

# ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑ ΚΑΙ ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ

**Καραμάνος Α.Κ.\*, Γιαμά Ε., Χαδιαράκου Σ., Παπαδόπουλος Α.Μ.**

Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,  
Τ.Θ.483, 54124, Θεσσαλονίκη, \*[tkar@aix.meng.auth.gr](mailto:tkar@aix.meng.auth.gr)

**KEYWORDS:** πετροβάμβακας, εξηλασμένη πολυστερίνη, ανάλυση κύκλου ζωής

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η σύγκριση του πετροβάμβακα και της εξηλασμένης πολυστερίνης, που θεωρούνται τα σημαντικότερα θερμομονωτικά υλικά. Αρχικά, συγκρίνονται τα σημαντικότερα βασικά χαρακτηριστικά τους, εξηγείται πως αυτά προκύπτουν ανάλογα με τη φύση και τη δομή κάθε υλικού και εξετάζεται η καταλληλότητα τους σε διάφορες εφαρμογές. Στη συνέχεια, δίνεται μια μικρή περιγραφή της αγοράς των θερμομονωτικών υλικών σε Ελλάδα και Ευρώπη και αναφέρονται οι λόγοι που τη διαμόρφωσαν έτσι. Τέλος, εφαρμόζοντας την τεχνική της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού υπολογίζονται η περιεχόμενη ενέργεια και οι εκπομπές κατά την παραγωγή των δύο υλικών.

## COMPARATIVE EVALUATION OF STONE WOOL AND EXTRUDED POLYSTYRENE

**Karamanos A.K.\*, Giama E., Hadirakou S. and Papadopoulos A.M.**

Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering, Mechanical Engineering  
Department, Polytechnic School, Aristotle University of Thessaloniki, P.O. 483, 54124  
Thessaloniki, \*[tkar@aix.meng.auth.gr](mailto:tkar@aix.meng.auth.gr)

**KEYWORDS:** stone wool, extruded polystyrene, life cycle analysis

## ABSTRACT

The research's objective is to compare the stone wool with the extruded polystyrene, two of the most important insulating materials. The comparison focus on basic characteristics according to their chemical composition and structure. Also, the compatibility of the two materials in various applications was considered and the results of market survey, both in Europe and Greece, was

presented in detail. Finally, the Life Cycle Analysis methodology was conducted using specialized software, in order to evaluate the environmental impacts of the materials studied.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θερμομονωτικά υλικά αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των κτιριακών εφαρμογών, γεγονός που επιβάλλεται και από τη νομοθεσία θερμομόνωσης. Η γενικότερη ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και ο περιορισμός της εξάρτησης από το πετρέλαιο έχει οδηγήσει στη χρήση θερμομονωτικών υλικών και σε βιομηχανικές εφαρμογές αλλά και σε εφαρμογές με ιδιαίτερες απαιτήσεις, όπως δεξαμενές υγρού οξυγόνου, διαστημικές εφαρμογές κ.ά.

Σήμερα, ο μελετητής μηχανικός έχει στη διάθεσή του πληθώρα υλικών γεγονός που του δίνει τη δυνατότητα να επιλέξει το καταλληλότερο για την υπό μελέτη εφαρμογή – είτε κτιριακή, είτε βιομηχανική – λαμβάνοντας υπ' όψη του μια σειρά παραμέτρων όπως: θερμομονωτικές απαιτήσεις, θερμοκρασίες λειτουργίας, επίπεδα υγρασίας, κόστος και αισθητική. Επομένως, για να χαρακτηριστεί κάποιο υλικό κρίνεται απαραίτητη η πολύπλευρη εξέταση του και όχι η επικέντρωση του ενδιαφέροντος σε ένα μόνο χαρακτηριστικό του. Δηλαδή, είναι εσφαλμένη η αντίληψη, πως ένα θερμομονωτικό υλικό είναι «καλό» επειδή έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Αρχικά, δινόταν βάση στις φυσικές ιδιότητες καθώς και στις δυνατότητες εφαρμογής. Στη συνέχεια προστέθηκε μία νέα ομάδα χαρακτηριστικών, που σχετίζονται με την ασφάλεια και την υγεία των εργαζομένων (τόσο κατά την παραγωγή, όσο και κατά την τοποθέτηση) και των χρηστών της, καθώς και με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο αμιάντος, ο οποίος ενώ είχε άριστες θερμομονωτικές ιδιότητες και μεγάλο εύρος εφαρμογών, απαγορεύτηκε όταν αποδείχτηκε πως η χρήση του σχετίζεται με καρκινογένεση.

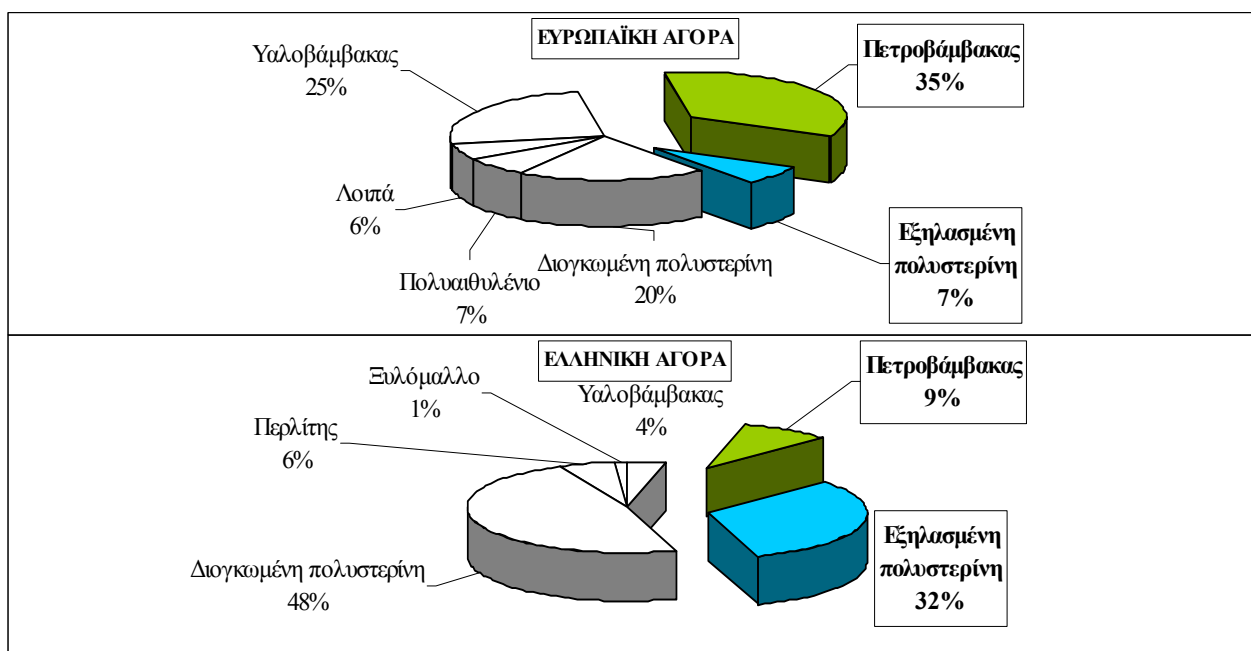
Όσον αφορά στις περιβαλλοντικές ιδιότητες αρχικά το ενδιαφέρον εστιαζόταν στη διαχείριση του υλικού μετά το πέρας της διάρκειας ζωής του και «οικολογικό» χαρακτηριζόταν ένα υλικό που ήταν βιο-διασπώμενο ή ανακυκλώσιμο.

Η εκτόξευση της τιμής του πετρελαίου οδήγησε τη σύγχρονη αγορά στην εκμετάλλευση κάθε δυνατού τρόπου εξοικονόμησης ενέργειας με αποτέλεσμα να προωθηθεί η έρευνα των θερμομονωτικών υλικών σε μεγάλο βάθος. Πλέον, δεν λαμβάνεται υπ' όψη μόνο η ενέργεια που εξοικονομείται με τη χρήση του υλικού, αλλά και η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή, τη μεταφορά και την τοποθέτηση του, γνωστή και ως *περιεχόμενη ενέργεια*. Σε μερικές περιπτώσεις, όπου η διάρκεια ζωής είναι περιορισμένη (όπως στις βιομηχανικές εφαρμογές), εκτιμάται και η ενέργεια για τη διαχείριση του ως απόβλητο ή οι δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας από αυτό. Για την εκτίμηση και την περιβαλλοντική αξιολόγηση των υλικών χρησιμοποιείται η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (A.K.Z.). Η A.K.Z. αποτελεί εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης και λήψης αποφάσεων που σκοπό έχει να αποτιμήσει τις επιπτώσεις από τη χρήση ενέργειας και την επεξεργασία υλικών, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης αποβλήτων στο περιβάλλον, και να εκτιμήσει τις δυνατότητες επίτευξης περιβαλλοντικών βελτιώσεων σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μία διεργασία.

Στην παρούσα εργασία, αναλύονται διάφορα χαρακτηριστικά (τεχνικά και περιβαλλοντικά) για τα δύο σημαντικότερα θερμομονωτικά υλικά, τον πετροβάμβακα και την εξηλασμένη πολυστερίνη, αφού πρώτα σχολιαστεί η συμμετοχή τους στην αγορά και οι λόγοι που τη διαμόρφωσαν. Τέλος, ακολουθεί περιβαλλοντική αξιολόγηση των υλικών με τη μέθοδο A.K.Z. και χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού G.E.M.I.S.

## 1. Η ΕΙΚΟΝΑ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑ ΚΑΙ ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ

Στο σχήμα 1 απεικονίζεται η κατάσταση στην ευρωπαϊκή και στην ελληνική αγορά. Γίνονται δύο βασικές διαπιστώσεις: στην Ευρώπη προτιμούνται τα ινώδη θερμομονωτικά υλικά, ενώ στην Ελλάδα τα οργανικά αφρώδη. Επιπλέον, η διογκωμένη πολυστερίνη υπερτερεί σε πωλήσεις έναντι της εξηλασμένης.



**Σχήμα 1:** Μεριδία αγοράς θερμομονωτικών υλικών σε Ευρώπη και Ελλάδα (2003)

Οι λόγοι που οδήγησαν στην τάση αυτή είναι:

- Οι μεγαλύτεροι καταναλωτές θερμομονωτικών υλικών είναι οι χώρες της βόρειας και κεντρικής Ευρώπης. Οι τοπικοί κανονισμοί στις χώρες αυτές απαιτούν μεγαλύτερο πάχος θερμομόνωσης και έτσι προτιμάται ο πετροβάμβακας που έχει χαμηλότερο κόστος.
- Στους μεγαλύτερους καταναλωτές – χώρες επιβάλλονται αυστηροί κανονισμοί πυροπροστασίας στον κτιριακό τομέα. Αξιοσημείωτες είναι οι περιπτώσεις της Μεγάλης Βρετανίας και της Γερμανίας. Στην πρώτη, οι περισσότερες κατασκευές είναι ξύλινες, πράγμα που επιβάλλει αυστηρότερα μέτρα πυρασφάλειας. Στη δεύτερη, οι σχετικοί κανονισμοί έγιναν αυστηρότεροι μετά από σειρά ατυχημάτων από πυρκαγιές, με αποκορύφωμα την μεγάλη πυρκαγιά στο αεροδρόμιο του Ντύσεντολφ, που στοίχισε πολλές ανθρώπινες ζωές. Σε θέματα πυραντοχής, ο πετροβάμβακας υπερτερεί σαφώς έναντι της πολυστερίνης
- Τα οργανικά αφρώδη υλικά έχουν τη μορφή πλάκας και είναι ευκολότερα στην τοποθέτηση. Επιπλέον, δεν απαιτούνται μέτρα προστασίας κατά την εφαρμογή τους, γεγονός που τα έκανε προτιμότερα για τον ανειδίκευτο και ανεπαρκώς ενημερωμένο σε θέματα ασφάλειας Έλληνα εργάτη οικοδομής.

Η διογκωμένη πολυστερίνη προτιμάται έναντι της εξηλασμένης, λόγω του χαμηλού κόστους της. Επιπλέον, για την Ελλάδα, το κόστος αυτό είναι ακόμα πιο χαμηλό γεγονός που την κατέστησε ανταγωνιστική δίνοντάς της υψηλό μερίδιο αγοράς.

Παρόλα αυτά, η θέσπιση αυστηρότερων κανονισμών θερμομόνωσης, πυρασφάλειας και οικολογικής δόμησης, οδηγούν σε αύξηση των πωλήσεων του πετροβάμβακα. Επιπλέον, η

εξηλασμένη πολυστερίνη αρχίζει και προτιμάται λόγω της εξαιρετικής της αντοχής σε θλίψη και υγρασία, πράγμα που την καθιστά αναντικατάστατο υλικό σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως, για παράδειγμα στη θερμομόνωση στοιχείων σκυροδέματος. Εκτιμάται, ότι μελλοντικά το μερίδιο του πετροβάμβακα στην ελληνική αγορά θα συγκλίνει με αυτό της ευρωπαϊκής και τα ποσοστά πωλήσεων της εξηλασμένης πολυστερίνης θα αυξηθούν και στις δύο αγορές.

## 2. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν ένα υλικό και λαμβάνονται υπ' όψη πριν την εφαρμογή του είναι:

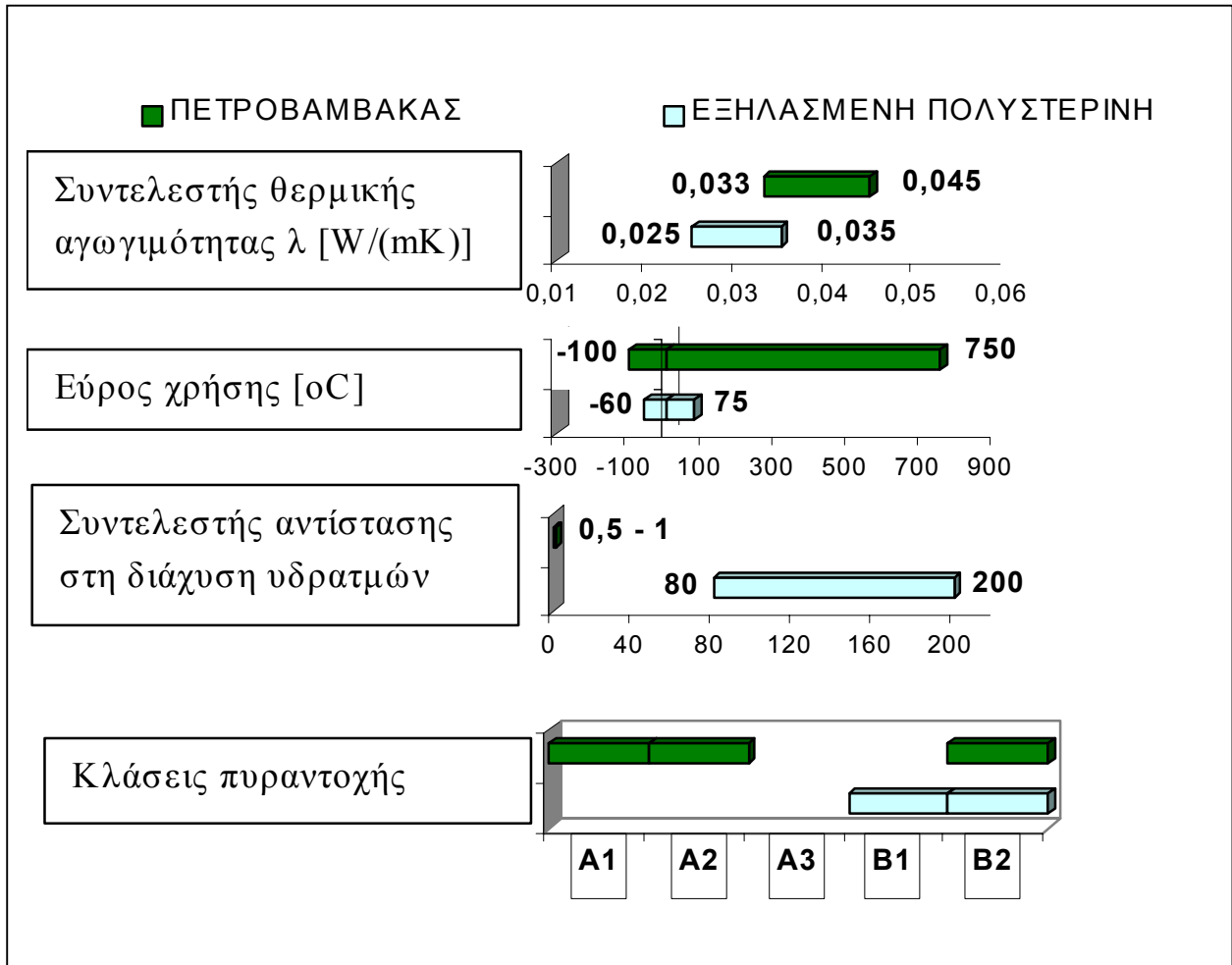
- i. Η θερμομονωτική του ικανότητα
- ii. Το εύρος των θερμοκρασιών στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί
- iii. Η αντοχή του στην υγρασία
- iv. Η αντοχή του στη φωτιά
- v. Η ηχομονωτική του ικανότητα

Κάθε ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά εκφράζεται με τα αντίστοιχα μεγέθη, που μετρώνται σύμφωνα με συγκεκριμένους κανονισμούς προτύπων και έχουν καθιερωθεί από σχετικούς οργανισμούς, όπως A.S.T.M. και D.I.N. Τα μεγέθη που εκφράζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι, σε αντιστοιχία:

- i. Ο *συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας* εκφράζει το πόσο εύκολα διαπερνά η θερμότητα το υλικό. Όσο χαμηλότερος είναι ο συντελεστής, τόσο μεγαλύτερη η θερμομονωτική ικανότητα του υλικού. Εκφράζεται σε μονάδες  $W/(mK)$  και δείχνει τι ποσό θερμικής ενέργειας (σε Watt) διαπερνά ένα μέτρο πάχους του υλικού όταν η θερμοκρασιακή διαφορά είναι 1K.
- ii. Η *μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας* εκφράζουν τα θερμοκρασιακά όρια μέσα στα οποία ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταβάλλεται ανεπαίσθητα, το υλικό δηλαδή διατηρεί τη θερμομονωτική του ικανότητα. Τα όρια δίνονται σε βαθμούς  $^{\circ}C$  ή K. Άλλη ιδιότητα σχετική με τις θερμοκρασίες εφαρμογής είναι και η *θερμοκρασία τήξης* (προφανώς σε  $^{\circ}C$  ή K). Βέβαια, η θερμοκρασία τήξης είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (το υλικό έχει ήδη αχρηστευτεί εφόσον έχει ξεπεραστεί η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του), αλλά αναφέρεται γιατί η τήξη του υλικού δημιουργεί πλέον ζητήματα κινδύνου για τους ανθρώπους και το περιβάλλοντα χώρο, στον οποίο εφαρμόζεται.
- iii. Ο *συντελεστής αντίστασης στη διάχυση υδρατμών* εκφράζει τη δυσκολία με την οποία διαχέονται υδρατμοί δια μέσου της μάζας του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο δυσκολότερα οι υδρατμοί διέρχονται μέσω της μάζας του υλικού. Πρόκειται για αδιάστατο μέγεθος. Άλλο σχετικό μέγεθος είναι η *ποσότητα υγρασίας εξομοίωσης*, η οποία εκφράζει το ποσό της υγρασίας που απορροφήθηκε στο υλικό υπό ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και σχετικής υγρασίας.
- iv. Η *πυραντοχή* του υλικού προσδιορίζεται κατά το DIN 4102, σύμφωνα με το οποίο τα υλικά κατατάσσονται σε κλάσεις πυραντοχής. Οι κλάσεις της πυραντοχής από την καλύτερη (μεγάλη διάρκεια αντοχής κατά την πυρκαγιά) είναι A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 και C3. Συνοπτικά, τα υλικά των κατηγοριών A1 και A2 δεν παρουσιάζουν καμία ανάφλεξη, τα υλικά των κατηγοριών A3 και B1 αντιστέκονται στη φωτιά και τέλος, τα υλικά των κατηγοριών B2 και κάτω δεν αντιστέκονται στη φωτιά ή ακόμη είναι εύφλεκτα.

v. Ο βαθμός απορρόφησης ήχου περιγράφει την ηχοαπορροφητικότητα του υλικού για διάφορες συχνότητες ήχου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής, τόσο καλύτερη είναι η ηχοαπορροφητικότητα του υλικού.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι τιμές των βασικών χαρακτηριστικών του πετροβάμβακα και της εξηλασμένης πολυστερίνης. Πρέπει, να σημειωθεί πως οι τιμές ποικίλουν ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής, τον τύπο και την πυκνότητα του κάθε προϊόντος. Γι αυτό δίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή σε κάθε ιδιότητα. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, πως τιμές βαθμού απορρόφησης ήχου δεν έχουν καταχωρηθεί, αφού η εξηλασμένη πολυστερίνη δεν παρουσιάζει ηχοαπορροφητικότητα και δεν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ηχομόνωσης.



**Σχήμα 2:** Συγκριτική αξιολόγηση των φυσικών ιδιοτήτων πετροβάμβακα και εξηλασμένης πολυστερίνης

Η θερμομονωτική ικανότητα των υλικών οφείλεται στον αέρα που περιέχεται στη μάζα τους. Και τα δύο υλικά περιέχουν αέρα μέσα στη μάζα τους και επομένως η θερμομονωτική τους ικανότητα είναι το ίδιο καλή. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι ίδιας τάξης μεγέθους και εξαιρετικά χαμηλός. Η εξηλασμένη πολυστερίνη μπορεί να υπερέχει ελαφρά, αλλά σε πρακτική εφαρμογή και τα δύο υλικά παρέχουν την ίδια θερμική προστασία στην κατασκευή.

Οι διαφορές οφείλονται στον τρόπο με τον οποίο έχει εγκλωβιστεί ο αέρας μέσα στη μάζα τους και γενικότερα στη φύση των δύο υλικών: Ο πετροβάμβακας ανήκει στα ανόργανα ινώδη υλικά. Αποτελείται από ίνες μέσης διαμέτρου 15μm, που συνδέονται με τη χρήση ειδικών συνδετικών ρητινών. Η εξηλασμένη πολυστερίνη ανήκει στα οργανικά αφρώδη υλικά και έχει τη μορφή ελαφράς πλάκας. Στην πρώτη περίπτωση ο αέρας είναι εγκλωβισμένος ανάμεσα στις ίνες και έχει

άμεση επαφή με το περιβάλλον. Στη δεύτερη, βρίσκεται με τη μορφή μικρών φυσαλίδων μέσα στη μάζα του υλικού και έχουν ελάχιστη επαφή με τον εξωτερικό αέρα. Είναι χαρακτηριστικό, πως αυτή η αντίθετη φύση τους σε συνδυασμό με τον τρόπο με τον οποίο περιέχεται ο αέρας μέσα στη μάζα τους διαφοροποιεί τις ιδιότητες των δύο υλικών.

Τα οργανικά πλαστικά υλικά καίγονται και τήκονται εύκολα, για το λόγο αυτό η εξηλασμένη πολυστερίνη έχει περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών χρήσης. Αντίθετα, οι ανόργανες ίνες του πετροβάμβακα έχουν προέλευση ηφαιστειακών πετρωμάτων, με μεγάλη αντοχή στη θερμοκρασία. Έτσι, η πολυστερίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε κτιριακές ή σε «ελαφρές» βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. δίκτυα θερμού νερού), αφού αντέχει μέχρι τους 75°C. Αντίθετα, ο πετροβάμβακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών, όπως, δίκτυα υπέρθερμου ατμού και χυτήρια, ή ακόμα και σε διαστημικές εφαρμογές. Επιπλέον, η εύκαμπτη μορφή του πετροβάμβακα τον καθιστά ικανό να καλύπτει κυρτές και κυλινδρικές επιφάνειες. Η εξηλασμένη πολυστερίνη μπορεί να καλύψει τέτοιου είδους επιφάνειες μόνο εφόσον έχει παραχθεί σε μορφή κοχυλιών, γεγονός που συνεπάγεται υψηλό κόστος.

Η ανόργανη φύση του πετροβάμβακα τον καθιστά ως υλικό με μεγάλη αντίσταση στην πυρκαγιά, γι' αυτό και ορισμένοι τύποι του ταξινομούνται στην κλάση A1 της πυραντοχής. Αντίθετα, η εξηλασμένη πολυστερίνη τήκεται πολύ εύκολα, με αποτέλεσμα να γίνεται επικίνδυνη σε περιπτώσεις πυρκαγιάς, αφ' ενός μεν γιατί ορισμένοι τύποι της είναι εύφλεκτοι και αφ' ετέρου δε, γιατί κατά την καύση της παράγονται τοξικά αέρια.

Οι ανοιχτές κυψέλες αέρα στον πετροβάμβακα, τον καθιστούν ευάλωτο στη διάχυση υδρατμών, αφού οι τελευταίοι διαπερνούν σχετικά εύκολα τη μάζα του. Όσον αφορά την τοιχοποιία, το παραπάνω δεν αποτελεί πρόβλημα, αφού ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των υδρατμών είναι ίσος με αυτόν του αέρα (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $\lambda_{\text{υδρατμών}} = 0,026 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η υγρασία διαπερνά την τοιχοποιία, η θερμική αγωγιμότητα παραμένει σταθερή, αφού οι υδρατμοί δεν συμπυκνώνονται. Αντίθετα, στα στοιχεία σκυροδέματος, η υγρασία διαπερνά μόνο τον πετροβάμβακα με αποτέλεσμα να δημιουργείται συμπύκνωση υδρατμών ανάμεσα στο μονωτικό και το δομικό υλικό. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νερού είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν του αέρα (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $\lambda_{\text{νερού}} = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), με αποτέλεσμα να χάνεται η θερμομονωτική του ικανότητα και να παρατηρούνται φθορές στο στοιχείο σκυροδέματος. Γι' αυτό το λόγο προτιμάται η εξηλασμένη πολυστερίνη στη μόνωση στοιχείων σκυροδέματος, καθώς παρουσιάζει εξαιρετική αντίσταση στη διάχυση υδρατμών. Στις βιομηχανικές εφαρμογές, όπου η χρήση της εξηλασμένης πολυστερίνης είναι αδύνατη, χρησιμοποιείται πετροβάμβακας ο οποίος έχει καλυφθεί εξωτερικά με στεγανωτική μεμβράνη.

Τέλος, μόνο ο πετροβάμβακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ηχομόνωση, αφού η εξηλασμένη πολυστερίνη δεν παρουσιάζει ηχοαπορροφητικότητα.

### **3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΛΙΚΩΝ**

#### 3.1 Βασικές περιβαλλοντικές ιδιότητες θερμομονωτικών υλικών

Παρόλο που τα θερμομονωτικά υλικά αποτελούν ένα από τα βασικότερα εργαλεία για την εξοικονόμηση ενέργειας και συνεπώς, για τη μείωση των εκπομπών των επικίνδυνων ρύπων, υπάρχουν ενεργειακοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί κατά την παραγωγή τους. Η πολιτική αυτή υιοθετείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση η οποία υποχρεώνει τους κατασκευαστές να φέρουν περιβαλλοντική πιστοποίηση στα προϊόντα τους.

Στα θερμομονωτικά υλικά, τα κρισιμότερα μεγέθη που πιστοποιούν την περιβαλλοντική φύση του υλικού είναι:

- i. *Η περιεχόμενη ενέργεια:* Είναι η χρησιμοποιούμενη ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή μονάδας μάζας του υλικού. Περιλαμβάνει την ενέργεια για κάθε μια από τις διεργασίες από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι και την τελική τοποθέτηση του υλικού στο κτίριο. Εκφράζεται σε kWh/kg υλικού. Εναλλακτικά, πολλές φορές υπολογίζεται η *ανηγμένη στο εμβαδόν περιεχόμενη ενέργεια:* Είναι η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή και την τοποθέτηση ποσότητας θερμομονωτικού υλικού, ικανής να μονώσει μια μονάδα επιφάνειας, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο κατάλληλος συντελεστής θερμοπερατότητας. Για να βρίσκεται ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου μέσα στα όρια που ορίζει ο Ελληνικός Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτιρίων, πρέπει ο συντελεστής θερμοπερατότητας του μονωτικού υλικού να είναι περίπου  $0,8W/(m^2K)$ . Επομένως, στους υπολογισμούς που γίνονται στη συνέχεια της εργασίας, θα λαμβάνεται η παραπάνω τιμή.
- ii. Οι *εκπομπές ρύπων στη διάρκεια ζωής του θερμομονωτικού υλικού.* Πρόκειται για τους επικίνδυνους ρύπους που εκπέμπονται, κυρίως, κατά την παραγωγή του υλικού. Κυριότεροι θεωρούνται το CO, που είναι τοξικό και το CO<sub>2</sub>, που αποτελεί το βασικότερο θερμοκηπικό αέριο.

Στη φάση αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η περιγραφή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία του πετροβάμβακα και της εξηλασμένης πολυστερίνης. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση θα γίνει με εφαρμογή της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής με τη χρήση του υπολογιστικού λογισμικού GEMIS. Αναλυτικότερα, στη συνέχεια ακολουθούν σύντομη περιγραφή της μεθοδολογίας A.K.Z. που αναπτύχθηκε στα υπό μελέτη συστήματα παραγωγής με χρήση του μοντέλου GEMIS.

### 3.2 Εισαγωγή στη μεθοδολογία A.K.Z.

Η A.K.Z. είναι μια «τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από την χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων». (SETAC -Society for Environmental Toxicology and Chemistry, 1991).

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης και λήψης αποφάσεων που σκοπό έχει να αποτιμήσει τις επιδράσεις από τη χρήση ενέργειας και την επεξεργασία υλικών, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης αποβλήτων στο περιβάλλον, και να εκτιμήσει τις δυνατότητες επίτευξης περιβαλλοντικών βελτιώσεων σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας.

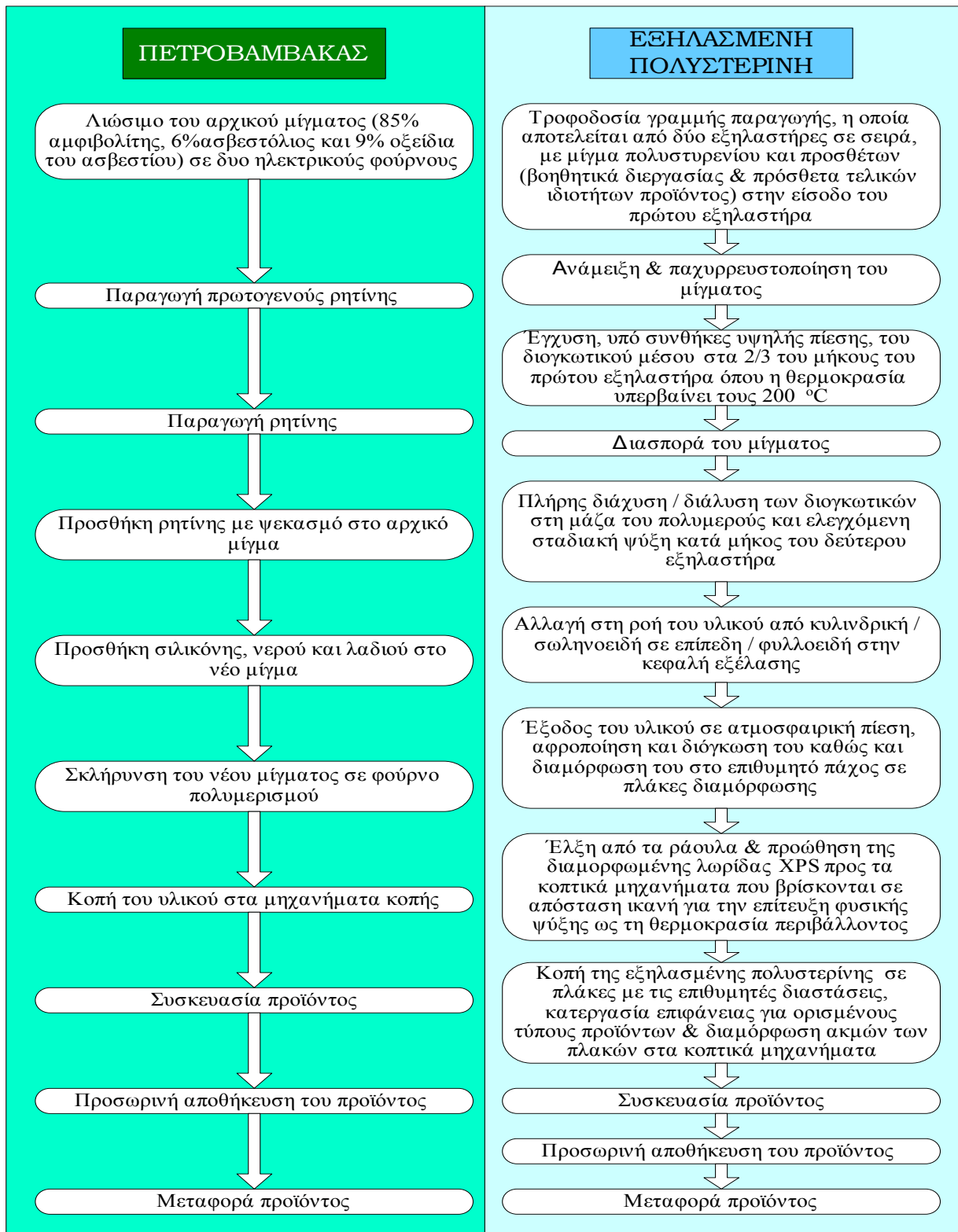
Το πλαίσιο μεθοδολογίας της AKZ που προτείνεται από τον SETAC και εφαρμόζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια:

- Προσδιορισμό του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης
- Απογραφή δεδομένων
- Εκτίμηση των επιπτώσεων
- Εκτίμηση των βελτιώσεων

### 3.3 Εφαρμογή της AKZ στα δύο υπό μελέτη θερμομονωτικά

Αρχικά, ορίζονται τα υπό μελέτη συστήματα για τα οποία θα υπολογιστούν με λεπτομέρεια οι εισροές πρώτων υλών και ενέργειας καθώς και οι εκροές που αφορούν στις αέριες εκπομπές, στα υγρά και στερεά απόβλητα. Η μελέτη εστιάζεται κυρίως στην παραγωγική διαδικασία των δύο υλικών καθώς έχει διαπιστωθεί από ποιοτική περιβαλλοντική αξιολόγηση πως οι σημαντικότερες

επιπτώσεις προκύπτουν κατά την παραγωγική διαδικασία των υλικών. Δηλαδή, η παραγωγή των δύο υλικών συνεισφέρει πρακτικά σε όλη την περιεχόμενη ενέργεια. Η παραγωγική διαδικασία του πετροβάμβακα και της εξηλασμένης πολυστερίνης αναλύεται στις διεργασίες που απεικονίζονται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3: Παραγωγική διαδικασία πετροβάμβακα και εξηλασμένης πολυστερίνης



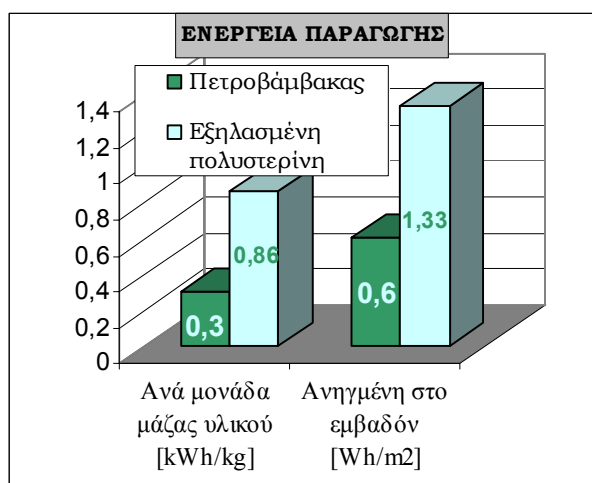
Στον πίνακα 1 καταγράφονται τα δεδομένα εισροών ενέργειας και πρώτων υλών για τα υπό μελέτη συστήματα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1:** Στοιχεία για τις πρώτες ύλες και τις ενεργειακές καταναλώσεις των επιμέρους διεργασιών κατά την παραγωγή πετροβάμβακα και εξηλασμένης πολυστερίνης

<b>ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΡΟΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑ</b>		<b>ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΡΟΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ</b>	
<b>ΕΝΕΡΓΕΙΑ(kWh/kg προϊόντος)</b>			
Ηλεκτρική ενέργεια (kWh/kg προϊόντος)	0,3	Ηλεκτρική ενέργεια (kWh/kg προϊόντος)	0,9
Θέρμανση [lt/tn προϊόντος]	33,3		
<b>ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ ( tn/tn προϊόντος)</b>			
<i>Μίγμα ορυκτών</i>		Πολυστυρένιο	0,62
Αμφιβολίτης	0,03	Διογκωτικά μέσα	0,06
Ασβεστόλιθος	0,01	Πρόσθετα	0,015
Βωξίτης	0,004		
<b>Παραγωγή ρητίνης ( tn/tn προϊόντος)</b>			
Φορμαλδεύδη	0,04		
Φαινόλη	0,01		
Ουρία	0,02		
Σιλάνιο	3,64		
Θεική αμμωνία	0,0004		
Αμμωνία	0,001		
Καυστική σόδα	0,002		
Θεικό οξύ	0,0007		
<b>Βοηθητικά υλικά ( tn/tn προϊόντος)</b>			
Σιλικόνη	0,001		
Ορυκτέλαιο	0,002		
<b>Υλικό επικάλυψης ( tn/tn προϊόντος)</b>			
Αλουμίνιο	0,4		
Αλουμινόχαρτο	0,4		
Χαρτί	0,003		
Υαλούφασμα	0,002		
<b>Υλικό συσκευασίας ( tn/tn προϊόντος)</b>			
LDPE	0,0125	LDPE	0,018

Επιπλέον, υπολογίζεται η απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή μονάδας βάρους από το κάθε υλικό. Η τιμή που υπολογίζεται είναι ουσιαστικά η περιεχόμενη ενέργεια του υλικού. Επίσης, υπολογίστηκε η ανηγμένη στο εμβαδόν περιεχόμενη ενέργεια. Επιλέχθηκε η ποσότητα υλικού που απαιτείται για τη θερμομόνωση ενός τετραγωνικού μέτρου επιφάνειας και ο συντελεστής θερμικής θερμοπερατότητας για το μονωτικό υλικό που επιτυγχάνεται να είναι  $k = 0,8W(m^2K)$ . Οι ποσότητες πετροβάμβακα και εξηλασμένης πολυστερίνης που απαιτούνται για αυτή τη δεδομένη τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας είναι 2 και 1,55kg αντίστοιχα. Αναμενόμενο, αφού η εξηλασμένη πολυστερίνη έχει ελαφρά μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και επιπλέον μικρότερη πυκνότητα. Στο σχήμα 4, δίνεται η περιεχόμενη και η ανηγμένη στο εμβαδόν περιεχόμενη ενέργεια. Στον πίνακα 2, δίνονται οι εκπομπές κατά την παραγωγή του κάθε υλικού.

Είναι σαφές πως ο πετροβάμβακας πλεονεκτεί έναντι της εξηλασμένης πολυστερίνης, ως προς την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του, καθώς και για τις μικρότερες εκπομπές CO και CO<sub>2</sub>, που συνεισφέρουν σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.



**ΠΙΝΑΚΑΣ 2:**

Εκπομπές κατά την παραγωγή πετροβάμβακα και εξηλασμένης πολυστερίνης

**Σχήμα 4:** Περιεχόμενη και ανηγμένη περιεχόμενη ενέργεια πετροβάμβακα και εξηλασμένης πολυστερίνης

Ρύποι (kg ρύπου/kg υλικού)	Πετροβάμβακας	Εξηλασμένη πολυστερίνη
CO <sub>2</sub>	0,700	0,900
CO	0,070	0,080
SO <sub>2</sub>	0,010	0,002
Υγρά απόβλητα	0,100	0,001
Τέφρα	0,040	0,040
Λοιπά στερεά απόβλητα	0,050	0,040

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, αναφέρονται επιγραμματικά κάποια ουσιώδη σημεία της εργασίας και ορισμένα κρίσιμα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτή. Ο πετροβάμβακας και η εξηλασμένη πολυστερίνη αποτελούν τα σημαντικότερα μονωτικά υλικά, αφού έχουν καλή θερμομονωτική ικανότητα. Το πρώτο έχει θερμοκρασιακές αντοχές, πυραντοχή, χαμηλό κόστος και ηχοαπορροφητικότητα. Συνεπώς, αναμένεται μεγάλη άνοδος στη ζήτησή του, καθώς εφαρμόζονται ολοένα αυστηρότεροι κανονισμοί πυροπροστασία και θερμομόνωσης. Επιπλέον, είναι από τα λίγα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές. Δεδομένου ότι έχει αναπτυχθεί νομικό πλαίσιο για τη βιομηχανική θερμομόνωση, καθίσταται σαφές ότι θα παίξει πρωταγωνιστικό ρόλο και στις βιομηχανικές εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, η εξηλασμένη πολυστερίνη καθίσταται αναντικατάστατη, λόγω της εξαιρετικής της αντίστασης στην υγρασία. Η χρήση της για θερμομόνωση φερόντων στοιχείων σκυροδέματος είναι αποκλειστική. Επιπλέον, λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έτοιμα προϊόντα συνδυασμένων υλικών (sandwich panels), τα οποία αποτελούν το μέλλον των κατασκευών. Βέβαια, το κόστος της παραμένει υψηλό και κάποιοι νέοι τύποι πετροβάμβακα υψηλής μηχανικής αντοχής

(πετροβάμβακας πλεκτής ίνας) απειλούν την κυριαρχία της στο συγκεκριμένο μερίδιο αγοράς. Τέλος, η υποχρέωση οικολογικής σήμανσης στα μονωτικά υλικά, δίνει προβάδισμα στον πετροβάμβακα που έχει περισσότερο οικολογικό χαρακτήρα από την εξηλασμένη πολυστερίνη εμφανίζοντας χαμηλότερη ενέργεια παραγωγής και μικρότερες εκπομπές CO και CO<sub>2</sub>, ρύποι που συμβάλλουν σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

## 5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Klopffer W., O. Hutzinger, A. Schmidt, A. Ulf Clausen, A. Astrup Jensen and O. Kamstrup (2003) “**Comparative Life Cycle Assessment of Three Insulation Materials**”, Research program deliverable booklet
2. Μουσιόπουλος Ν. και Α. Μπούρα (1998) «Ανάλυση Κύκλου Ζωής», Πρακτικά **Σεμιναρίου HELCANET (Ελληνικό Δίκτυο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής)**, σ. 131, Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 1998
3. Παπαδόπουλος Α.Μ και Μ.Α Παπαδόπουλος (2001) «Σύγχρονα θερμομονωτικά υλικά ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων», Πρακτικά **1<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Κτίριο και Περιβάλλον**, Αθήνα.
4. Papadopoulou A. M., Karamanos A., Avgelis A. (2002) “Environmental impact of insulating materials at the end of their useful lifetime”, Proc. Int. Conf. **Protection and restoration of the environment VI**, p. 1625 – 1632, Skiathos, Greece, 1-5 July, 2002.