

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΟΥΜΕΝΑ
ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ**

Κ. Μπογιατζίδης, Ε. Γεωργαντζάκου, Λ. Ζουμπουλάκης*

Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Τ.Κ. 15773, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

(*lzoubou@chemeng.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ερευνώνται οι δυνατότητες κατασκευής νέων συνθέτων δομικών και μονωτικών υλικών. Τα νέα αυτά σύνθετα υλικά αποτελούνται από πολυμερική μήτρα και εμπειριέχουν ως υλικό πλήρωσης Απόβλητα Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (ΑΚΚ). Κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν σύνθετα υλικά με βάση (μήτρα): α) εποξειδικής ρητίνης, β) ακόρεστου πολυεστέρα και γ) ρητίνης φαινόλης – φορμαλδεΰδης, κατηγορία νεολάκης, με προσθήκη (ανάλογα την ρητίνη) του αντίστοιχου σκληρυντή και του επιθυμητού υλικού πλήρωσης σε διαφορετικά ποσοστά (30%, 40% και 50% κ. β.) και κοκκομετρίες (300 μm και 500 μm). Η κατασκευή των συνθέτων υλικών εποξειδικής ρητίνης και ακόρεστου πολυεστέρα πραγματοποιήθηκε κατόπιν ανάμειξης των επιμέρους συστατικών τους, «χύτευσης» του τελικού μίγματος σε κατάλληλου τύπου καλούπι και σκλήρυνσης σε πυριαντήριο. Αντίστοιχα όσον αφορά στα σύνθετα ρητίνης νεολάκης, αυτά κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της θερμομόρφωσης.

Για τα σύνθετα υλικά, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανικών τους ιδιοτήτων και συγκεκριμένα της αντοχής αυτών σε κάμψη και διάτμηση. Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της θερμομονωτικής απόδοσης των συνθέτων υλικών, μέσω του προσδιορισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ.

Τα νέα σύνθετα υλικά α) εποξειδικής ρητίνης, β) ακόρεστου πολυεστέρα και γ) ρητίνης νεολάκης με προσθήκη ΑΚΚ παρουσιάζουν κατάλληλες μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητες, ήτοι αντοχή σε κάμψη, αντοχή σε διάτμηση και θερμική αγωγιμότητα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευαστικές εφαρμογές ως δομικά και μονωτικά υλικά.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη εξεύρεσης ελεύθερου δομήσιμου χώρου, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στις μεγάλες πόλεις σε παγκόσμιο επίπεδο η φέρουσα ικανότητα^[1] έχει σχεδόν καλυφθεί, θα οδηγήσει σύντομα στην ανάγκη κατεδάφισης των παλαιών - γηρασμένων κτισμάτων με σκοπό την εξασφάλιση ελεύθερων επιφανειών προς δόμηση. Ειδικότερα όσο αφορά την Ελλάδα, ήδη η πολιτική ηγεσία έχει πάρει σχετικές αποφάσεις^[2].

Οι απαιτήσεις σε ενέργεια και πρώτες ύλες για την εκ νέου ανοικοδόμηση κτιριακών εγκαταστάσεων θα είναι τεράστιες, επιφέροντας παράλληλα σημαντική επιβάρυνση στο περιβάλλον. Οι αρνητικές επιπτώσεις μπορούν να περιοριστούν σε μεγάλο βαθμό μέσω της ανακύκλωσης των αποβλήτων εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) που θα προκύψουν από την κατεδάφιση των παλαιών κτισμάτων.

Τα ΑΕΚΚ αποτελούνται κατά βάση από τούβλα, πέτρες, τσιμέντο, κεραμικά, μονωτικά υλικά, μάρμαρα και άλλα αξιοποιήσιμα υλικά (τζάμια, μέταλλα, πλαστικά κλπ). Τα υλικά αυτά εκ της φύσεως τους και λόγω της χρήσης τους ως υλικά δομικών εφαρμογών, παρουσιάζουν καλές μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητες. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τα καθιστούν κατάλληλα να αξιοποιηθούν ως υλικά πλήρωσης σε ένα νέο είδος συνθέτων υλικών, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην μείωση των αρνητικών (από τις νέες κατασκευές) επιπτώσεων

για το περιβάλλον, αφού οι ανάγκες εξόρυξης και επεξεργασίας πρώτων υλών για την κατασκευή δομικών υλικών ελαχιστοποιούνται^[3].

Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνήσει τις δυνατότητες κατασκευής συνθέτων υλικών με βάση (μήτρα) πολυμερή και προσθήκη αποβλήτων κατεδάφισης διαφορετικών κοκκομετριών και αναλογιών (% κ. β.), μέσω της μελέτης των μηχανικών και θερμικών τους ιδιοτήτων. Στο πλαίσιο της, κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης^[4,5], ακόρεστου πολυεστέρα του εμπορίου^[6] και σύνθετα υλικά ρητίνης νεολάκης εργαστηριακά παρασκευασμένης.

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

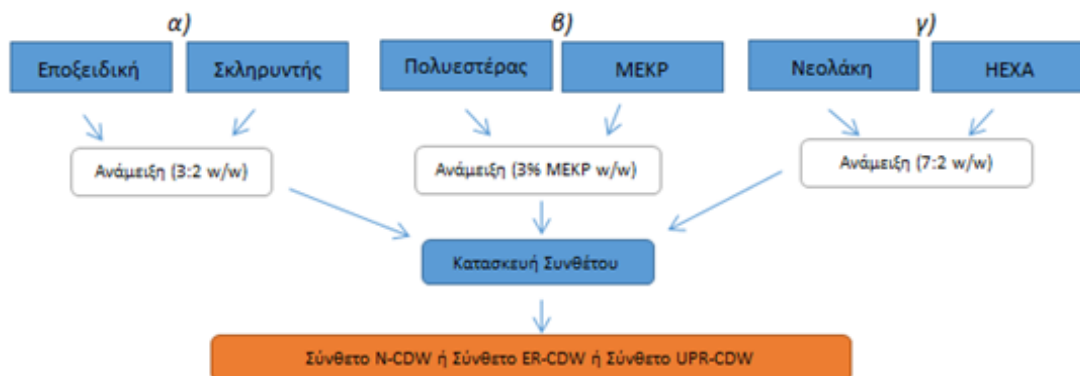
Με την παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα κατασκευής νέων συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με προσθήκη ΑΚΚ ως υλικό πλήρωσης. Μελετήθηκαν σύνθετα υλικά α) εποξειδικής ρητίνης, β) ακόρεστου πολυεστέρα και γ) ρητίνης νεολάκης με τον αντίστοιχο κατά περίπτωση σκληρυντή. Όσο αφορά τα ΑΚΚ που αποτελούν το μέσο πλήρωσης μελετήθηκαν οι περιπτώσεις συνθέτων υλικών με ενσωμάτωση ΑΚΚ σε ποσοστά 30 %, 40% και 50% κ.β.

Η επιλογή των ΑΚΚ ως μέσο πλήρωσης και των ποσοστών ενσωμάτωσης στα σύνθετα, γίνεται λαμβάνοντας υπόψη α) την προέλευση β) τις ιδιότητες και γ) την αναγκαιότητα ανακύκλωσης των αποβλήτων αυτών^[7]. Κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά μήτρας εποξειδικής ρητίνης και ακόρεστου πολυεστέρα του εμπορίου τα οποία σκληρύνθηκαν σε θάλαμο έψησης εντός κατάλληλου καλουπιού. Αντιστοίχως για την κατασκευή των συνθέτων υλικών ρητίνης νεολάκης-ΑΚΚ εφαρμόστηκε η μέθοδος θερμομόρφωσης υπό πίεση σε θερμοπρέσσα. Το υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας, παρασκευάστηκε κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας (θραύση, λειοτρίβηση, κοσκίνιση κλπ).

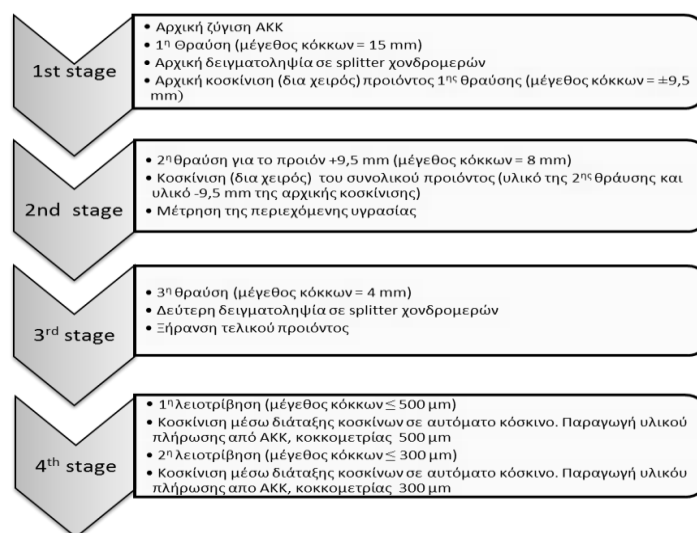
Στα Σχήματα 1, 2 και 3 απεικονίζονται τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας της νεολάκης (παρασκευάστηκε εργαστηριακά), η πειραματική διαδικασία κατασκευής των συνθέτων υλικών μήτρας εποξειδικής ρητίνης, ακόρεστου πολυεστέρα και νεολάκης αντίστοιχα με προσθήκη ΑΚΚ και η διαδικασία παραγωγής του υλικού πλήρωσης στις επιθυμητές κοκκομετρικές διαστάσεις.



Σχήμα 1. Διαδικασία εργαστηριακής παραγωγής ρητίνης νεολάκης.



Σχήμα 2. Παραγωγική διαδικασία κατασκευής συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας α) Εποξειδικής (ER), β) Ακόρεστου Πολυεστέρα (UPR) και γ) Νεολάκης (N) με ΑΚΚ (CDW).



Σχήμα 3. Διαδικασία παραγωγής υλικού πλήρωσης από ΑΚΚ.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά που κατασκευάστηκαν και των οποίων διερευνήθηκαν οι αντοχές σε κάμψη και διάτμηση.

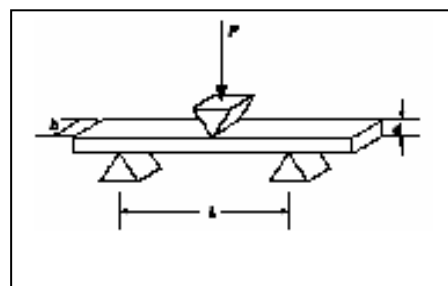
Πίνακας 1. Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας – ΑΚΚ.

ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ-ΚΩΔΙΚΟΣ	ΑΚΚ (%w/w)	ΡΗΤΙΝΗ (% w/w)
ER-100	0	100
ER-CDW30-500μm	30	70
ER-CDW40-500μm	40	60
ER-CDW50-500μm	50	50
ER-CDW30-300μm	30	70
ER-CDW40-300μm	40	60
ER-CDW50-300μm	50	50
UPR-100	0	100
UPR-CDW30-500μm	30	70
UPR-CDW40-500μm	40	60
UPR-CDW50-500μm	50	50
UPR-CDW30-300μm	30	70
UPR-CDW40-300μm	40	60
UPR-CDW50-300μm	50	50
N-100	0	100
N-CDW30-500μm	30	70
N-CDW40-500μm	40	60
N-CDW50-500μm	50	50
N-CDW30-300μm	30	70
N-CDW40-300μm	40	60
N-CDW50-300μm	50	50

Μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας με προσθήκη ανακυκλούμενων ΑΚΚ

Δοκιμή σε κάμψη

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την μέτρηση της αντοχής σε κάμψη συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των προτύπων ASTM D 790-71 ή DIN EN ISO 178 ή DIN 53 452. Κατασκευάστηκαν δοκίμια συνθέτων υλικών με βάση (μήτρα)

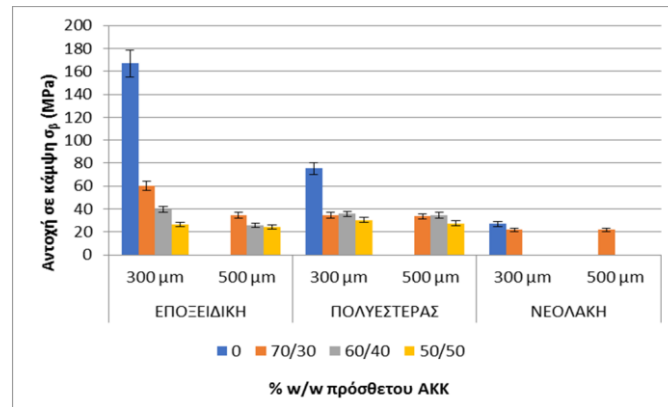


Σχήμα 3. Διάταξη δοκιμής σε κάμψη.

εποξειδική ρητίνη, ακόρεστο πολυεστέρα και νεολάκη αντίστοιχα με μήκος 21 cm, πλάτος 1.7 cm και πάχος 0.3 cm. Η μέτρηση της αντοχής σε κάμψη πραγματοποιήθηκε βάσει της μεθόδου (κάμψης) τριών σημείων, με την απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης του δοκιμίου να είναι 10 cm. Η δύναμη μετρήθηκε με δυναμόμετρο ακριβείας 9.81 N και το βέλος της κάμψης με βελόμετρο ακριβείας εκατοστού του mm. Η αντοχή σε κάμψη, σ_b , σύμφωνα με το πρότυπο, δίνεται

$$\sigma_b = \frac{3 \times P_{max} \times L_s}{2 \times b \times d^2} \quad (1)$$

όπου σ_b : αντοχή σε κάμψη (MPa), P_{max} : μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο που αντέχει το δοκίμιο (N), L_s : απόσταση των σημείων στήριξης (m), b: πλάτος του δοκιμίου (m), d: πάχος του δοκιμίου (m)

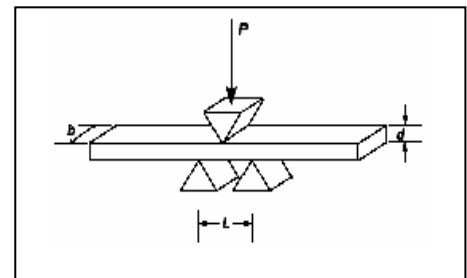


Σχήμα 4. Αντοχή σε κάμψη συνθέτων υλικών σε συνάρτηση με την % κ. β. περιεκτικότητα σε πρόσθετο.

Η αντοχή σε κάμψη ελαττώνεται με την προσθήκη ΑΚΚ. Παρουσιάζει δε περαιτέρω ελάττωση με την αύξηση του περιεχομένου ποσοστού του πρόσθετου στο σύνθετο υλικό (από 30% σε 40% και 50% αντίστοιχα) όπως επίσης και με τη χρήση πρόσθετου μεγαλύτερης κοκκομετρίας (500 μm αντί 300 μm).

Δοκιμή σε διάτμηση

Αντιστοίχως η μέτρηση της αντοχής σε διάτμηση για τα σύνθετα υλικά έγινε ακολουθώντας την μέθοδο που εφαρμόστηκε για την μέτρηση της καμπτικής αντοχής, βάσει του προτύπου ASTM-NORM.D 2344-65 T με την απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης του δοκιμίου στο 1 cm. Για τις μετρήσεις της διατμητικής αντοχής κατασκευάστηκαν δοκίμια κατάλληλων διαστάσεων (μήκος 21 cm, πλάτος 1.7 cm και πάχος 0.3 cm) χρησιμοποιώντας ως μήτρα τις 3 επιλεγείσες ρητίνες (εποξειδική ρητίνη, ακόρεστο πολυεστέρα, ρητίνη νεολάκη).

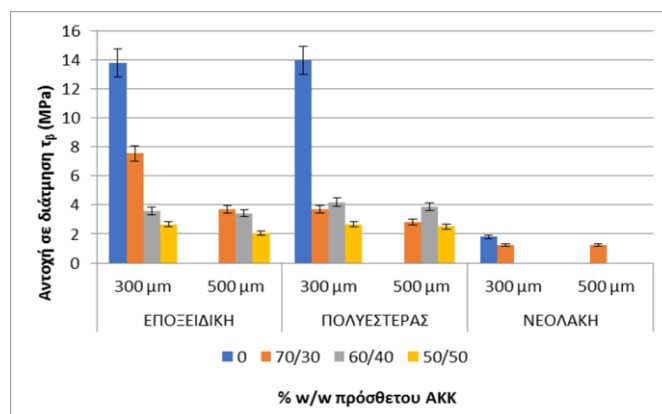


Σχήμα 5. Διάταξη δοκιμής σε διάτμηση.

Η αντοχή σε διάτμηση, τ_b , σύμφωνα με το πρότυπο, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_b = \frac{0.75 \times P_{max}}{b \times d} \quad (2)$$

όπου τ_b : αντοχή σε διάτμηση (MPa), P_{max} : μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο που αντέχει το δοκίμιο (N), b: πλάτος του δοκιμίου (m), d: πάχος του δοκιμίου (m)



Σχήμα 6. Αντοχή σε διάτμηση συνθέτων υλικών σε συνάρτηση με την % κ. β. περιεκτικότητα σε πρόσθετο.

Η αντοχή σε διάτμηση ελαττώνεται με την προσθήκη ΑΚΚ. Παρουσιάζει δε περαιτέρω ελάττωση με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού του πρόσθετου στο σύνθετο υλικό (από 30% σε 40% και 50% αντίστοιχα) όπως επίσης και με τη χρήση πρόσθετου μεγαλύτερης κοκκομετρίας (500 μm αντί 300 μm).

Θερμομονωτική απόδοση σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας με προσθήκη ΑΚΚ

Η θερμομονωτική απόδοση των βέλτιστων από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων συνθέτων υλικών προσδιορίστηκε μέσω του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ . Για την διεξαγωγή των μετρήσεων, κατασκευάστηκαν νέα δοκίμια σε σχήμα δίσκου και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακή διάταξη, η λειτουργία της οποίας βασίζεται στο πρότυπο ASTM C177. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ , προκύπτει από τον τύπο:

$$\lambda = \frac{\Phi \times S_m}{2A(\Theta_{wm} - \Theta_{cm})} \quad (3)$$

Όπου: A η μέση επιφάνεια δοκιμίου (m^2), S_m το μέσο πάχος δοκιμίων (m), Θ_{wm} η μέση θερμοκρασία θερμών επιφανειών δοκιμίων ($^{\circ}K$), Θ_{cm} η μέση θερμοκρασία ψυχρών επιφανειών δοκιμίων ($^{\circ}K$),

Φ η ροή θερμότητας.

Η θερμομονωτική απόδοση των συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με προσθήκη ΑΚΚ είναι αντίστοιχη αυτής που παρουσιάζουν κλασικά υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως σε μονωτικές και δομικές εφαρμογές. Παρουσιάζεται δε βελτιωμένη σε σχέση με την απόδοση των υλικών που κατασκευάστηκαν αποκλειστικά από εποξειδική ρητίνη, ακόρεστο πολυεστέρα και ρητίνη νεολάκη αντίστοιχα, όπως προκύπτει και από τον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 2. Θερμομονωτική απόδοση συνθέτων υλικών.

ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ-ΚΩΔΙΚΟΣ	ΑΚΚ (%w/w)	ΡΗΤΙΝΗ (%w/w)	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (W/m K)
ER-100	0	100	1.20
ER-CDW30-300μm	30	70	1.02
UPR-100	0	100	0.27
UPR-CDW40-300μm	40	60	0.04
N-100	0	100	0.72
N-CDW30-300μm	30	70	0.19

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύνθετα δομικά και μονωτικά υλικά πολυμερικής μήτρας με προσθήκη ΑΚΚ

* Η αντοχή σε κάμψη ελαττώνεται με την προσθήκη ΑΚΚ. Παρουσιάζει δε περαιτέρω ελάττωση με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού του πρόσθετου ΑΚΚ στο σύνθετο υλικό (από 30% σε 40%

και 50% αντίστοιχα) όπως επίσης και με τη χρήση πρόσθετου μεγαλύτερης κοκκομετρίας (500 μm αντί 300 μm).

* Η αντοχή σε διάτμηση ελαττώνεται με την προσθήκη ΑΚΚ. Παρουσιάζει δε περαιτέρω ελάττωση με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού του πρόσθετου ΑΚΚ στο σύνθετο υλικό (από 30% σε 40% και 50% αντίστοιχα) όπως επίσης και με τη χρήση πρόσθετου μεγαλύτερης κοκκομετρίας (500 μm αντί 300 μm).

* Η θερμομονωτική απόδοση είναι αντίστοιχη αυτής των υλικών που χρησιμοποιούνται ευρέως σε μονωτικές και δομικές εφαρμογές. Παρουσιάζεται δε βελτιωμένη σε σχέση με την απόδοση των υλικών που κατασκευάστηκαν αποκλειστικά από εποξειδική ρητίνη, ακόρεστο πολυεστέρα και ρητίνη νεολάκη αντίστοιχα.

Συμπερασματικά, τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με προσθήκη ΑΚΚ σύμφωνα με τις μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητές τους, δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά σε δομικές και μονωτικές εφαρμογές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Widodo B, Lupyanto R, Sulistiono B, Harjito DA, Hamidin J, Hapsari E, Yasin M, Ellinda C. Analysis of Environmental Carrying Capacity for the Development of Sustainable Settlement in Yogyakarta Urban Area. *Procedia Environmental Sciences*. 2015;28:519-527
- [2] <https://www.protothema.gr/greece/article/843903/katedafiseis-sto-kedro-tis-athinas-tha-gremistoun-oloklira-tetragona/>
- [3] Thormark C. A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*. 2002;37(4), 2002:429-435
- [4] Bogiatzidis C, Zoumpoulakis L. Development of building and insulation epoxy based composite materials loaded with Construction and Demolition Wastes; Mechanical and thermal- insulation behaviour analysis. *Journal of Materials Science Research and Reviews*. 2018;1(4):1-11
- [5] Κεφαλά Ν, Βασιλάκης Α, Ζουμπουλάκης Λ. Παραγωγή Συνθέτων Υλικών Εποξειδικής Ρητίνης – Ανόργανων Δομικών Υλικών προερχόμενων από ανακύκλωση. 9ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής. 23-25 Μαΐου 2013, Αθήνα.
- [6] Bogiatzidis C, Semitekolos D, Zoumpoulakis L. Recycling and Exploitation of Construction and Demolition Wastes as Additives in Unsaturated Polyester Composite Building and Insulation Materials; Mechanical and Thermal Properties Investigation. *Journal of Materials Science Research and Reviews*. 2018;1(2):1-11
- [7] Neto RO, Gastineau P, Cazacliu BG, Le Guen L, Paranhos RS, Petter CO. An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms. *Waste Management*. 2017;60:277-289.