

Έρευνα για την παραγωγή θερμομονωτικού κονιάματος από εξηλασμένη πολυστερίνη ως παραπροϊόν κατά την παραγωγική της διαδικασία

Σ. Μαυρίδου, Ν. Οικονόμου, Χ. Χατζηάστρου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: εξηλασμένη πολυστερίνη, θερμομονωτικό κονίαμα, περιβάλλον, ανάλυση κύκλου ζωής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Προς την κατεύθυνση παραγωγής καινοτόμων προϊόντων με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια γίνονται προσπάθειες σύνθεσης κονιαμάτων κατάλληλων και από πλευρά μηχανικών χαρακτηριστικών αλλά και που να ικανοποιούν ταυτόχρονα τις απαιτήσεις θερμικών χαρακτηριστικών. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια και με στόχο τη βιώσιμη και πράσινη ανάπτυξη, αναπτύσσεται τεχνολογία αξιοποίησης διαφόρων παραπροϊόντων λαμβάνοντας υπόψη και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών κατά τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής τους.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα παρασκευής κονιαμάτων με προσθήκη παραπροϊόντος εξηλασμένης πολυστερίνης με στόχο την επίτευξη υψηλών μηχανικών αντοχών και χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της εργασίας αποτελεί η συνολική αντιμετώπιση του προβλήματος αξιοποίησης ενός παραπροϊόντος, όχι μόνο ελέγχοντας τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων μιγμάτων αλλά και μέσω μιας αρχικής αντιμετώπισης και σύγκρισης του νέου προϊόντος ελαφροσκυροδέματος εξηλασμένης πολυστερίνης με τυπικό γαρμπιλοσκυροδέμα, ως υλικά για τη στρώση κλίσεων από περιβαλλοντική σκοπιά. Με βάση τη διεξαχθείσα έρευνα πιστοποιείται η δυνατότητα παρασκευής ενός θερμομονωτικού κονιάματος με ικανοποιητικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες και παράλληλα μειωμένο περιβαλλοντικό φορτίο.

Research for insulating mortar from extruded polystyrene as a byproduct during the production process

S. Mavridou, N. Ikononou, C. Chatziastrou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: extruded polystyrene, thermal insulation mortar, environment, life cycle analysis

ABSTRACT: This paper investigates the possibility of producing mortar with added co-product extruded polystyrene to achieve satisfactory mechanical strength and low thermal conductivity. A special feature of the overall work is tackling a by-product utilization, controlling not only the characteristics of the mixtures produced but also through a preliminary, by environmental point of view, comparison between a conventional product made of natural aggregates and this new one, made with XPS. Based on the investigation, the possibility of producing an insulating mortar with good mechanical and thermal properties with also reduced environmental load is certified.

1 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΑΦΡΩΔΟΥΣ ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ

Οι πλάκες εξηλασμένου αφρώδους πολυστυρενίου, συχνότερα αναφέρεται και ως εξηλασμένη πολυστερίνη, είναι ένα από τα πλέον δημοφιλή θερμομονωτικά υλικά στον κατασκευαστικό κλάδο λόγω της υψηλής απόδοσης και της σταθερότητας των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου.

Οι πλάκες χαρακτηρίζονται από την υψηλή και σταθερή θερμομονωτική ικανότητα, μηδαμινή υδαταπορροφητικότητα, υψηλή αντοχή σε συμπίεση και σταθερότητα των διαστάσεων τους. Παρουσιάζουν δυσκολία στην ανάφλεξη τους αλλά και άσπογη συμβατότητα με τα οικοδομικά υλικά (τσιμέντο, γύψο, ασβέστη, ανυδρίτη) ενώ οι αποφλοιωμένες και με αυλακώσεις / εγκοπές πλάκες προσφέρουν άριστη πρόσφυση σε σκυρόδεμα και επιχρίσματα.

Το μέγιστο μέρος της μάζας του προϊόντος αποτελείται από πολυστυρένιο (PS), ένα θερμοπλαστικό πολυμερές του στυρενίου. Χρησιμοποιείται διάφανο, γενικής χρήσης και υψηλής θερμικής αντοχής κρυσταλλικό πολυστυρένιο (GP-PS). Περιέχονται επίσης, σε μικρά ποσοστά, ορισμένα πρόσθετα που είτε διευκολύνουν τη διεργασία παραγωγής είτε βελτιώνουν ιδιότητες του τελικού προϊόντος, π.χ. χρωστικές ουσίες και επιβραδυντικό φωτιάς. Για την επίτευξη του αφρισμού προστίθενται διογκωτικά αέρια σε ποσοστό 5-8% της συνολικής μάζας που έχουν μηδενική (ODP=0) βλαπτική δράση στην προστατευτική από την υπεριώδη (UV) ακτινοβολία στρατοσφαιρική στοιβάδα όζοντος καθώς και χαμηλό ή μηδενικό δυναμικό συμβολής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (low or zero GWP).

Με τη διεργασία της συνεχούς εξέλασης, σχηματίζεται μία συνεχή πλάκα στο επιθυμητό πάχος (20-200 mm). Το παραγόμενο υλικό είναι ένας στερεοποιημένος, ομοιογενής και σταθερός αφρός με κλειστές (σε ποσοστό >95%) πολυεδρικές κυψελίδες με διάμετρο 0,1 έως 0,4 mm τα τοιχώματα των οποίων έχουν πάχος μόλις 1 μm. Έτσι μόνο το 3% περίπου του όγκου του προϊόντος είναι στερεά ύλη ενώ το υπόλοιπο 97% καταλαμβάνεται από τα διογκωτικά αέρια, με αποτέλεσμα να έχουν ιδιαίτερα χαμηλές πυκνότητες.

Κατά την έναρξη της παραγωγικής διαδικασίας και έως ότου σταθεροποιηθεί η διεργασία εξέλασης απορρίπτεται σημαντικός όγκος, 10-22% της συνολικής παραγωγής ανάλογα με τον τύπο του προϊόντος. Η ποσότητα αυτή τεμαχίζεται σε ειδικό σπαστήρα με μαχαίρια, παράγεται τρίμα μεγέθους ≤ 10 mm και οδηγείται πνευματικά σε σιλό αποθήκευσης παραπροϊόντος.

Λεπτόκοκκο τρίμα παράγεται και μετά τη σταθεροποίηση της διεργασίας εξέλασης, καθώς η συνεχής πλάκα, ανάλογα με τον τύπο του προϊόντος, τεμαχίζεται σε μικρότερες πλάκες τυποποιημένων διαστάσεων, διαμορφώνονται οι τέσσερις περιμετρικές πλευρές τους και επεξεργάζονται οι δύο όψεις τους. Η συλλογή του λεπτόκοκκου τριμάτος γίνεται στο σημείο της επεξεργασίας με απαγωγό που μεταφέρει το υλικό πνευματικά επίσης στο σιλό αποθήκευσης παραπροϊόντος.

Στο σημείο αυτό η βιομηχανία παραγωγής πλακών εξηλασμένης πολυστερίνης έχει δύο δυνατότητες, είτε να διαθέσει το παραπροϊόν στην αγορά εφόσον υπάρχει συγκεκριμένη ζήτηση, είτε να το οδηγήσει στον εξοπλισμό ανακύκλωσης για την επαναχρησιμοποίησή του στην παραγωγική διαδικασία. Αυτό που συμβαίνει σήμερα είναι το δεύτερο, καθώς δεν υπάρχουν εμπορικές εφαρμογές του παραπροϊόντος.

Ο εξοπλισμός ανακύκλωσης είναι μια μονάδα που πραγματοποιεί απαέρωση και εξέλαση μετατρέποντας το τρίμα σε συμπαγείς κόκκους πολυστυρενίου, που εμπεριέχουν και τα στερεά πρόσθετα, διαμέτρου 3-4 mm. Οι κόκκοι αυτοί επαναχρησιμοποιούνται σε

συγκεκριμένο ποσοστό στην παραγωγική διαδικασία έναντι του κρυσταλλικού πολυστυρενίου.

Είναι προφανές ότι λόγω της μη διάθεσης του τρίματος στην αγορά, το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας επιβαρύνεται με το κόστος της ανακύκλωσης (πρόσθετος εξοπλισμός και συντήρηση αυτού, χρήση επιπλέον ενέργειας, κόστος διαχείρισης του ανακυκλωμένου κόκκου ως μια επιπλέον πρώτη ύλη).

2 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ

Σήμερα για την κατασκευή υποστρωμάτων στα δώματα χρησιμοποιούνται σε σημαντικό βαθμό γαρμπιλοσκυροδέματα, για τη δημιουργία των κατάλληλων κλίσεων απορροής των όμβριων υδάτων.

Πρόκειται για προϊόντα που παρασκευάζονται στο εργοτάξιο και χρησιμοποιούν στην σύνθεσή τους πρώτες ύλες με υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς περιέχουν υψηλά ποσοστά πρωτογενών ανόργανων αδρανών και τσιμέντου. Περαιτέρω, λόγω της χαμηλής θερμικής αντίστασής τους, ελάχιστη είναι η συνεισφορά τους στην ενεργειακή αποδοτικότητα των κατασκευών, ενώ παράλληλα τις επιβαρύνουν με στατικά φορτία, αυξάνοντας την ευπάθειά τους έναντι μιας πιθανής σεισμικής δράσης.

Εναλλακτικά στη θέση του γαρμπιλοσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν σειρά ελαφρών κονιαμάτων όπως κισσηρόδεμα, ελαφροσκυρόδεμα με διογκωμένη πολυστερίνη, κυψελωτό σκυρόδεμα και περλιτόδεμα με ή χωρίς τη χρήση αφοροποιητικού παράγοντα.

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ενός καινοτόμου δομικού υλικού – ένα έτοιμο μίγμα ελαφροβαρούς σκυροδέματος αποτελούμενο από τσιμέντο, τρίματα εξηλασμένης πολυστερίνης και βελτιωτικά πρόσθετα – κατάλληλο για την κατασκευή υποστρώματος ρήσεων στα δώματα, εναρμονισμένο με την έννοια της αειφόρου και βιώσιμης ανάπτυξης, ενεργειακά σκόπιμου και με δυνατότητα να συνεισφέρει στον αντισεισμικό σχεδιασμό.

3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΗΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΩΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα εθνικά κατασκευαστικά πρότυπα ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-03-06-02-01 και ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-03-06-01-01 η κατασκευή ρήσεων στα δώματα με κλίση 2% είναι μια υποχρεωτική κατασκευαστική πρακτική, είτε πρόκειται να πραγματοποιηθεί θερμομόνωση με τη συμβατική μέθοδο, είτε πρόκειται να πραγματοποιηθεί η κατασκευή αντεστραμμένου δώματος.

Στη περίπτωση του συμβατικού δώματος, η σειρά των στρώσεων περιλαμβάνει:

1. Πλάκα σκυροδέματος
2. Φράγμα υδρατμών (εκτός εάν ακολουθούν θερμομονωτικές πλάκες XPS)
3. Θερμομόνωση (π.χ. XPS, EPS, MW)
4. Φύλλο διαχωρισμού (συνήθως PE)
5. Στρώση κλίσεων
6. Στεγανοποίηση (μεμβράνες, επαλειπτικά στεγανοποιητικά)

Στη περίπτωση αντεστραμμένου δώματος, η σειρά των στρώσεων περιλαμβάνει:

1. Πλάκα σκυροδέματος
2. Στρώση κλίσεων
3. Στεγανοποίηση (μεμβράνες, επαλειπτικά συνθετικά στεγανοποιητικά)
4. Θερμομόνωση XPS
5. Γεώφασμα
6. Πλάκες πεζοδρομίου ή κροκάλες ανάλογα με την επιθυμία για βατότητα

Στη περίπτωση ασφαλικών μεμβρανών, η στρώση κλίσεων θα πρέπει να επιδέχεται ελαφριάς θέρμανσης με φλόγιστρο χωρίς το κίνδυνο πρόκλησης πυρκαγιάς.

4 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΟΥ ΛΗΦΘΕΙΣΑΝ ΥΠΟΨΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Οι θερμομονωτικές ιδιότητες, σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010, των βασικών υλικών που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα ρήσεων είναι:

Υλικό	Πυκνότητα, ρ Kg/m ³	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, λ W/mK
Γαρμπιλοσκυρόδεμα	1500 - 1900	0,640 - 1,100
Κισσηρόδεμα	500 - 1200	0,200 - 0,460
Ελαφροσκυρόδεμα με διογκωμένη πολυστερίνη	200 - 350	0,065 - 0,110
Κυψελωτό σκυρόδεμα	400 - 1000	0,140 - 0,350
Περλιτόδεμα χωρίς αερακτικό	350 - 600	0,130 - 0,200
Περλιτόδεμα με αερακτικό	350 - 600	0,094 - 0,140

Ειδικότερα όσον αφορά τα ελαφροσκυροδέματα με διογκωμένη πολυστερίνη, που προσομοιάζουν με το νέο προϊόν ελαφροσκυροδέματος με εξηλασμένη πολυστερίνη που σχεδιάστηκε, βρίσκεται υπό ανάπτυξη από τη CEN το πρότυπο prEN 16025-1.

Το πρότυπο που θα τεθεί σε ισχύει από τον 6/2013-Ιούλιο του 2013- μεταξύ άλλων ορίζει μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας κατά EN 12667 και κατηγοριοποίηση με βάση τις μηχανικές αντοχές σε συμπίεση με 10 % παραμόρφωση κατά EN 826. Οι δύο αυτές ιδιότητες κρίνονται ως τις πλέον κρίσιμες στο σχεδιασμό του νέου προϊόντος.

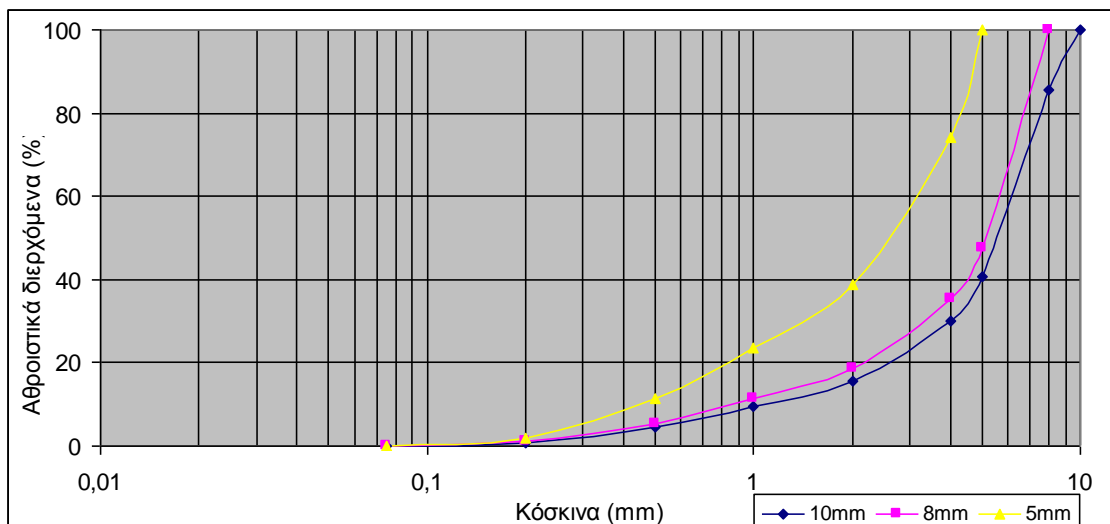
Έτσι, ως στόχος του σχεδιασμού στο νέο προϊόν, τέθηκε η επίτευξη όσο το δυνατόν χαμηλότερου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και παράλληλα η ανάπτυξη όσο το δυνατόν υψηλών μηχανικών αντοχών σε θλίψη με παραμόρφωση 10%.

5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΞΗΡΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Το τρίμα εξηλασμένης πολυστερίνης που χρησιμοποιήθηκε είναι βιομηχανικό παραπροϊόν της εταιρίας FIBRAN ΑΕ. Στο σχεδιασμό του προϊόντος το τρίμα εξηλασμένης πολυστερίνης επέχει θέση αδρανούς και χρησιμοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις:

1. επιλεγμένο κλάσμα ≤ 10 mm, κατηγορία PS10 κατά prEN 16025-1
2. επιλεγμένο κλάσμα ≤ 8 mm, κατηγορία PS8 κατά prEN 16025-1
3. επιλεγμένο κλάσμα ≤ 5 mm, κατηγορία PS5 κατά prEN 16025-1

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των τριών κατηγοριών εξηλασμένης πολυστερίνης που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 1. Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις χρησιμοποιούμενων κλασμάτων εξηλασμένης πολυστερίνης

Το ειδικό βάρος του τρίματος και των τριών κατηγοριών ήταν: $51 \pm 1 \text{ kg/m}^3$

Το τρίμα αναμίχθηκε με σταθερή σύνθεση ξηρού μίγματος κονιάς, M, που αποτελείται από

1. κοινό τσιμέντο Portland CEM 32,5 τύπου II,
2. κονία συμπολυμερούς οξικού βινυλίου και αιθυλενίου,
3. κονία πολυ-συμπυκνώματος σουλφονωμένης μελαμίνης και
4. κονία μέθυλο αιθυλοϋδροξυαιθυλοκυτταρίνης.

Η % κ.β. αναλογία ανάμιξης μεταξύ τρίματος και κονιάματος τσιμέντου/προσθέτων ήταν 17,8:82,2. Ο λόγος Νερού/Τσιμέντο στα νωπά μίγματα διατηρήθηκε επίσης σταθερός στο 0,5. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα μίγματα που παρασκευάστηκαν.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα συνθέσεων

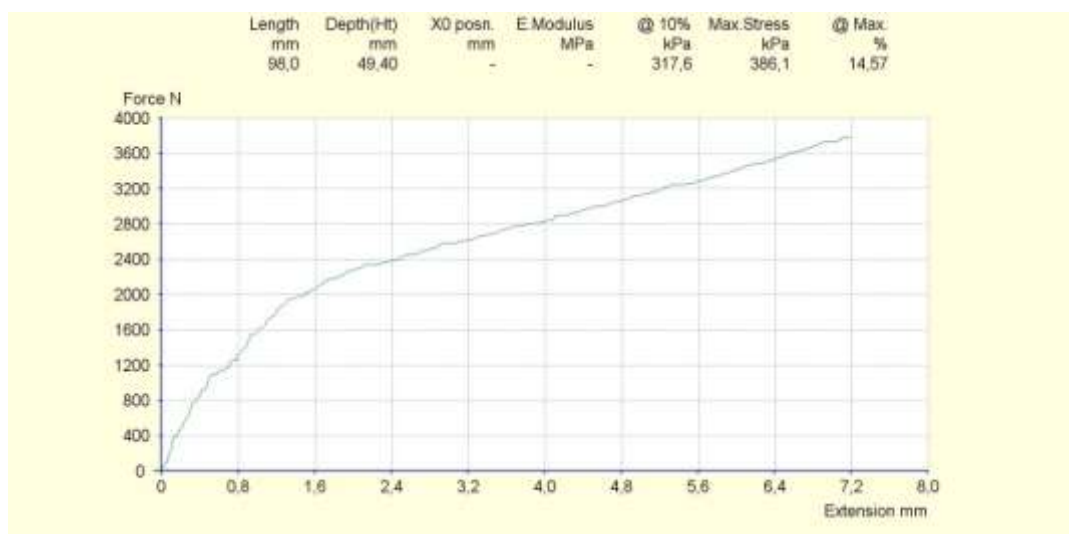
Μίγμα	Ξηρά πυκνότητα τελικού προϊόντος kg/m^3	Αντοχή σε συμπίεση EN 826 KPa	Θερμική αγωγιμότητα EN 12667 W/mK
PS10:M	410	318	0,086
PS8:M	457	333	0,088
PS5:M	568	736	0,096



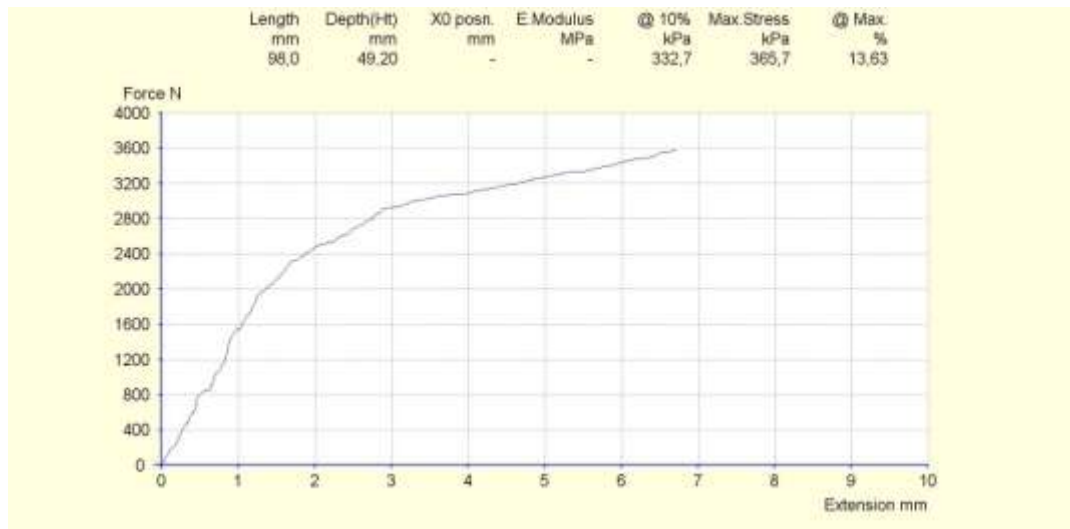
Εικόνα 1. Έλεγχος δοκιμίων στο εργαστήριο εταιρίας FIBRAN

Οι κοκκομετρικές ανάλυσεις του τρίματος, η παρασκευή και η συντήρηση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με διακριβωμένες συσκευές στο Ερευνητικό Εργαστήριο της FIBRAN ΑΕ στη Τερπνή Σερρών. Για τη μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας παρασκευάστηκαν δοκίμια διαστάσεων 300x300x50 mm και για τον έλεγχο των μηχανικών αντοχών δοκίμια 100x100x50 mm.

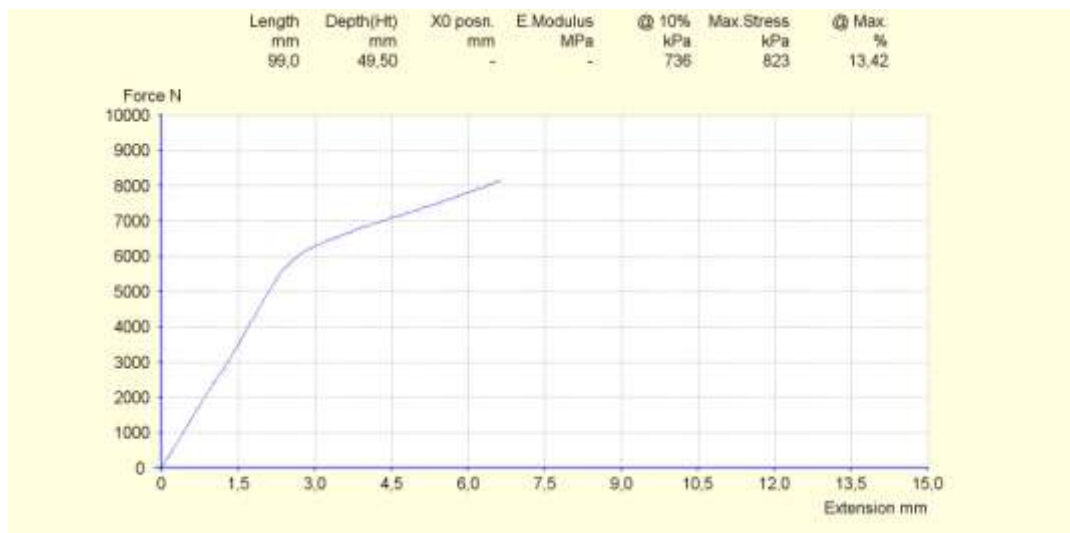
Τα διαγράμματα μέτρησης αντοχών σε συμπίεση παρουσιάζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 2. Διάγραμμα μέτρησης αντοχής σε συμπίεση δοκιμίου PS10:M



Διάγραμμα 3. Διάγραμμα μέτρησης αντοχής σε συμπίεση δοκιμίου PS8:M



Διάγραμμα 4. Διάγραμμα μέτρησης αντοχής σε συμπίεση δοκιμίου PS5:M

5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Και τα τρία μίγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατατάσσουν το τελικό προϊόν στην ανώτερη κατηγορία μηχανικών αντοχών που προβλέπει το πρότυπο prEN 16025-1, CS(10)200 \geq 200 KPa. Η χρήση του λεπτόκοκκου τρίματος PS5 δίνει τη δυνατότητα παρασκευής ελαφροσκυροδεμάτων μεγαλύτερης πυκνότητας με υψηλές μηχανικές αντοχές αλλά χαμηλότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ενώ μεγαλύτερες κοκκομετρίες PS8 και PS10 ευνοούν την παραγωγή τελικού προϊόντος χαμηλότερης πυκνότητας με ωστόσο καλύτερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Η πλήρης επικάλυψη του τρίματος της εξηλασμένης πολυστερίνης από το τσιμέντο στο τελικό προϊόν επιτρέπει την ασφαλή χρήση φλογίστρου για την επικόλληση ασφαλικών μεμβρανών, ενώ η ανοικτή ανόργανη επιφανειακή δομή προσφέρει υψηλή ικανότητα συγκόλλησης σε επαλειπτικά συνθετικά στεγανοποιητικά.

Επομένως το τελικό προϊόν έχει όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που του επιτρέπουν τη χρήση του ως στρώση κλίσεων στα δώματα.

6 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

6.1 Γενικά στοιχεία

Οι εργασίες που συνδέονται με την παραγωγή και τη διακίνηση των δομικών υλικών είναι ποικίλες και πολυάριθμες και κατ' επέκταση τα κριτήρια επιλογής των υλικών αυτών έχουν αυξημένη σημασία. Τα υλικά καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη θερμική και οπτική συμπεριφορά των κτιρίων και επηρεάζουν τόσο το εσωτερικό των κτιρίων όσο και το εξωτερικό περιβάλλον. Η διαδικασία παραγωγής των υλικών, ο κύκλος ζωής τους και η τελική τους διάθεση (απόρριψη) επιδρούν σημαντικά στο γενικότερο περιβάλλον.

Η παραγωγή οικοδομικών υλικών, προϊόντων και κατασκευαστικών λύσεων που προκαλούν τις ελάχιστες δυνατές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις αποτελεί σημαντικό βήμα στην κατεύθυνση της, φιλικής προς το περιβάλλον, δόμησης. Για την επιλογή των δομικών υλικών βάση περιβαλλοντικών κριτηρίων, απαιτούνται γνώσεις σχετικές με τη διαθεσιμότητα και την επάρκεια των φυσικών πρώτων υλών, την απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή αυτών καθώς και τις υπόλοιπες φάσεις του κύκλου ζωής τους, την τοξικότητα, την αντοχή τους στο χρόνο και τη διάρκεια ζωής τους, τις ανάγκες συντήρησης, την περιεκτικότητάς τους σε ανακυκλωμένα υλικά καθώς και τη δυνατότητα επανάχρησης ή ανακύκλωσης αυτών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Σε κάθε περίπτωση, ο μηχανικός που θα επιλέξει τα δομικά υλικά μιας κατασκευής οφείλει να είναι καλός γνώστης των ιδιοτήτων των υλικών, κυρίως εκείνων που επιδρούν αρνητικά στο περιβάλλον και κατ' επέκταση στην ανθρώπινη υγεία.

Οι παράμετροι που προσδιορίζουν τους στόχους της εναρμονισμένης με το περιβάλλον δόμησης, αναφορικά με την παραγωγή των οικοδομικών υλικών και προϊόντων και την εφαρμογή τους στην κατασκευή κτιρίων, μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω:

- ✓ Περιβαλλοντικά ορθός σχεδιασμός προϊόντων
- ✓ Τυποποίηση αυτών
- ✓ Ενσωμάτωση ανακυκλωμένων προϊόντων στη δόμηση
- ✓ Εξασφάλιση εύκολου διαχωρισμού σύνθετων προϊόντων στα συστατικά τους
- ✓ Χαρακτηρισμός συστατικών για διευκόλυνση της διαλογής στη φάση της αποξήλωσης
- ✓ Σχεδιασμός για επανάχρηση
- ✓ Πρόνοια για απλοποίηση της συντήρησης ή επισκευής
- ✓ Πρόνοια για τις φάσεις μετά το τέλος του κύκλου ζωής των υλικών.

Όσον αφορά στην παραγωγική διαδικασία των οικοδομικών υλικών και προϊόντων απαιτείται:

- ✓ Μείωση των απορριμμάτων της διαδικασίας και της καταναλισκόμενης ενέργειας
- ✓ Μείωση της χρήσης τοξικών ουσιών, που περιέχονται στα διάφορα δομικά υλικά

Όσον αφορά στα στάδια διάθεσης, μεταφοράς και εφαρμογής των δομικών υλικών στην κατασκευή, ζητούμενα αποτελούν:

- ✓ Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μεταφοράς,
- ✓ Η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον μέσων μεταφοράς,
- ✓ Η μείωση των εκπομπών και των παραγόμενων αποβλήτων,
- ✓ Η ελαχιστοποίηση συσκευασίας,
- ✓ Οι μέθοδοι και εργασίες κατασκευής που δεν ενοχλούν ή επιβαρύνουν το περιβάλλον,
- ✓ Η οικονομία υλικών και ενέργειας κατά την εφαρμογή τους.

Μέχρι πρόσφατα, η επιλογή των οικοδομικών υλικών επηρεαζόταν από παράγοντες, όπως το κόστος, η διαθεσιμότητα και η λειτουργία τους στην κατασκευή. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται ολοένα και περισσότερο η ανάγκη για πιστοποίηση της χρήσης τους από περιβαλλοντική σκοπιά.

Βασικοί παράμετροι στα δομικά υλικά παίζει η κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή τους καθώς και η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, που αποτελεί ένα από τα βασικά αέρια του θερμοκηπίου. Οι πρώτες ύλες που απαιτούνται για την παραγωγή των οικοδομικών υλικών βρίσκονται στη φύση, αλλά σε ακατέργαστη μορφή. Τόσο η εξαγωγή όσο και ο καθαρισμός τους αποτελούν μία πολύπλοκη διαδικασία που καταναλώνει ενέργεια και παράγει απόβλητα.

6.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Μια από τις τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι η μέθοδος της *ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Analysis-LCA)*. Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν ή δραστηριότητα ή διεργασία. Προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, μπορούν να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών, καθώς και από την απελευθέρωση των αποβλήτων. Επίσης με τον τρόπο αυτό αναγνωρίζονται και εκτιμώνται οι δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων που άπτονται της προστασίας του περιβάλλοντος. Ο στόχος, τα όρια και το επίπεδο των λεπτομερειών μιας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής εξαρτάται από το θέμα και την προβλεπόμενη χρήση της μελέτης. Επίσης το βάθος και το πλάτος ανάλυσης μιας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής μπορεί να διαφέρει αρκετά από τη μια μελέτη στην άλλη, ανάλογα με το σκοπό που έχει η συγκεκριμένη μελέτη. Εντούτοις όμως σε κάθε περίπτωση, οι αρχές και το πλαίσιο που καθιερώνονται από πλευράς Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης με το Διεθνές Πρότυπο ISO14040:1997 (ISO 14040, 1997, A standard on principles and framework of LCA, 1st Edition) πρέπει να ακολουθηθούν ως ελάχιστη προϋπόθεση.

Το πλαίσιο μεθοδολογίας της *ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ)* που προτείνεται από τον SETAC (Society of Environmental Toxicology and Applied Chemistry) αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια:

- Προσδιορισμός του στόχου και του σκοπού της ανάλυσης.
- Καταγραφή δεδομένων, δηλαδή εισροών και εκροών του υπό μελέτη συστήματος, τα οποία γενικά είναι πρώτες ύλες, ενέργεια, απόβλητα και θόρυβος.
- Ανάλυση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Βελτιστοποίηση του κύκλου ζωής.

6.3 Περιβαλλοντική θεώρηση εξηλασμένης πολυστερίνης και νέου προϊόντος

Όπως ισχύει και με άλλα συνθετικά υλικά, ένα τμήμα της ρύπανσης από την εξηλασμένη πολυστερίνη είναι αποτέλεσμα της εξαγωγής του πετρελαίου και της παρασκευής ενδιάμεσων προϊόντων στην πετρελαϊκή βιομηχανία. Προέρχεται από μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (υδρογονάνθρακες), ενώ η κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή της ανέρχεται στα 24,90 MJ/Kg. Ενδεικτικά στοιχεία εκπομπών αερίων και απαιτούμενης ενέργειας για αυτήν δίνονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Στοιχεία εξηλασμένης πολυστερίνης από άποψη εκπομπών αερίων και απαιτούμενης ενέργειας (Αναστασέλος Δ. (2009))

Υλικό	CO ₂ eq (kg)	SO ₂ eq (kg)	PO ₄ eq (kg)	C ₂ H ₄ eq (kg)	Συνολική Ενέργεια (MJ)
Εξηλασμένη πολυστερίνη	2,17	0,01303	0,00132	0,00059	24,90

Ποσοτικά, η εξηλασμένη πολυστερίνη μπορεί να ανακυκλωθεί σε ποσοστό 20% της αρχικής πρώτης ύλης (Αναστασέλος Δ. (2009)]. Ιδιαίτερα σημαντική εναλλακτική επιλογή της αποτελεί η ενσωμάτωσή της σε προϊόντα τσιμέντου για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος, κατάλληλου για δάπεδα, οροφές αλλά και για την κατασκευή δεξαμενών κολύμβησης (Amianti M., Botaro V. (2008).

Στην παρούσα εργασία παρασκευάστηκε ένα προϊόν ελαφροσκυροδέματος με εξηλασμένη πολυστερίνη, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά του τυπικού γαρμπιλοσκυροδέματος ως υλικού για τη στρώση κλίσεων. Τα στοιχεία διαφοροποίησης του τυπικού και του νέου προϊόντος δίνονται παρακάτω:

α. Ελαφροσκυροδέμα εξηλασμένης πολυστερίνης

- ✓ Πυκνότητα τελικού ξηρού προϊόντος: 410 kg/m³
- ✓ Ποσότητα τσιμέντου ανά m² επιφάνειας δώματος για να κατασκευαστεί στρώση κλίσεων μέσου πάχους 10cm: 23,81 kg
- ✓ Ποσότητα εξηλασμένης πολυστερίνης ανά m² επιφάνειας δώματος για να κατασκευαστεί στρώση κλίσεων μέσου πάχους 10cm: 5,24 kg
- ✓ Κατανάλωση νερού ανάμιξης ανά m² επιφάνειας δώματος για να κατασκευαστεί στρώση κλίσεων μέσου πάχους 10 cm: 11,67 kg
- ✓ Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας: 0,086 W/mK
- ✓ Θερμική αντίσταση για στρώση κλίσεων μέσου πάχους 10cm: 1,16 m²K/W

β. Τυπικό γαρμπιλοσκυροδέμα

- ✓ Πυκνότητα τελικού ξηρού προϊόντος: 1500 kg/m³
- ✓ Ποσότητα τσιμέντου ανά m² επιφάνειας δώματος για να κατασκευαστεί στρώση κλίσεων μέσου πάχους 10 cm: 25,00 kg
- ✓ Ποσότητα αδρανών ανά m² επιφάνειας δώματος για να κατασκευαστεί στρώση κλίσεων μέσου πάχους 10 cm: 125,00 kg
- ✓ Κατανάλωση νερού ανάμιξης ανά m² επιφάνειας δώματος για να κατασκευαστεί στρώση κλίσεων μέσου πάχους 10 cm: 17,50 kg
- ✓ Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας: 0,640 W/mK
- ✓ Θερμική αντίσταση για πάχος 10 cm: 0,16 m²K/W

Συγκρίνοντας τα παραπάνω στοιχεία προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Το νέο προϊόν είναι σαφώς χαμηλότερου ειδικού βάρους, εξασφαλίζοντας ευκολότερη διαχείριση (ανάμιξη, μεταφορά, διάστρωση) και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας (μηχανή ανάμιξης και άντλησης), προσδίδοντας παράλληλα στη κατασκευή χαμηλότερο βάρος και κατά συνέπεια μικρότερη επιβάρυνση με φορτία - ιδιότητα εξαιρετικά σημαντική σε επεμβάσεις που πραγματοποιούνται σε υφιστάμενα κτίρια με βάση τον αντισεισμικό κανονισμό.
- ❖ Η ποσότητα τσιμέντου για την κατασκευή ίσου πάχους στρώσης κλίσεων είναι ελαφρώς χαμηλότερη και επομένως υπάρχει ένα έστω μικρό περιβαλλοντικό κέρδος

από τη διαφοροποίηση στην ποσότητα αυτή. Γνωρίζοντας ότι η παρασκευή τσιμέντου Portland είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρος αλλά και εμπέμπει αυξημένη ποσότητα CO₂ η οποία ανέρχεται στον 1 τόνο (Παπαγιάννη, 2009), προτείνεται η περαιτέρω έρευνα για ελάττωση της ποσότητας αυτής, προκειμένου και το τελικό νέο προϊόν να εμφανίζεται περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον- πράσινο υλικό-.

- ❖ Η ποσότητα των φυσικών αδρανών, τα οποία στην πρώτη περίπτωση αντικαθίστανται από το εναλλακτικό υλικό της εξηλασμένης πολυστερίνης, είναι ιδιαίτερα αυξημένη στην περίπτωση της τυπικής στρώσης κλίσεων και λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που απαιτείται για την παρασκευή 1τόνου φυσικών αδρανών υλικών, 1.74 kWh/tn και 1.60 kWh/tn για λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα κλάσματα αδρανών, αντίστοιχα, συμπεραίνεται ότι η ποσότητα της ενέργειας αυτής εξοικονομείται. Παράλληλα αποφεύγεται η χρήση εκρηκτικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των φυσικών αδρανών, με συνέπεια το μειωμένο κόστος αλλά και την αποφυγή εκλυόμενης ενέργειας αλλά και θορύβου κατά τη χρήση αυτών.
- ❖ Σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος προκύπτει από την εξοικονόμηση νερού ανάμιξης καθώς αυτό είναι κατά 33 % λιγότερο στην περίπτωση κατασκευής στρώσεων κλίσης με ελαφροσκυρόδεμα με εξηλασμένη πολυστερίνη.
- ❖ Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για την περίπτωση του νέου προϊόντος είναι πολύ χαμηλότερος από τον αντίστοιχο του τυπικού γαμπιλοσκυροδέματος πυκνότητας 1500 Kg/m³ (0,086 W/MK έναντι 0,640 W/mK) και συνεπώς η θερμική αντίσταση του θερμομονωτικού ελαφροσκυροδέματος εξηλασμένης πολυστερίνης για τυπικό μέσο πάχος στρώσης 10 cm (1,16 m²K/W έναντι 0,16 m²K/W) είναι 625 % υψηλότερη. Με άλλα λόγια, το μέσο πάχος των 10 cm ελαφροσκυροδέματος εξηλασμένης πολυστερίνης θερμομονωτικά ισοδυναμεί με 74 cm τυπικού γαμπιλοσκυροδέματος – πάχος πρακτικά αδύνατο να εφαρμοστεί. Επομένως, σε αντίθεση με το τυπικό γαμπιλοσκυρόδεμα, το ελαφροσκυρόδεμα εξηλασμένης πολυστερίνης είναι προϊόν ενεργειακά σκόπιμο, με σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος να προκύπτει από την εξοικονόμηση ενέργειας στα συνήθη μέσα πάχη εφαρμογής (10-12 cm) ως στρώση κλίσεων στα δώματα.
- ❖ Τέλος πρέπει να σημειώσουμε ότι η σύγκριση του ελαφροσκυροδέματος εξηλασμένης πολυστερίνης πραγματοποιήθηκε με την ευνοϊκότερη περίπτωση, δηλαδή τη παραγωγή και χρήση γαμπιλοσκυροδέματος χαμηλής, πυκνότητας 1500 Kg/m³. Επομένως το περιβαλλοντικό όφελος αναμένεται κατά πολύ μεγαλύτερο σε όλες τις άλλες περιπτώσεις παραγωγής και χρήσης γαμπιλοσκυροδέματος μεγαλύτερης πυκνότητας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η δυνατότητα ανακύκλωσης και αξιοποίησης της εξηλασμένης πολυστερίνης στην παραγωγή καινοτόμων θερμομονωτικών κονιαμάτων πιστοποιείται και μέσω της παρούσας εργασίας, παρέχοντας τελικό προϊόν με ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές και θερμομονωτικές ιδιότητες. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται κατά βάση ένα στερεό βιομηχανικό παραπροϊόν, που ξαναμπαίνει στον κύκλο ζωής της κατασκευής, ελαττώνοντας τις επιπτώσεις από την επιπλέον διαχείρισης και χρήση ενέργειας που απαιτείται για την ενδεχόμενη ανακύκλωσή του, αλλά και διασώζοντας σημαντικές ποσότητες φυσικών αδρανών, τα οποία αντικαθιστά στο νέο τελικό προϊόν.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αξιοποίηση της τρίματος εξηλασμένης πολυστερίνης ως παραπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής θερμομονωτικών πλακών περνά μέσα από την αναζήτηση εμπορικών εφαρμογών για τη χρήση της. Η ενσωμάτωση του τρίματος σε υδραυλικά μίγματα για την παραγωγή ελαφροβαρών σκυροδεμάτων κατασκευής ρήσεων στα δώματα είναι μια τέτοια εφαρμογή, καθώς είναι δυνατόν να παρασκευαστεί ένα καινοτόμο προϊόν με εξαιρετικές θερμομονωτικές ιδιότητες, ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές και χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα, όπως προκύπτει από την αρχική ποιοτική αξιολόγηση του νέου προϊόντος από περιβαλλοντική σκοπιά. Ωστόσο, κρίνεται απαραίτητος ο λεπτομερέστερος περιβαλλοντικός έλεγχος, μέσω ειδικού λογισμικού για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση του νέου υλικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

FIBRAN A.E. (2012), www.fibran.gr

CEN (2009), prEN 16025-1: *Thermal and/or sound insulating products in building construction - Bound EPS ballastings - Part 1: Requirements for factory premixed EPS dry plaster*

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-03-06-02-01: *Θερμομονώσεις δωματίων*, έκδοση 2009-12-23

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-03-06-01-01: *Στεγανοποίηση δωματίων και στεγών με ασφαλικές μεμβράνες*, έκδοση 2009-12-23

ΤΕΕ (2012), Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-2/2010: *Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων*

ΕΛΟΤΕΝ 12667: *Θερμική απόδοση κτιριακών υλικών και προϊόντων - Προσδιορισμός θερμικής αντίστασης με τις μεθόδους προστατευμένης θερμικής πλάκας και μέτρησης ροής θερμότητας - Προϊόντα υψηλής και μέσης θερμικής αντίστασης*, έκδοση 2001-05-08

ΕΛΟΤ EN 825: *Θερμομονωτικά προϊόντα για κτιριακές εφαρμογές - Προσδιορισμός της συμπεριφοράς σε θλίψη*, έκδοση 1997-09-30

Αναστασέλος Δ. (2009) 'Σύστημα αξιολόγησης θερμομονωτικών λύσεων με έμφαση στις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσής τους', Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ.

Amianti M., Botaro V. (2008) 'Recycling of EPS: A new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP)', *Cement & Concrete Composites*, 30, p.23-28.

ISO 14040, 1997, *A standard on principles and framework of LCA, 1st Edition*

Μαυρίδου Σ., (2010) 'Περιβαλλοντική αξιολόγηση συμβατικών δομικών υλικών με συνδυασμό των μεθόδων ανάλυσης κύκλου ζωής και πολυκριτηριακής ανάλυσης', *Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πρόγραμμα Προστασίας Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ*.

Παπαγιάννη Ι., (2009), "Σκυρόδεμα: Μικροδομή, ιδιότητες και υλικά", *Μετάφραση τρίτης Αμερικανικής Έκδοσης των P. Kumar Mehta and Paulo J.M. Monteiro, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, σελ.702*.