

## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΠΡΟΣΟΨΗΣ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

**Α. Σκαροπούλου, Δ. Κιούπης, Γ. Κακάλη, Σ. Τσιβιλής\***  
Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα  
(\*[stsiv@central.ntua.gr](mailto:stsiv@central.ntua.gr))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αυστηρές νομοθεσίες της ΕΕ όσον αφορά το ενεργειακό αποτύπωμα κτηρίων, καθώς και η οικονομική κρίση, η οποία έχει πλήξει τον κατασκευαστικό τομέα, καθιστούν την ανακαίνιση και ανακατασκευή των κτηρίων πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος. Η απαίτηση για πιο ενεργειακά αποδοτικά κτήρια, καθώς και η πρόοδος της επιστήμης, ανοίγουν νέους ορίζοντες στην ανάπτυξη καινοτόμων υλικών.

Στα πλαίσια του έργου “Multifunctional facades of reduced thickness for fast and cost-effective retrofitting”, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα “FP7-2013-NMP-ENV-EeB” της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αναπτύχθηκε ένα πολυστρωματικό πάνελ πρόσοψης. Αυτό αποτελείται από ένα συνδυασμό καινοτόμων υλικών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ή συνεργιστικά ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου, οδηγώντας σε πάνελ με μειωμένο βάρος, χαμηλό κόστος, ικανοποιητική ανθεκτικότητα και βελτιωμένη απόδοση.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται η σύνθεση και ο χαρακτηρισμός των μεμονωμένων υλικών καθώς και οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Το τελικό πάνελ έχει συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$  0.32 W/m<sup>2</sup>K και βάρος 10 ή 29 Kg/m<sup>2</sup>, χωρίς ή με την προσθήκη του δομικού στοιχείου, αντίστοιχα.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

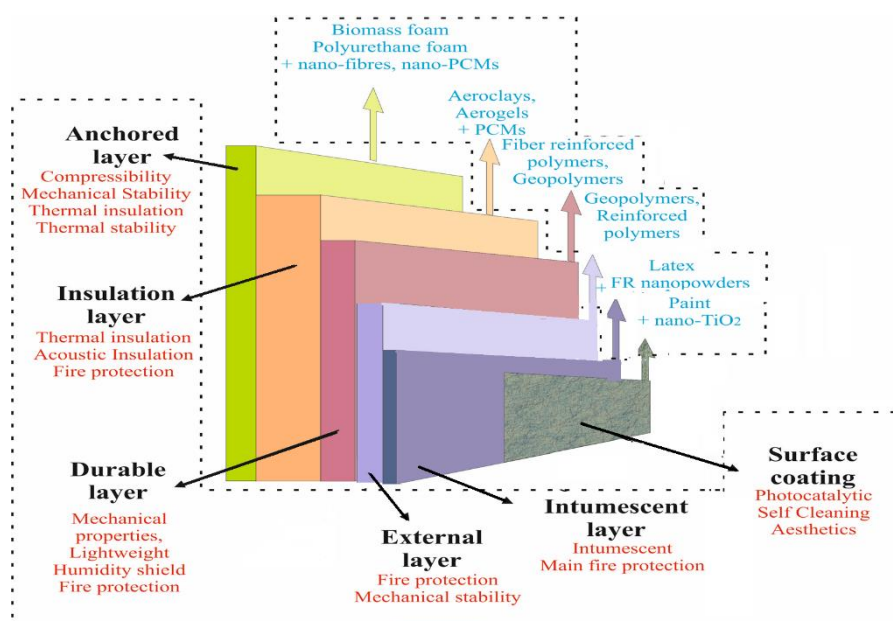
Η ΕΕ έχει θέσει σαφείς οδηγίες για την αντιμετώπιση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με στόχο τη μείωση τους κατά 20% μέχρι το 2020, τουλάχιστον κατά 40% μέχρι το 2030 και σε παγκόσμιο επίπεδο κατά 50% μέχρι το 2050, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990<sup>[1,2]</sup>. Ο κτηριακός τομέας κρίνεται ιδιαίτερα ενεργοβόρος καθώς είναι υπεύθυνος για πάνω από το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και το 36% των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub><sup>[3]</sup>. Για τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των κτηρίων έχουν θεσμοθετηθεί αυστηρές ευρωπαϊκές και εθνικές οδηγίες. Τα νέα κτήρια σχεδιάζονται με βάση τις οδηγίες αυτές, ενώ στα ήδη υπάρχοντα κτήρια η μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης επιτυγχάνεται κυρίως με τη χρήση, κατάλληλα σχεδιασμένων, πάνελ πρόσοψης.

Τα πάνελ αυτά οφείλουν να έχουν θερμομονωτικές και δομικές ιδιότητες, σταθερότητα και ανθεκτικότητα στην πυρκαγιά, προσφέροντας ένα καλαισθητό αποτέλεσμα. Τα πάνελ της αγοράς καλύπτουν μέρος των παραπάνω ιδιοτήτων, δίνοντας βαρύτητα είτε στις θερμομονωτικές είτε στις δομικές ιδιότητες.

Το έργο MF-Retrofit στοχεύει στην αντιμετώπιση των πολυάριθμων απαιτήσεων για την ανακαίνιση και ανακατασκευή, αναπτύσσοντας ένα ελαφρύ, ανθεκτικό, οικονομικό και υψηλής απόδοσης πάνελ<sup>[4]</sup>. Η πολυστρωματική δομή του επιτρέπει ξεχωριστή, αλλά και συνεργιστική λειτουργία στοχεύοντας στην υψηλή θερμομόνωση, στις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, στην επιβράδυνση της φλόγας και στη φωτοκαταλυτική δράση. Προκειμένου να επιτευχθούν αυτά τα χαρακτηριστικά, συνδυάστηκε ένα πλήθος τεχνικών και τεχνολογιών και χρησιμοποιήθηκε ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών. Για τη σύνθεση των υλικών χρησιμοποιήθηκαν βιομηχανικά παραπροϊόντα και διαδικασίες με χαμηλό ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Στην εργασία παρουσιάζονται η σύνθεση και ο χαρακτηρισμός των μεμονωμένων υλικών καθώς και οι ιδιότητες του τελικού πάνελ. Συγκεκριμένα το πάνελ αποτελείται από στρώσεις i) εύκαμπτης και σκληρής πολυουρεθάνης για θερμική και ακουστική μόνωση και καλή εφαρμογή

στην επιφάνεια του κτηρίου, ii) ανόργανου μονωτικού υλικού για μόνωση και πυροπροστασία, iii) ελαφροβαρούς γεωπολυμερούς για δομική στήριξη, iv) ενισχυμένου πολυμερούς για επιπλέον στήριξη και προστασία σε πυρκαγιά, v) ενισχυμένου latex για μηχανική σταθερότητα και vi) τελικής επικάλυψης για αισθητικό αποτέλεσμα και φωτοκαταλυτικό καθαρισμό (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Τα στρώματα του πάνελ

## ΜΟΝΩΤΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Το θερμομονωτικό στρώμα του πάνελ αποτελείται από πολυουρεθάνη και αργιλική αερογέλη. Η πολυουρεθάνη αποτελεί το στρώμα αγκίστρωσης στον υφιστάμενο τοίχο, συμβάλλοντας και στις μονωτικές ιδιότητες του πάνελ. Κατά την παρασκευή της, χρησιμοποιήθηκαν πολυόλες οι οποίες συντέθηκαν από πρώτες ύλες ανανεώσιμων πηγών. Αναστολέας φλόγας και PCMs (phase change materials) προστέθηκαν για να ενισχύσουν τις ιδιότητες του στρώματος<sup>[5]</sup>. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2, το στρώμα της πολυουρεθάνης είναι ένας συνδιασμός εύκαμπτης και σκληρής, επιτυγχάνοντας βέλτιστη επαφή με τον τοίχο και την αργιλική αερογέλη, καθώς και μέγιστη απόδοση των ιδιοτήτων του υλικού (θερμομόνωση, ηχομόνωση, μηχανική σταθερότητα). Για τη βελτιστοποίηση της σύνθεσης αξιολογήθηκαν αποτελέσματα θερμικών (θερμική αγωγιμότητα, hot disk test, hot box test, DSC) και μηχανικών δοκιμών (αντοχή σε κάμψη, διάτμηση, θλίψη της σκληρής πολυουρεθάνης και του συνδυασμού). Η βέλτιστη σύνθεση είχε πυκνότητα 101 και 98 Kg/m<sup>3</sup> (ελαστική και σκληρή αντίστοιχα), συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ) 0.037 W/mK και πάχος 25-28-20 mm (ελαστική-σκληρή-ελαστική).

Το κύριο θερμομονωτικό τμήμα του πάνελ είναι η αργιλική αερογέλη, ένα ανόργανο καινοτόμο υλικό, καθώς χρησιμοποιεί ως πρώτες ύλες ορυκτά, άφθονα στη φύση και χημικά αδρανή. Κατά την παραγωγή της, ο μπεντονίτης αναμείχθηκε με ενισχυτικό παράγοντα (πολυβινυλική αλκοόλη) σε υδατικό περιβάλλον για τη δημιουργία γέλης και η παραλαβή της αερογέλης πραγματοποιήθηκε με εξάχνωση υπό κενό. Δοκιμάστηκαν διάφορα είδη και ποσοστά συμμετοχής των πρώτων υλών και διαφορετικές θερμοκρασίες ψύξης<sup>[6]</sup>. Η βελτιστοποίηση της σύνθεσης βασίστηκε στο βέλτιστο συνδυασμό πυκνότητας, θερμικής αγωγιμότητας (πρότυπο EN 12667 και ASTM C518), απορροφητικότητας σε νερό (πρότυπο ASTM C1104) και ευφλεκτότητας. Η τελική σύνθεση είχε πυκνότητα 50 kg/m<sup>3</sup>, συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0.035 W/mK και πάχος 30 mm. Επιπλέον, πέρασε το τεστ αντίστασης σε φωτιά σύμφωνα με το πρότυπο DIN 4102.



**Σχήμα 2.** Απεικόνιση του συνδυασμού των μονωτικών στρωμάτων

### ΔΟΜΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Το δομικό στρώμα του πάνελ είναι γεωπολυμερές, ένα υλικό με μικρό ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα (μικρή απαίτηση σε ενέργεια, ελάχιστη εκπομπή CO<sub>2</sub>) κατά την παραγωγή σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά, και με εύρος ιδιοτήτων ανάλογα με τις απαιτήσεις. Κατά την παραγωγή αξιοποιήθηκαν βιομηχανικά παραπροϊόντα, καθώς έλαβε χώρα αλκαλική ενεργοποίηση, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή ελαφρώς αυξημένη, της ιπτάμενης τέφρας. Εξετάστηκε, με τη βοήθεια πολυπαραγοντικού μοντέλου Taguichi, η επίδραση των συνθηκών ωρίμανσης, των μοριακών λόγων Si/Al και R/Al, όπου R:Na ή K στο αρχικό διάλυμα, του είδους του αλκαλίου στο διάλυμα ενεργοποίησης και του λόγου μαζών στερεών προς υγρά (s/l) στο αρχικό μίγμα<sup>[7]</sup>. Για τη βελτιστοποίηση της σύνθεσης αξιολογήθηκαν αποτελέσματα μηχανικών αντοχών (πρότυπο EN 196-1) σε σχέση με την πυκνότητα, τη θερμική αγωγιμότητα (πρότυπο EN 12667 και ASTM C518) και την ευφλεκτότητα (πρότυπο FAR-25 (25.853 (a) και Παράρτημα F, Part I, para (a) (1) (ii), AITM 2.0002 B)). Το γεωπολυμερές είναι άκαυστο, η τελική σύνθεση είχε αντοχή σε θλίψη 11 MPa, κάμψη 2 MPa, πυκνότητα 1050 kg/m<sup>3</sup>, λ: 0.16 W/mk και το τελικό πάχος ορίστηκε στα 15 mm.

### ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Το στρώμα αυτό αποτελείται από τρία τμήματα. Μια άκαμπτη επιφάνεια που προσφέρει μηχανική σταθερότητα και επιβράδυνση της διάδοσης της φλόγας, ένα φιλμ με αντιδιαβρωτικές ιδιότητες και επιπλέον προστασία έναντι στη φωτιά και το επίχρισμα, που προσφέρει φωτοκαταλυτικές ιδιότητες και αισθητικό αποτέλεσμα.

Η άκαμπτη επιφάνεια αποτελείται από ένα συνδετικό πολυμερές, που αποτελεί τη μήτρα, και από ίνες ενίσχυσης. Εξετάστηκαν το μέγεθος, το σχήμα, η αναλογία βάρους/όγκου και το υλικό των ινών, καθώς και το είδος και το ποσοστό της πρώτης ύλης του συνδετικού πολυμερούς, χαρακτηριστικά που καθορίζουν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Βέλτιστη απόδοση επιτεύχθηκε συνδυάζοντας ένα σύστημα εποξικής ρητίνης βασισμένο σε αλειφατικές πολυαμίνες ως συνδετικό πολυμερές, ενισχυμένο από 4 στρώσεις ίνες υάλου σε μορφή πλέγματος. Η τελική σύνθεση είχε πυκνότητα 1870 Kg/m<sup>3</sup>, λ: 0.32 W/mK και πάχος 1.5 mm.

Το φιλμ είναι ένα υλικό δύο συστατικών και έχει την ιδιότητα πάνω από τους 250°C, να μετατρέπεται σε αφρό σχηματίζοντας ένα σταθερό, θερμομονωτικό κέλυφος. Για την απόδοσή του, εξετάστηκαν διάφορα νανοσωματίδια και πολυμερή καθώς και αντικατάσταση του διαλύτη από πλαστικοποιητή για τον έλεγχο του ιξώδους. Ερευνήθηκε η ανθεκτικότητα του φιλμ κατά την έκθεσή του στο περιβάλλον, καθώς και ο τρόπος εφαρμογής του. Αξιολογήθηκε η ευφλεκτότητά του, ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας (πρότυπο BS 476 Part 7), η διάβρωση και αποκόλληση τμημάτων του κελύφους και η τυχόν φθορά του υποστρώματος μετά τη φωτιά. Η τελική σύνθεση είχε πυκνότητα 1500 Kg/m<sup>3</sup>, λ: 0.2 W/mK και πάχος 1 mm.

Το φωτοκαταλυτικό στρώμα είναι μια βαφή και αποτελείται από τροποποιημένο TiO<sub>2</sub> το οποίο διασπείρεται σε κατάλληλο διαλύτη. Εξετάστηκε το είδος της τροποποίησης, η φύση του διαλύτη, καθώς και η ενσωμάτωση άλλων προσθέτων, όπως ουσίες επιφανειοδραστικές, αντιαφριστικές, διασποράς και διαβροχής<sup>[8]</sup>. Επιπλέον εξετάστηκε η συμβατότητά του με το υπόστρωμα (φιλμ).

Πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός του φωτοκαταλυτικού στρώματος με FTIR, XRD, XPS και εκτίμηση της φωτοκαταλυτικής του απόδοσης με μπλε του μεθυλενίου και πορτοκαλί του μεθυλίου. Η τελική σύνθεση είχε πυκνότητα  $1000 \text{ Kg/m}^3$ ,  $\lambda$ :  $0.035 \text{ W/mK}$  και πάχος  $0.15 \text{ mm}$ .

### ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΠΑΝΕΛ

Για την ενσωμάτωση των επιμέρους στρωμάτων σε ένα πανελ, δοκιμάστηκαν διάφορες εναλλακτικές μέθοδοι και επιλέχθηκε αυτή με την καλύτερη συνοχή. Στο στρώμα αγκίστρωσης, η ελαστική πολυουρεθάνη είναι σε επαφή με τον τοίχο καλύπτοντας κάθε επιφανειακή ανωμαλία, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει την αργλική αερογέλη, συμβάλλοντας στη μηχανική σταθερότητα. Το γεωπολυμερές συντέθηκε πάνω στην αργλική αερογέλη<sup>[9]</sup>. Η άκαμπτη επιφάνεια του εξωτερικού στρώματος συνδυάστηκε με το φιλμ προστασίας ενάντια στη φλόγα και βιάστηκε με το φωτοκαταλυτικό χρώμα, αυξάνοντας τη συνεκτικότητα των στρωμάτων (Σχήμα 3). Για την ένωση όλων των στρωμάτων, επιλέχθηκε μέθοδος πλαισίωσης με συγκόλληση, επιτυγχάνοντας τη χρήση ελάχιστης ποσότητας αλουμινίου μικρού πάχους.

Το τελικό πάνελ έχει συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$   $0.32 \text{ W/m}^2\text{K}$ , βάρος  $10$  ή  $29 \text{ Kg/m}^2$  και πάχος  $10$  ή  $12 \text{ cm}$ , χωρίς ή με την προσθήκη του δομικού στοιχείου, αντίστοιχα. Η συνολική απόδοση του πάνελ προσδιορίστηκε μέσω εργαστηριακών και επιτόπιων δοκιμών καθώς και με προσομοίωση (μοντελοποίηση) της λειτουργίας του. και εικονικών δοκιμών. Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας βρέθηκε να επηρεάζεται κατά  $70\%$  λιγότερο από την εξωτερική. Συγκρίθηκε το πάνελ με αντίστοιχης λειτουργικότητας πάνελ του εμπορίου και βρέθηκε αύξηση της μέγιστης τάσης και του συντελεστή ελαστικότητας κατά  $75\%$  και  $85\%$ , αντίστοιχα. Δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης (έκθεση σε υψηλό UV, υγρασία και διάφορες θερμοκρασιακές συνθήκες) εφαρμόστηκαν στο πάνελ, δείχνοντας ικανοποιητική ανθεκτικότητα του πάνελ. Σημαντική διαπιστώθηκε η προστασία του εξωτερικού στρώματος, και οι αυτοκαθαριζόμενες ιδιότητες του πανελ φαίνεται να χάνονται βαθμιαία μετά τα  $10$  χρόνια ζωής. Τα πάνελ που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια του προγράμματος τοποθετήθηκαν σε  $4$  τοίχους πιλοτικών κτηρίων με ή χωρίς μόνωση και βρέθηκε ότι το  $U$  βελτιώνεται κατά  $30-75\%$ .



Συνδυασμός  
πολυουρεθάνης



Αργλική αερογέλη  
& γεωπολυμερές



Εξωτερικό στρώμα

**Σχήμα 3.** Φωτογραφίες από τα συνδυασμένα στρώματα του πάνελ

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια του έργου “Multifunctional facades of reduced thickness for fast and cost-effective retrofitting”, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα “FP7-2013-NMP-ENV-EeB” της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αναπτύχθηκε ένα πολυστρωματικό πάνελ πρόσοψης.

Το πάνελ αποτελείται από στρώσεις i) εύκαμπτης και σκληρής πολυουρεθάνης για θερμική και ακουστική μόνωση και καλή εφαρμογή στην επιφάνεια του κτηρίου, ii) ανόργανου μονωτικού υλικού για μόνωση και πυροπροστασία, iii) ελαφροβαρούς γεωπολυμερούς για δομική στήριξη, iv) ενισχυμένου πολυμερούς για επιπλέον στήριξη και προστασία σε πυρκαγιά, v) ενισχυμένου latex για μηχανική σταθερότητα και vi) τελικής επικάλυψης για αισθητικό αποτέλεσμα και

φωτοκαταλυτικό καθαρισμό. Για τη σύνθεση των παραπάνω υλικών χρησιμοποιήθηκαν βιομηχανικά παραπροϊόντα και διαδικασίες με χαμηλό ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Το τελικό πάνελ έχει συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$  0.32 W/m<sup>2</sup>K και βάρος 29 ή 10 Kg/m<sup>2</sup> με ή χωρίς την προσθήκη του δομικού στοιχείου, αντίστοιχα. Η χρήση του πάνελ βελτιώνει τη θερμική απόδοση του κοινού τοίχου κατά 30-75%, ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Multifunctional facades of reduced thickness for fast and cost-effective retrofitting [MF-Retrofit]», και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω FP7-2013-NMP-ENV-EeB.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [https://europa.eu/european-union/topics/climate-action\\_en](https://europa.eu/european-union/topics/climate-action_en)
- [2] <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/intro>
- [3] <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>
- [4] <https://cordis.europa.eu/project/rcn/108536/factsheet/en>
- [5] C. Amaral, R. Vincente, J. Eisenblatter, P.A.A.P. Marques. *Ciencia&Tecnologia dos Materiais* 29 (2) (2017) 1-7
- [6] A. Skaropoulou, A. Ntziouni, D. Kioupis, S. Tsvilis, G. Kakali. *MATEC Web of Conferences* 149 (01078) (2018) 1-4
- [7] G. Kakali, D. Kioupis, A. Skaropoulou, S. Tsvilis. *MATEC Web of conferences* 149 (01042) (2018) 1-4
- [8] I. Deligkiozi, P. Karlsson, T. Kosanovic, M. Pappa, P.M. Sakas, A. Zoikis-Karathanasis. *EinB2014* (2014) 1-13
- [9] A. Skaropoulou, D. Kioupis, S. Tsvilis, G. Kakali. *EinB2016* (2016) 1-7