, to fire protective mortars and concretes.

1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Οι δυσοίωνες προβλέψεις για τη ζωή μας στο μέλλον, ως συνέπεια της υποβάθμισης του περιβάλλοντος και της πρόχειρης εκμετάλλευσης του, ωχριούν ως εντύπωση μπροστά σε δραματικά γεγονότα καταστροφής, όπου σε μικρή χρονική κλίμακα μπορεί να χαθούν πολλές ανθρώπινες ψυχές. Το τελικό αποτέλεσμα όμως είναι το ίδιο, το διακύβευμα της ζωής.

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των σύγχρονων ανθρώπων οδηγούν στη κατασκευή υποδομών με προκλητικές απαιτήσεις. Η έκθεση αυτών των κατασκευών σε ακραίες καταστροφικές συνθήκες δοκιμάζει τα όρια αντοχής τους και επαναπροσδιορίζει τις προδιαγραφές. Θα μπορούσαν να αναφερθούν πολλά παραδείγματα καταστροφής που έγιναν εφιαλτήριο για τη θέσπιση νέων προδιαγραφών. Ωστόσο, θα αναφερθούμε σε δυο γεγονότα που άλλαξαν γενικότερα τον τρόπο σκέψης των μηχανικών και των ανθρώπων.

Η πυρκαγιά στο τούνελ του Mont Blanc και η κατάρρευση των πύργων του Παγκόσμιου Κέντρου Εμπορίου στο Manhattan της Νέας Υόρκης. Και στις δύο περιπτώσεις η φωτιά και η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών ήταν τα αίτια της καταστροφής.

Τα γεγονότα αυτά, τα οποία συνέβησαν την ίδια περίπου χρονική περίοδο, αποτέλεσαν αφορμή για τον επαναπροσδιορισμό των προδιαγραφών και του σχεδιασμού της παθητικής πυροπροστασίας.

Τα μέσα παθητικής πυροπροστασίας που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι συνήθως προϊόντα επεξεργασίας εξορυγμένων υλικών με μεγάλες απαιτήσεις σε ενέργεια, η εξόρυξη των οποίων υποβαθμίζει το οικοσύστημα και το περιβάλλον. Επιπροσθέτως, πολλές φορές τα προϊόντα αυτά, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, αποτελούν και κίνδυνο για την υγεία.

Συνεπώς, το πρόβλημα επικεντρώνεται στο τρόπο προστασίας των κατασκευών από τη φωτιά και στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος και της διαβίωσης που προέρχεται από την εξόρυξη, τη παραγωγή και τη χρήση των υφιστάμενων υλικών πυροπροστασίας.

Η έρευνα εστιάζεται στη χρήση παραπροϊόντων από τη παραγωγή ξυλάνθρακα με σκοπό την ενθάρρυνση της μελέτης για την εξεύρεση λύσεων στα αναφερθέντα ζητήματα.

2 Ο ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε πυρκαγιές κτιρίων κατοικίας κυμαίνεται μεταξύ των 500°C και 650°C [1]. Οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στην καταστροφή του Παγκόσμιου Κέντρου Εμπορίου και στο τούνελ του Mont Blanc πιστεύεται ότι έφτασαν τους

900-1000°C [2]. Ο χάλυβας χάνει το 20% της αντοχής του στους 250°C. Το Σημείο Τήξης του Χάλυβα είναι 1500 °C.

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος στη φωτιά είναι αντικείμενο έρευνας και αρκετά περίπλοκη. Ένας από τους σημαντικότερους λόγους που το σκυρόδεμα είναι τόσο διαδεδομένο υλικό στον κατασκευαστικό τομέα είναι ότι μπορεί να διασφαλίσει τη δημόσια ασφάλεια και να αντιμετωπίσει τους κινδύνους της φωτιάς καλύτερα από οποιοδήποτε άλλα ανταγωνιστικά κατασκευαστικά υλικά [3]. Το σκυρόδεμα είναι άκαυστο και με λογικά θερμομονωτικά χαρακτηριστικά. Αν και κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς η επιφάνεια του μπορεί να αποφλοιωθεί ή να θρυμματιστεί, τα σημαντικά του μηχανικά χαρακτηριστικά παραμένουν συνήθως άθικτα. Ωστόσο, ο κύριος ρόλος του σκυροδέματος σε περίπτωση πυρκαγιάς είναι να προστατέψει το ενσωματωμένο σίδηρο από τη θερμότητα για όσο το δυνατό περισσότερο χρόνο, έως ότου η αύξηση της θερμοκρασίας του σιδήρου προκαλέσει μείωση της αντοχής του, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση της κατασκευής.

Μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες του σκυροδέματος είναι η αντοχή του σε θλίψη. Ο τρόπος που η φωτιά επηρεάζει αυτή την ιδιότητα είναι δύσκολο να προβλεφθεί και γενικά αποδεκτά συμπεράσματα είναι δύσκολο να εξαχθούν. Οι αιτίες είναι ότι η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε τέτοιες συνθήκες επηρεάζεται από τα φορτία που ενεργούν σε αυτό, από την περιεχόμενη υγρασία του, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, καθώς και από το χρόνο έκθεσης του στη φωτιά όπως επίσης και από το είδος των αδρανών, τη σύνθεση του και τον όγκο του. Ωστόσο κατά γενική ομολογία η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη και σε εφελκυσμό-κάμψη μειώνεται σημαντικά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Γενικά φαίνεται ότι μίγματα σκυροδέματος με μεγαλύτερο λόγο νερού τσιμεντού επιδέχονται μικρότερη μείωση της θλιπτικής αντοχής τους όταν εκτεθούν στη φωτιά. Η περιεχόμενη υγρασία είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει τη αντοχή και τη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες [4]. Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας συμβαίνουν διάφορες αλλαγές στη δομή της τσιμεντόπαστας και των αδρανών. Η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στην ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα εξαρτάται από το βαθμό ενυδάτωσης του τσιμεντού και την κατάσταση της υγρασίας. Μία κορεσμένη τσιμεντόπαστα περιέχει ποσότητες ελεύθερου, τριχοειδούς και προσροφημένου νερού. Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας αυτές οι ποσότητες νερού αρχίζουν να εξατμίζονται. Αν η διαπερατότητα της τσιμεντόπαστας, η οποία εξαρτάται από το λόγο νερού προς τσιμέντο, είναι χαμηλή και η θερμότητα υψηλή μπορεί να προκληθεί βλάβη στο σκυρόδεμα υπό τη μορφή επιφανειακού θρυμματισμού (spalling). Ο επιφανειακός θρυμματισμός (spalling) εμφανίζεται όταν η πίεση του ατμού μέσα στο υλικό αυξηθεί με ένα ρυθμό μεγαλύτερο από τον ρυθμό εκτόνωσης του ατμού στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 900°C επέρχεται πλήρης αποσύνθεση των ένυδρων άσβεστο πυριτικών ενώσεων (C-S-H) [5]. Επίσης, σε θερμοκρασίες άνω των 400 °C επέρχεται αποσύνθεση του υδροξειδίου του ασβεστίου σε ασβέστη. Έτσι, μετά την πτώση της θερμοκρασίας, αν το σκυρόδεμα εκτεθεί σε υγρασία η επανενυδάτωση του ασβέστη προκαλεί αύξηση του όγκου και θρυμματισμό της πάστας [4].

Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος στη φωτιά είναι τα αδρανή. Η ορυκτολογική σύνθεση των αδρανών καθορίζει τους μετασχηματισμούς των ορυκτολογικών φάσεων και τη θερμική αποσύνθεση του αδρανούς με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, η ορυκτολογία του αδρανούς καθορίζει τις διαφορικές θερμικές διαστολές μεταξύ αδρανούς και τσιμεντόπαστας και τη τελική αντοχή της ενδοεπιφανειακής ζώνης. Η μείωση της αντοχής, κατά τη καύση, των αδρανών που δεν περιέχουν Πυρίτιο, είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με αυτά που περιέχουν [4]. Τα πυριτικά αδρανή που περιέχουν Χαλαζία (π.χ. Ψαμμίτης και Γρανίτης), μπορούν να προκαλέσουν ένταση στο σκυρόδεμα σε θερμοκρασίες περίπου 573°C, επειδή στη θερμοκρασία αυτή ο μετασχηματισμός του Χαλαζία από τη μορφή α στη μορφή β συνδέεται με μια ξαφνική διαστολή της τάξης 0,85%. Στην περίπτωση των ανθρακικών πετρωμάτων μία παρόμοια ένταση μπορεί να αρχίσει πάνω από 700 °C, ως αποτέλεσμα της διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η χρήση αδρανών δολομίτη μπορεί να παράγει σκυρόδεμα με πολύ καλή αντοχή στη καύση. Ο λόγος είναι ότι, η ασβέστωση των ανθρακικών αδρανών είναι ενδόθερμη αντίδραση [6].

Πολλές φορές για τη παρασκευή πυράντοχων σκυροδεμάτων και κονιών χρησιμοποιούνται ελαφρά αδρανή όπως για παράδειγμα ο Βερμικουλίτης και ο Περλίτης. Τα αδρανή αυτά παρουσιάζουν μεγάλη φυσική και χημική σταθερότητα ακόμη και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 800 °C, αφού κατά την επεξεργασία τους εκτίθενται σε θερμοκρασίες άνω των 850 °C. Οι ιδιότητες αυτές αν συνδυαστούν με τον χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής τους και τη μικρή τους θερμική αγωγιμότητα τα καθιστούν πολύ αποτελεσματικά υλικά για τη Παρασκευή πυράντοχων σκυροδεμάτων και κονιαμάτων. Ωστόσο, εξαιτίας του υψηλού τους πορώδους (50-60%) απορροφούν υγρασία, κυρίως σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία (π.χ. τούνελ), με αποτέλεσμα σε περίπτωση πυρκαγιάς να υπάρχει ο κίνδυνος εκρηκτικού θρυμματισμού του σκυροδέματος. Το αντίθετο βέβαια συμβαίνει σε ξηρά περιβάλλοντα όπου ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής προφυλάσσει το σκυρόδεμα από θρυμματισμό.

3 ΤΟ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ

Το όφελος που θα προκύψει από την επιτυχή εξέλιξη της παρούσας έρευνας, εκτός από οικονομικό, είναι και περιβαλλοντικό και θα προέλθει από τη μείωση της εξόρυξης πρώτων υλών για τη σύνθεση υλικών πυροπροστασίας, τη απορρέουσα μείωση των εκπομπών CO₂ και σε μικρότερο βαθμό από την εξοικονόμηση ενέργειας, λόγω της μείωσης των επισκευαστικών και των εργασιών ανακατασκευής, καθώς και της μείωσης της χρήσης υλικών επισκευής/ανακατασκευής. Επίσης, δευτερεύουσας ίσως σημασίας όφελος προέρχεται από τη μείωση των αποθέσεων των υπολειμμάτων του ξυλάνθρακα στο έδαφος.

3.1 Διατήρηση των φυσικών πόρων και προστασία του περιβάλλοντος.

Τα περισσότερα υλικά παθητικής πυροπροστασίας που χρησιμοποιούνται σήμερα, προέρχονται από την εξόρυξη βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων (ΒΟΠ). Μολονότι η εξόρυξη και επεξεργασία των ΒΟΠ δημιουργεί μικρότερης έντασης περιβαλλοντικά προβλήματα, σε σύγκριση με τα μεταλλεύματα και τις ενεργειακές πρώτες ύλες, ωστόσο είναι γνωστά τα προβλήματα αισθητικής του τοπίου, της καταστροφή της Χλωρίδας, της δημιουργίας θορύβου ή σκόνης, της απόθεσης στερεών αποβλήτων και της δημιουργίας υγρών αποβλήτων [7].

Σε περιπτώσεις καταστροφής και ανακατασκευής κτιρίων, που καταστράφηκαν από ελλιπή μέτρα πυροπροστασίας, η περιβαλλοντική επιβάρυνση είναι προφανής και σημαντική. Κατά την κατάρρευση των πύργων του Παγκόσμιου Κέντρου Εμπορίου δημιουργήθηκαν 1.000.000 τόνοι μπάζα, τα οποία χρειάστηκαν περίπου 30.000 μετακινήσεις φορτηγών για να απομακρυνθούν. Επίσης, Ο χάλυβας που ανασύρθηκε αντιπροσώπευε την ημερήσια παραγωγή χάλυβα των ΗΠΑ [8]. Οι επιστήμονες θεωρούν ότι οι επιπτώσεις της κατάρρευσης αποτέλεσαν τη σημαντικότερη περιβαλλοντική καταστροφή στην ιστορία της Νέας Υόρκης [9]. Η χρήση του τσιμέντου στις κατασκευές είναι καθολική και για τη παραγωγή του εκλύονται μεγάλες ποσότητες CO₂. Η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου ευθύνεται περίπου για το 7% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών CO₂. Επίσης, απαιτεί τη κατανάλωση σημαντικών ποσοτήτων φυσικών πετρωμάτων, καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τον ίδιο τρόπο το σκυρόδεμα απαιτεί τη χρήση σημαντικών ποσοτήτων πρώτων υλών (πετρωμάτων, νερού) καθώς και μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας.

Εδώ μπορεί να αναφερθεί η μερική κατάρρευση του κτιρίου Windsor Tower στη Μαδρίτη το 2005, κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς. Το κτίριο θεωρήθηκε ως κατεδαφιστέο λόγω της μερικής του κατάρρευσης και συγκεκριμένα της κατάρρευσης των ορόφων στους οποίους δεν είχαν ληφθεί μέτρα παθητικής πυροπροστασίας. Το 32 ορόφων κτίριο ήταν κατασκευασμένο σχεδόν εξολοκλήρου από σκυρόδεμα. Το κατεστραμμένο κτίριο κατεδαφίστηκε και στη θέση του κτίστηκε ο πύργος Torre Titania ύψους 104 μέτρων.

3.2 Η απόθεση ξυλάνθρακα στο έδαφος

Υστερα από βιβλιογραφική έρευνα δεν βρέθηκε κάποιο αξιόπιστο στοιχείο για τις ποσότητες της σκόνης ξυλάνθρακα που διασκορπίζεται στο περιβάλλον της χώρας μας. Ωστόσο, σε διάφορες χώρες του τρίτου κόσμου, όπως για παράδειγμα η Αιτή, η παραγωγή ξυλάνθρακα αποτελεί το κύριο βιοποριστικό μέσο για πολλές οικογένειες. Στοιχεία της Unesco αναφέρουν ότι στην Αιτή κάθε χρόνο πωλούνται περίπου 300.000 τόνοι ξυλάνθρακα. Σε κάθε σακί υπάρχει 5 – 10 % σκόνη ξυλάνθρακα και υπολογίζεται ότι 12.000 – 20.000 τόνοι ξυλάνθρακα, σε μορφή σκόνης διασκορπίζεται στον αέρα και καταλήγουν στο έδαφος [9].

Αν και υπάρχουν ενδείξεις ότι η ενσωμάτωση σκόνης ξυλάνθρακα στο έδαφος μπορεί, σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις, να ωφελήσει τη γονιμότητα του εδάφους, ωστόσο δεν υπάρχουν επαρκείς μελέτες [10].

Τεκμηριωμένος όμως είναι ο ρόλος της αναλογίας άνθρακα προς άζωτο στο έδαφος και συγκεκριμένα ο λόγος C/N. Η αναλογία αυτή χαρακτηρίζει τη γονιμότητα των εδαφών και συγκεκριμένα την ευκολία ή δυσκολία με την οποία μπορούν να αποσυντεθούν οργανικά υπολείμματα, αλλά και τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών. Τιμές του λόγου C/N μεγαλύτερες του 25 δείχνουν περιορισμένη ικανότητα αποσύνθεσης και έλλειψη αζώτου για τα φυτά. Αντίθετα τιμές μικρότερες του 18-20 δείχνουν ότι υπάρχει αρκετό άζωτο ώστε να απομείνει και ποσότητα Αζώτου για τη διατροφή των φυτών [11]

4 ΥΛΙΚΑ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Στη σκιά των δραματικών γεγονότων της κατάρρευσης των δίδυμων πύργων του Παγκόσμιου κέντρου Εμπορίου στο Manhattan της Νέας Υόρκης, πολλές έρευνες προσπάθησαν να ρίξουν φως στα αίτια της καταστροφής. Ωστόσο, αναφορές πριν τη τρομοκρατική ενέργεια κατέδειξαν σημαντικά προβλήματα στην εφαρμογή της παθητικής πυροπροστασίας που ίσως ήταν και μια από τις αιτίες της καταστροφής. Η δομική αρτιότητα των πύργων στηρίζονταν σε ένα σύστημα κατασκευής από κολώνες και δικτυώματα από χάλυβα. Ο χάλυβας είναι γνωστό ότι αρχίζει να μαλακώνει σε θερμοκρασίες άνω των 425°C ενώ λιώνει σε θερμοκρασίες άνω των 1500°C. Για τη προστασία από τη φωτιά, εκτός από τα μέσα ενεργητικής προστασίας χρησιμοποιήθηκαν και 4 υλικά επικάλυψης παθητικής πυροπροστασίας, τα οποία ψεκάστηκαν πάνω στα δομικά στοιχεία από χάλυβα. Το αρχικό υλικό επικάλυψης περιείχε 20 % αμιάντο (χρυσοτίλη), 60-65% ορυκτές ίνες, γύψο και τσιμέντο. Η επικάλυψη αυτή αργότερα αντικαταστάθηκε, επειδή περιείχε αμιάντο, με επικαλύψεις χωρίς αμιάντο, που προσέφεραν ωστόσο λιγότερη προστασία. Τα άλλα είδη επικαλύψεων αποτελούνταν από συνθέσεις όπως η προηγούμενη χωρίς αμιάντο, από γύψο με αδρανή βερμικουλίτη και από μια ειδική σύνθεση για σημεία ισχυρής καταπόνησης η οποία περιείχε 80% αμιάντο (χρυσοτίλη) και περίπου 20% τσιμέντο και ψεκάζονταν πάνω σε στρώμα από ορυκτές ίνες [12] Η τεχνική του ψεκασμού του χάλυβα με υλικά επικαλύψεων πυροπροστασίας εμφανίστηκε μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Έως τότε τα δομικά στοιχεία από χάλυβα προστατεύονταν από τη φωτιά με περιβλήματα από σκυρόδεμα. Οι πύργοι του κέντρου του παγκόσμιου εμπορίου κατασκευάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 60. Κατασκευάστηκαν σε μια μεταβατική εποχή όπου τα υλικά παθητικής πυροπροστασίας άρχισαν να αντικαθίστανται με υλικά τα οποία δεν περιείχαν αμιάντο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα υλικά αυτά θεωρούνται λιγότερο αποτελεσματικά γιατί είναι λιγότερο συνεκτικά έχουν μεγαλύτερη θερμοαγωγιμότητα και μικρότερη πρόσφυση. Σε πολλές περιπτώσεις, ύστερα από την κατανόηση της επικινδυνότητας του αμιάντου, τα υλικά που περιείχαν αμιάντο αντικαταστάθηκαν από άλλα, με επείγουσες διαδικασίες χωρίς πολλές φορές να γίνουν δοκιμές πλήρους κλίμακας για τα νέα υλικά. Επίσης, έως το 1977 δεν υπήρχε κανένα κριτήριο εφαρμογής. [12].

Τα μέσα που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη παθητική πυροπροστασία αποτελούν προϊόντα εξόρυξης και επεξεργασίας ορυκτών όπως ο βερμικουλίτης, ο περλίτης, η γύψος, οι ίνες πολυπροπυλενίου και σπανιότερα ο αμιάντος. Τα υλικά αυτά όπως για παράδειγμα ο Βερμικουλίτης και ο Περλίτης απαιτούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας και συνεπώς απαιτούν κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Στη συνέχεια

παρουσιάζονται οι ιδιότητες των πιο συνηθισμένων σύγχρονων υλικών πυροπροστασίας για να μπορέσουν να συγκριθούν με τον ξυλάνθρακα.

4.1 Υλικά πυροπροστασίας που περιέχουν Βερμικουλίτη

Ο Βερμικουλίτης είναι συνήθως προϊόν μερικής αποσάθρωσης των μαρμαρυγιακών ορυκτών. Η κρυσταλλική του δομή αποτελείται από δύο φύλλα τετραέδρων πυριτίου και οκταέδρων αργιλίου ή μαγνησίου. Η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να απορροφηθεί από τον δομή του ορυκτού είναι δύο μόνο μόρια νερού. Όταν ο βερμικουλίτης θερμανθεί το απορροφημένο νερό μετατρέπεται σε ατμό, τα φύλλα των τετραέδρων απομακρύνονται λόγω των πιέσεων και το ορυκτό διογκώνεται μέχρι 30 φορές του αρχικού του όγκου. Ο Βερμικουλίτης σε εκτεταμένη μορφή, αποτελεί πολύ διαδεδομένο μέσο πυροπροστασίας, αναμεμιγμένος με συγκολλητικά μέσα. Ενδεικτικές τιμές της πυκνότητας και της θερμικής αγωγιμότητας του εκτεταμένου Βερμικουλίτη είναι $56 - 192 \text{ kg/m}^3$ και $0,058 - 0,071 \text{ W/mk}$ αντίστοιχα. Οι αποθέσεις του βερμικουλίτη στη χώρα μας περιορίζονται στη Μακεδονία και υπολογίζονται 500.000 τόνοι. (Νταμπίτζιας & Περδικάτσης 1991, Zhelyaskova-Panayotova et al. 1992, Διακάκης κ.ά. 1995). Αν και ο Βερμικουλίτης είναι ένα ασφαλές ορυκτό, υπήρξαν περιπτώσεις κυρίως στο παρελθόν, όπου εξορύχτηκαν και διακινήθηκαν ποσότητες Βερμικουλίτη που περιείχαν μικρές ποσότητες Αμιάντου. Ωστόσο, επειδή υπάρχουν διάφορες πηγές εμπορίας Βερμικουλίτη ο κίνδυνος είναι ακόμη υπαρκτός (The Vermiculite Association (TVA)).

4.2 Υλικά πυροπροστασίας που περιέχουν Περίλητη

Ο περίλητης είναι άμορφο ηφαιστειακό γυαλί με σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε νερό. Βρίσκεται στη φύση και όπως και ο Βερμικουλίτης έχει την ιδιότητα να διογκώνεται όταν βρεθεί σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία. Ενδεικτικές τιμές της πυκνότητας και της θερμικής αγωγιμότητας του διογκωμένου Περίλητη είναι $30-150 \text{ kg/m}^3$ και 0.064 W/mk αντίστοιχα. Η χώρα μας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παραγωγούς Περίλητη παγκοσμίως. Ωστόσο, ούτε ο Περίλητης είναι απαλλαγμένος από περιβαλλοντικά προβλήματα και προβλήματα που προκαλεί στην υγεία του πληθυσμού στους τόπους εξόρυξης. Σύμφωνα με το πόρισμα του σώματος των Επιθεωρητών Υπηρεσιών Υγείας και Πρόνοιας του υπουργείου Υγείας υπάρχει με βεβαιότητα οφθαλμολογικό πρόβλημα κυρίως εξ' ερεθισμού, καθώς και ισχυρές ενδείξεις περί συνδρομής σοβαρού προβλήματος χρόνιων πνευμονοπαθειών εξαιτίας της διάχυσης υπερλέπτου περίλητη σε αέριο και υδάτινο περιβάλλον σε περιοχές εξόρυξης του Περίλητη [13]

4.3 Υλικά πυροπροστασίας που περιέχουν γύψο

Η γύψος, είναι ορυκτό του ασβεστίου με χημικό τύπο $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (διένυδρο θειικό ασβέστιο). Η γύψος όταν ψηθεί και ανακατευτεί με το νερό γίνεται σκληρή και συμπαγής. Η γύψος περιέχει 20% κρυσταλλικό νερό, το οποίο στην περίπτωση πυρκαγιάς εξατμίζεται. Ο ατμός που δημιουργείται μεταξύ του δομικού στοιχείου από γύψο και της φωτιάς θεωρείται ότι καθυστερεί την πρόοδο της καύσης. Η εξόρυξη της γύψου ως ΒΟΠ, επιφέρει τις γνωστές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις ανιχνεύθηκαν και ίχνη αμιάντου (The Vermiculite Association (TVA)).

4.4 Πυροπροστασία με τη χρήση ινών Πολυπροπυλενίου

Οι ίνες Πολυπροπυλενίου αναμιγνύονται κατά τη παραγωγή του σκυροδέματος. Σε περίπτωση έκθεσης του σκυροδέματος σε πυρκαγιά οι ίνες αυτές λιώνουν δημιουργώντας χώρο ώστε να εκτονωθεί ο παραγόμενος ατμός, μειώνοντας τις τάσεις και τις πιέσεις. Αν και το Πολυπροπυλένιο θεωρείται υλικό φιλικό προς το περιβάλλον δεν παύει να αποτελεί βιομηχανικό προϊόν επεξεργασίας εξορυγμένων πρώτων υλών.

4.5 Πυροπροστασία με τη χρήση Αμιάντου

Η χρήση του Αμιάντου ήταν γνωστή από αρχαιοτάτων χρόνων. Οι Αρχαίοι Έλληνες τον χρησιμοποιούσαν σαν φυτίλι στα λυχνάρια. Ο Αμιάντος είναι παγκοσμίως γνωστός με το όνομα Asbestos το οποίο προέρχεται από την Ελληνική λέξη άσβεστος επειδή δεν καιγόταν κατά τη χρήση τους στα λυχνάρια. Ο Αμιάντος υπάρχει σε αφθονία στα $\frac{3}{4}$ περίπου του στερεού φλοιού της γης. Το μεγαλύτερο κοίτασμα στην Ελλάδα βρίσκεται στο Ζιδάνι του νομού Κοζάνης. Ο Αμιάντος χρησιμοποιήθηκε ευρέως για θερμομόνωση και πυροπροστασία. Αμιάντος είναι ένας γενικός όρος, μια κοινή ονομασία για μια ομάδα ορυκτών, ινώδους μορφής, που ανήκουν στην κατηγορία των σερπεντινών και των αμιφίβλων και είναι γνωστά για τις σπουδαίες φυσικές και χημικές ιδιότητες τους: υψηλή μηχανική αντοχή, σταθερότητα (άφθαρτες ιδιότητες), αντοχή στις φλόγες, στη θερμότητα και στα διαβρωτικά χημικά (όξινα και αλκαλικά διαλύματα) [14]. Σήμερα ο αμιάντος θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες καρκινογένεσης, στην περίπτωση που οι ίνες του εισχωρήσουν στον ανθρώπινο οργανισμό. Η διαπιστωμένη, πλέον, ενοχοποίηση του για καρκινογένεση έχει οδηγήσει πολλές χώρες στη λήψη αυστηρών μέτρων για τον περιορισμό της χρήσης του και τη σταδιακή πλήρη απαγόρευσή του. Στην Ελλάδα η νομοθεσία θέσπισε ένα αρκετά αυστηρό πλαίσιο για την χρήση του αμιάντου (ΠΔ 70α/1988, ΠΔ 175/97), ενώ πλέον σε εφαρμογή των ευρωπαϊκών οδηγιών 1999/77/EK και 2003/18/EK απαγορεύεται η εξόρυξη και χρήση του [15].

5 ΠΡΟΤΑΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΞΥΛΑΝΘΡΑΚΑ ΩΣ ΥΛΙΚΟ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η πορώδης δομή του ξυλάνθρακα και η χαμηλή του πυκνότητα σε συνδυασμό με την έκθεσή του σε υψηλές θερμοκρασίες, κατά τη διαδικασία παραγωγής του, αποτελούν ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά για την διερεύνηση της χρήσης του ως πρόσμικτο για τη παραγωγή πυράντοχων κονιαμάτων και σκυροδεμάτων. Το υλικό που προτείνεται είναι παραπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής εμπορικά εκμεταλλεύσιμου ξυλάνθρακα σε μορφή σκόνης.

6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ο ξυλάνθρακας που χρησιμοποιήθηκε ήταν υπόλειμμα εμπορικής συσκευασίας ξυλάνθρακα σε μορφή σκόνης, η οποία κονιορτοποιήθηκε περαιτέρω σε λεπτόκοκκη παιπάλη με μέγιστο κόκκο 75μm. Αντικείμενο της έρευνας ήταν η μελέτη των ιδιοτήτων των κονιαμάτων που περιείχαν σκόνη ξυλάνθρακα ως πρόσθετο και η σύγκριση τους με το αντίστοιχο συμβατικό κονίαμα αναφοράς. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο τρεις διαφορετικές συνθέσεις με περιεκτικότητα σκόνης ξυλάνθρακα 0% (M), 5% (C5) και 10% (C10) κ.β. τσιμέντου. Οι ιδιότητες των κονιαμάτων που μετρήθηκαν ήταν η εργασιμότητα, η θερμική αγωγιμότητα καθώς και η θλιπτική και καμπτική αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μετά από έκθεσή τους σε θερμοκρασίες 500°C και 800°C. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι συνθέσεις των κονιαμάτων.

Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν 6 πρισματικά δοκίμια 40×40×160 mm., και ένα κυλινδρικό διαμέτρου περίπου 50 mm για την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας. Μετά τη παρασκευή τους τα δοκίμια μαζί με τα καλούπια τους σκεπάστηκαν με πολυαιθυλένιο για 24 ώρες και στη συνέχεια ξεκαλουπάθηκαν (εκτός από τα κυλινδρικά), και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης με 60% σχετική υγρασία και 20°C για 28 μέρες. Στις 28 μέρες μετρήθηκε η αντοχή των δοκιμίων σε κάμψη και σε θλίψη, σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-11:1999. Τα 2 πρώτα δοκίμια από κάθε σύνθεση δοκιμάστηκαν σε κάμψη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ~20°C. Τα 2 κομμάτια, για κάθε δοκίμιο, που προέκυψαν από τη διαδικασία της δοκιμής κάμψης, ετέθησαν σε δοκιμή θλίψης. Κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο τα υπόλοιπα 4 δοκίμια από κάθε σύνθεση δοκιμάστηκαν σε κάμψη και σε θλίψη ύστερα από την έκθεσή τους σε θερμοκρασίες 500°C και 800°C και αφού προηγουμένως αφέθησαν 24 ώρες στον σβηστό φούρνο για να κρυώσουν. Για να υποβληθούν τα δοκίμια σε αυτές τις θερμοκρασίες, τοποθετήθηκαν σε ηλεκτρικό φούρνο χωρίς φλόγα του οποίου ο ρυθμός

αύξησης της θερμοκρασίας ήταν 4,5°C το λεπτό περίπου. Όταν η θερμοκρασία στο φούρνο έφτασε στους 500°C και 800°C αντίστοιχα ο φούρνος έσβησε και τα δοκίμια αφέθησαν μέσα σε αυτόν να κρυώσουν για 24 ώρες προτού δοκιμαστεί η αντοχή τους. Η εργασιμότητα των κονιαμάτων μετρήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-3:1999. Η θερμική αγωγιμότητα μετρήθηκε σε εργαστήριο του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. Για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμίων, τα κυλινδρικά δοκίμια καταμήθηκαν σε «φέτες» πάχους από 5 – 15 mm και ετέθησαν σε διαδικασία μέτρησης, σύμφωνα με τις οδηγίες του εργαστηρίου. Επειδή ο χρόνος που μας διατέθηκε η συσκευή μέτρησης ήταν περιορισμένος, υπάρχουν δεδομένα μόνο για τα δοκίμια Μ και C5.

Πίνακας 1. Αναλογίες σύνθεσης και ιδιότητες νωπού κονιάματος

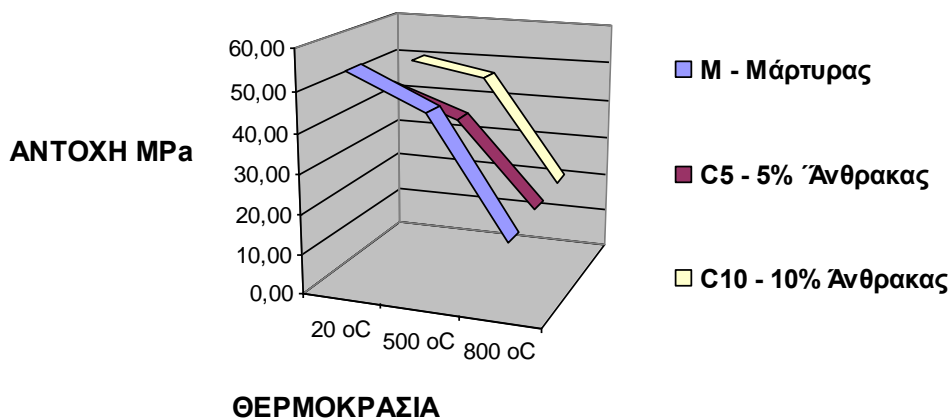
ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ			
ΥΛΙΚΑ	Μ	C5	C10
Τσιμέντο	430 kg/m ³	430 kg/m ³	430 kg/m ³
Νερό	258 kg/m ³	258 kg/m ³	258 kg/m ³
Ασβεστολιθική άμμος	1673 kg/m ³	1673 kg/m ³	1673 kg/m ³
Υπερευστοποιητής Glenium 11	6,45 kg/m ³	6,45 kg/m ³	6,45 kg/m ³
Ανθρακας	-	21,43 kg/m ³	42,86 kg/m ³
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ			
w/c	0,6	0,6	0,6
ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ	23 cm	22 cm	21 cm
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ			
w/m²K	1,57	1,21	-

7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 1 φαίνονται η εργασιμότητα και η θερμική αγωγιμότητα των δοκιμίων. Η μείωση της εργασιμότητας ήταν αναμενόμενη, γιατί ο ξυλάνθρακας με τη πορώδη υφή του

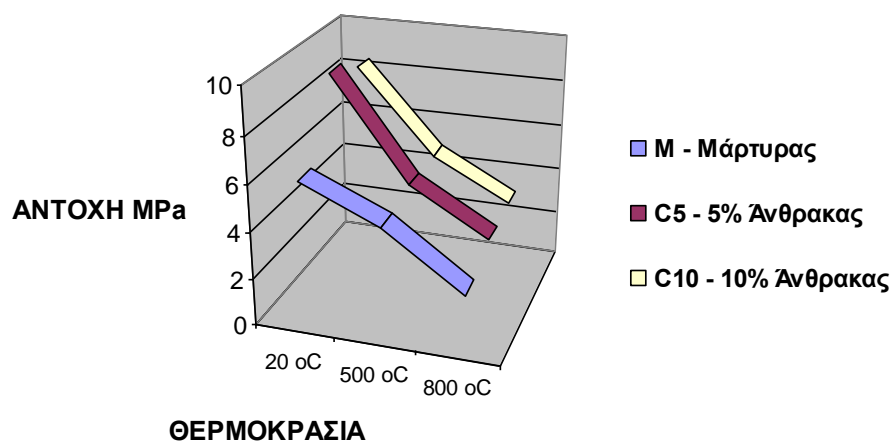
απορροφάει ποσότητες νερού. Η πορώδης αυτή υφή του ξυλάνθρακα φαίνεται ότι είναι υπεύθυνη και για τη μικρή του θερμική αγωγιμότητα. Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων ως απόλυτες τιμές θλιπτικής και της καμπτικής αντοχής και ως ποσοστά απομένουσας αντοχής των μιγμάτων στους 500°C και τους 800°C παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 1,2,3,4,5,6.

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

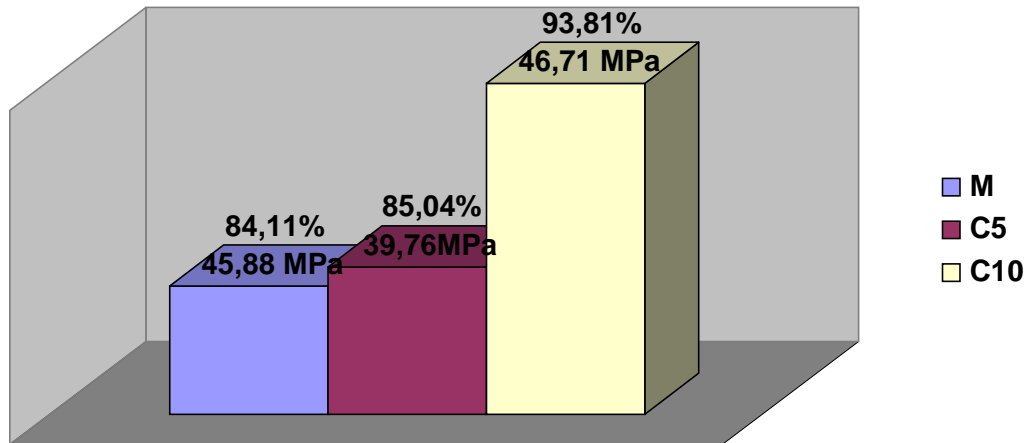


Διάγραμμα 1 Αντοχές των δοκιμίων M, C5, C10 σε θλίψη, στους 20°C, 500°C και 800°C

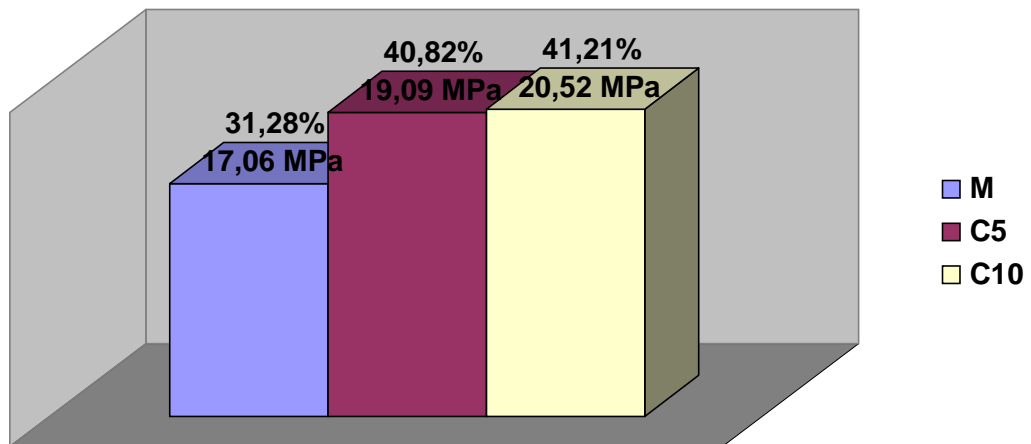
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ



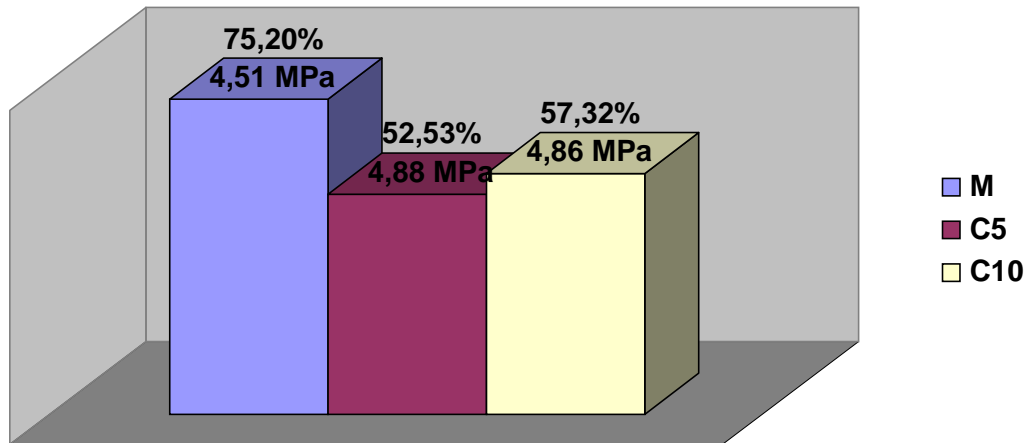
Διάγραμμα 2 Αντοχές των δοκιμίων M, C5, C10 σε κάμψη στους 20°C, 500°C και 800°C



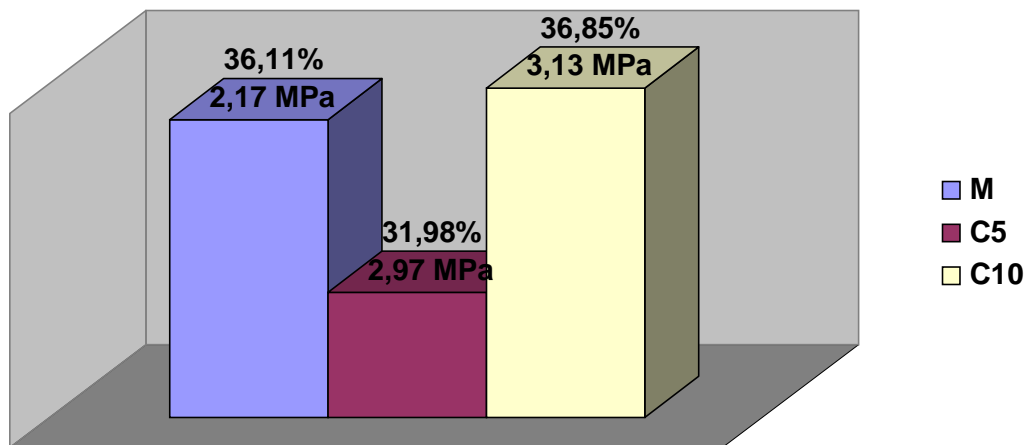
Διάγραμμα 3 Απομένουσα αντοχή % σε θλίψη στους 500°C. Σημειώνονται και οι απόλυτες τιμές σε MPa.



Διάγραμμα 4 Απομένουσα αντοχή % σε θλίψη στους 800°C. Σημειώνονται και οι απόλυτες τιμές σε MPa.



Διάγραμμα 5 Απομένουσα αντοχή % σε κάμψη στους 500°C. Σημειώνονται και οι απόλυτες τιμές σε MPa.



Διάγραμμα 6 Απομένουσα αντοχή % σε κάμψη στους 800°C. Σημειώνονται και οι απόλυτες τιμές σε MPa.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι υπάρχει μια μικρή μείωση της θλιπτικής αντοχής στις 28 μέρες στα κονιάματα που περιέχουν ξυλάνθρακα, σε φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος. Ωστόσο, φαίνεται ότι η παρουσία ξυλάνθρακα αυξάνει την αντοχή σε κάμψη σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Αν και τα αποτελέσματα αυτά είναι παράδοξα, γιατί η σχέση της θλιπτικής και της καμπτικής αντοχής είναι ανάλογη, φαίνεται ότι η παρουσία του ξυλάνθρακα επηρεάζει θετικά την αντοχή σε κάμψη. Μία πιθανή εξήγηση είναι ίσως ότι επειδή η καμπτική αντοχή είναι πιο ευαίσθητη σε ανεπαρκή συντήρηση, σε σχέση με τη αντοχή σε θλίψη, ο ξυλάνθρακας με την ιδιότητα του να απορροφάει νερό, συντήρησε εσωτερικά τα δοκίμια [16]. Άλλη αιτία θα μπορούσε να θεωρηθεί η μείωση της κοκκομετρίας των αδρανών με τη προσθήκη του λεπτόκοκκου ξυλάνθρακα. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι η αντικατάσταση τσιμέντου με τέφρα αυξάνει την εφελκυστική αντοχή [5].

Η επιτυχία της έρευνας αποτυπώνεται στα διαγράμματα 3 και 4. Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται ξεκάθαρα ότι η απομένουσα αντοχή των δοκιμίων που περιέχουν ξυλάνθρακα σε θερμοκρασίες πυρκαγιάς (500°C και 800°C) είναι γενικά υψηλότερη από την αντοχή των μαρτύρων. Μία εξήγηση για το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται ότι είναι οι αυξημένες θερμομονωτικές ιδιότητες που προσέδωσε ο ξυλάνθρακας στα δοκίμια. Επίσης, ο ξυλάνθρακας, ο οποίος κατά κύριο λόγο αποτελείται από άνθρακα, αρχίζει να καίγεται σε θερμοκρασίες άνω των 400°C, εφόσον υπάρχει επαρκής ποσότητα αέρα. Σε αυτή τη περίπτωση, ο ατμός ο οποίος έχει ήδη δημιουργηθεί στο κονίαμα αντιδρά με το πυρακτωμένο άνθρακα σε μία ενδόθερμη αντίδραση που παράγεται CO και υδρογόνο. Η ενδόθερμη αυτή

αντίδραση απορροφά μεγάλες ποσότητες θερμότητας που φαίνεται ότι μπορεί να προσδώσει στον ξυλάνθρακα ιδιότητες πυροπροστασίας [15].

Τέλος, η μείωση της αντοχής στα δοκίμια που περιείχαν ξυλάνθρακα, σε φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος, θα μπορούσε να ερμηνευθεί με την παραδοχή ότι η πρόσθεση του ξυλάνθρακα στο μίγμα αύξησε τον συνολικό παρασκευασμένο όγκο ή αλλιώς και εφ' όσον σε μεγαλύτερο όγκο είχαμε την ίδια ποσότητα τσιμέντου, στη μονάδα όγκου των δοκιμίων είχαμε λιγότερο τσιμέντο.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Σε απόλυτες τιμές τα δοκίμια που περιέχουν ξυλάνθρακα εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη.
2. Τα δοκίμια που περιέχουν 5% και 10% κ.β. τσιμέντου ξυλάνθρακα (C5) και (C10) παρουσιάζουν μεγαλύτερη απομένουσα αντοχή σε θλίψη στους 500°C σε σχέση με το μάρτυρα.
3. Στους 800°C η απομένουσα αντοχή σε θλίψη στα δοκίμια C5 και στα C10 είναι κατά 10% μεγαλύτερη σε σχέση με το μάρτυρα.
4. Στους 800°C η απομένουσα αντοχή σε κάμψη στα C5 είναι 5% μικρότερη σε σχέση με το μάρτυρα και στα C10 είναι σχεδόν όμοια με τον μάρτυρα.
5. Τα δοκίμια C5 παρουσιάζουν βελτιωμένες θερμομονωτικές ιδιότητες.
6. Τα θετικά αποτελέσματα των πειραμάτων, η ανάγκη για πυροπροστασία των κατασκευών καθώς και η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος μπορούν να θεωρηθούν σημαντικοί λόγοι για την περεταίρω διερεύνηση της πρότασης.

Από τα αποτελέσματα και την ανάλυση τους φαίνεται ότι η έρευνα παρουσιάζει κάποιο σχετικό ενδιαφέρον. Η περεταίρω έρευνα του αντικειμένου, με σκοπό τη δημιουργία κάποιου βιομηχανικού προτύπου με αναβαθμισμένες ιδιότητες, θα μπορούσε να ωφελήσει το περιβάλλον την αντοχή των κατασκευών και την ασφάλεια των χρηστών.

Η βιόσφαιρα είναι το εξωτερικό περίβλημα του πλανήτη - περιλαμβάνει τον αέρα, το έδαφος, το οικολογικό σύστημα που ενσωματώνει όλους τους ζωντανούς οργανισμούς και τις μεταξύ τους σχέσεις, περιλαμβανόμενης της αλληλεπίδρασης τους με τα στοιχεία της λιθόσφαιρας (πετρώματα), της υδρόσφαιρας (νερό), και της ατμόσφαιρας (αέρας). Η βιόσφαιρα αποτελεί την αφετηρία και το τέρμα της ζωής στην οποία λαμβάνει χώρα μια νομοτελειακή και αέναη ανακυκλούμενη διαδικασία. Η βιόσφαιρα παρέχει τα απαραίτητα μέσα για την επιβίωση και οι έμβιοι οργανισμοί την ανατροφοδοτούν ακόμη και με το θάνατο τους. Ο τραυματισμός της βιόσφαιρας λειτουργεί ως αυτοάνοσο νόσημα. Ο άνθρωπος με την ιδιαίτερη ευφυΐα που τον διακρίνει από τους υπόλοιπους οργανισμούς της βιόσφαιρας διατάραξε τις σοφές ισορροπίες της φύσης με αποτέλεσμα τον τραυματισμό της. Ο περιορισμός της τραυματικής κατάχρησης της φύσης με πολιτικές αειφόρου ανάπτυξης κρίνεται απαραίτητος για την επιβίωση μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. Drysdale. An Introduction to Fire Dynamics New York: *Wiley Interscience*, 1985, pp. 134–140, A.E. Cote, ed.. Fire Protection Handbook 17th Edition. Quincy, MA: *National Fire Protection Association*, 1992. pp. 10–67.
- [2] University of Manchester.
<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/BuildingFires/worldTradeCenter.htm>.
- [3] Paul Klieger and Joseph F. Lamond. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. *ASTM*, p.p. 282.
- [4] A.M. Neville. Properties of Concrete Fourth and Final Edition, Logman, pp.385-390.
- [5] P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro. Σκυρόδεμα, μικροδομή ιδιότητες και υλικά. Εκδόσεις ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, σελ. 104, 179-180.
- [6] M.S. Abrams and A.H. Gustafarro. Fire endurance of concrete slabs as influenced by thickness, aggregate type and moisture. *J. Portl. Cem. Assoc. Research and Development Laboratories* 10, No. 2, pp. 9-24 (May 1968).
- [7] Ανέστης Α. Φιλιππίδης. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ - Τομέας Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας.
- [8] Thomas W. Eagar and Christopher Musso. *JOM*, 53 (12) (2001), pp. 8-11.
- [9] The New York Times. Tuesday, June 12, 2012.
- [9] http://www.unevoc.unesco.org/fileadmin/user_upload/docs/10CharcoalDust.pdf
- [10] K Y Chan¹, L Van Zwieten², A Downie^{3,4} and S Joseph⁴. Nitrogen in slow pyrolysis biochars.
(1) NSW Department of Primary Industries, Richmond, NSW 2753, Australia
(2) NSW Department of Primary Industries, Wollongbar, NSW 2477, Australia
(3,4) BEST Energies, Somersby, NSW 2250, Australia
(4) University of New South Wales, NSW 2052, Australia.
- [11] Σπύρος Δ. Σακελλαριάδης. ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ.
- [12] John T. O'Hagan. HighRise/Fire & Life Safety. *Fire Engineering*, 1977, pp. 23-28.
- [13] Εφημερίδα Το ΕΘΝΟΣ Τρίτη, 12/6/2012.
- [14] ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΑΣΦΑΛΙΣΕΩΝ ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΥΓΙΕΙΝΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.
- [15] www.wikipedia.org.
- [16] B.W. Shacklock and P.W. Keene. Comparison of the compressive and flexural strengths of concrete with and without entrained air. *Civil Engineering (London)*, 54, pp. 77-80 (Jan. 1959).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Πίνακας 2. Αντοχή των δοκιμίων Μ (Μάρτυρες), σε κάμψη και σε θλίψη στους 20°C

Αντοχή των δοκιμίων M στους 20°C			
Κάμψη			Θλίψη
	KN	MPa	MPa
1	2,56	6,00	52,33
2			56,75
M.O.	2,56	6,00	54,54

Πίνακας 3. Αντοχή των δοκιμίων C5 (μίγμα με 5% κ.β. τσιμέντου ξυλάνθρακα), σε κάμψη και σε θλίψη στους 20°C

Αντοχή των δοκιμίων C5 στους 20°C			
Κάμψη			Θλίψη
	KN	MPa	MPa
1	3,96	9,28	46,75
2			
M.O.	3,96	9,28	46,75

Πίνακας 4. Αντοχή των δοκιμίων C10 (μίγμα με 10% κ.β. τσιμέντου ξυλάνθρακα), σε κάμψη και σε θλίψη στους 20°C

Αντοχή των δοκιμίων C10 στους 20°C			
Κάμψη			Θλίψη
	KN	MPa	MPa
1	3,62	8,48	49,79
2			
M.O.	3,62	8,48	49,79

Πίνακας 5. Αντοχή των δοκιμίων Μ (Μάρτυρες), σε κάμψη και σε θλίψη στους 500°C

Αντοχή των δοκιμίων M (Μάρτυρες) στους 500°C					
Κάμψη		Απομένουσα		Θλίψη	Απομένουσα
	KN	MPa	%	MPa	%
1	1,96	4,59		46,04	
2	1,89	4,43		45,71	
M.O.	1,93	4,51	75,20	45,88	84,11

Πίνακας 6. Αντοχή δοκιμίων C5 (μίγμα με 5% κ.β. τσιμέντου ξυλάνθρακα), σε κάμψη και σε θλίψη στους 500°C

Αντοχή των δοκιμίων C5 στους 500°C					
Κάμψη				Θλίψη	
	KN	MPa		MPa	
1	1,96	4,59		39,13	
2	2,20	5,16		40,38	
M.O.	2,08	4,88	52,53	39,76	85,04

Πίνακας 7. Αντοχή δοκιμίων C10 (μίγμα με 10% κ.β. τσιμέντου ξυλάνθρακα), σε κάμψη και σε θλίψη στους 500°C

Αντοχή των δοκιμίων C10 στους 500°C					
Κάμψη				Θλίψη	
	KN	MPa		MPa	
1	2,05	4,80		46,67	
2	2,10	4,92		46,75	
M.O.	2,08	4,86	57,32	46,71	93,81

Πίνακας 8. Αντοχή των δοκιμίων M (Μάρτυρες), σε κάμψη και σε θλίψη στους 800°C

Αντοχή των δοκιμίων M (Μάρτυρες) στους 800°C					
Κάμψη			Απομένουσα	Θλίψη	Απομένουσα
	KN	MPa	%	MPa	%
1	0,99	2,31		18,33	
2	0,86	2,02		15,79	
M.O.	0,92	2,17	36,11	17,06	31,28

Πίνακας 9. Αντοχή δοκιμίων C5 (μίγμα με 5% κ.β. τσιμέντου ξυλάνθρακα), σε κάμψη και σε θλίψη στους 800°C

Αντοχή των δοκιμίων C5 στους 800°C					
Κάμψη				Θλίψη	
	KN	MPa		MPa	
1	1,33	3,12		19,29	
2	1,20	2,81		18,88	
M.O.	1,27	2,97	31,98	19,09	40,82

Πίνακας 10. Αντοχή δοκιμίων C10 (μίγμα με 10% κ.β. τσιμέντου ξυλάνθρακα), σε κάμψη και σε θλίψη στους 800°C

Αντοχή των δοκιμίων C10 στους 800°C					
Κάμψη				Θλίψη	
	KN	MPa		MPa	
1	1,35	3,17		21,08	
2	1,32	3,09		19,96	
M.O.	1,33	3,13	36,85	20,52	41,21