

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ

**ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΤΩΝ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ**

Α. ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ: ΔΚ2
ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗ ΕΠΑΡΚΕΙΑ
ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ**

Α΄ έκδοση

Αθήνα, Ιούνιος 2011

Ομάδα εργασίας θεματικής ενότητας ΔΚ2:

Ανδρουτσόπουλος Ανδρέας	Μηχανολόγος μηχανικός, M.Sc., υπεύθυνος εργαστηρίου Ενεργειακών Μετρήσεων, Τμήμα Κτηρίων, Δ/ση Ενεργειακής Αποδοτικότητας, Κ.Α.Π.Ε.
Αραβαντινός Δημήτρης	Δρ. πολιτικός μηχανικός, αναπληρωτής καθηγητής στο Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτηρίων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
Θεοδοσίου Θεόδωρος	Δρ. πολιτικός μηχανικός, λέκτορας στο Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτηρίων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
Λάσκος Κωνσταντίνος	Πολιτικός μηχανικός, υποψήφιος διδάκτορας, Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτηρίων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
Μπίκας Δημήτριος	Δρ. αρχιτέκτων μηχανικός, καθηγητής στο Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτηρίων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
Τσικαλουδάκη Κατερίνα	Δρ. πολιτικός μηχανικός, λέκτορας στο Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτηρίων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

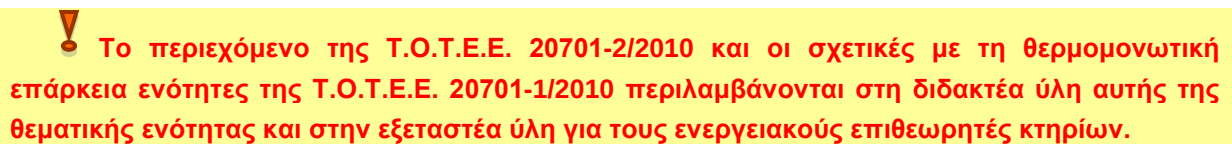
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ	5
1.1.1.	Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) και οι θεμελιώδεις μονάδες	5
1.1.2.	Παράγωγοι μονάδες.....	6
1.1.3.	Πολλαπλάσια και υποπολλαπλάσια μονάδων.....	8
1.1.4.	Άλλες μονάδες	9
1.1.5.	Το αγγλοσαξωνικό μετρητικό σύστημα.....	10
2.	Η ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	12
2.1.	ΜΟΡΦΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	12
2.1.1.	Μετάδοση με αγωγή	12
2.1.1.1.	Αγωγή θερμότητας σε ομογενές επίπεδο υλικό.....	13
2.1.1.2.	Θερμική αντίσταση δομικού υλικού.....	14
2.1.2.	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δομικού υλικού.....	15
2.1.3.	Μετάδοση με συναγωγή	17
2.1.3.1.	Εξίσωση συναγωγής θερμότητας.....	17
2.1.3.2.	Συντελεστής συναγωγής	18
2.1.4.	Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.....	18
2.1.4.1.	Μέλαν σώμα - Νόμος του Planck - Νόμος των Stefan-Boltzmann	19
2.1.4.2.	Ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα, διαπερατότητα ακτινοβολούμενης θερμότητας.....	20
2.1.4.3.	Νόμος του Kirchhoff	21
2.1.4.4.	Ακτινοβολία μεταξύ δύο μαύρων παράλληλων πλακών.....	22
3.	Η ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	24
4.	ΤΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	25
4.1.	ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	25
4.2.	ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	25
4.2.1.	Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ	26
4.2.2.	Η επίδραση της θερμοκρασίας	27
4.2.3.	Η επίδραση της υγρασίας	27
4.2.4.	Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	27
4.2.5.	Η χημική συμπεριφορά	28
4.2.6.	Η αντίσταση στη φωτιά	28
4.2.7.	Η μηχανική αντοχή.....	28
4.2.8.	Η ηχομονωτική ικανότητα	28
4.3.	Η ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	29
4.4.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	29
4.4.1.	Η διογκωμένη πολυστερίνη	29
4.4.2.	Η αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη	30
4.4.3.	Η πολυουρεθάνη.....	32
4.4.4.	Ο υαλοβάμβακας	33
4.4.5.	Ο πετροβάμβακας.....	34
4.4.6.	Το αφρώδες γυαλί.....	35
4.4.7.	Το ξυλόμαλλο.....	36
4.4.8.	Τα πορώδη θερμομονωτικά τούβλα	37

4.4.9.	Οι ελαφροβαρείς τσιμεντόλιθοι	38
4.4.10.	Ο φελλός.....	39
4.4.11.	Άλλα φυσικά θερμομονωτικά υλικά	40
4.4.11.1.	Η κυτταρίνη	40
4.4.11.2.	Το μαλλί προβάτου	40
4.4.11.3.	Η κάνναβη	41
4.4.11.4.	Το λινάρι.....	41
4.5.	Η ΘΕΡΜΟΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ	41
5.	ΚΟΥΦΩΜΑΤΑ.....	43
5.1.	ΤΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΚΟΥΦΩΜΑΤΑ	43
5.1.1.	Κουφώματα και υαλοπετάσματα	43
5.1.2.	Χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες που προσδιορίζουν την ενεργειακή απόδοση των κουφωμάτων και υαλοπετασμάτων.....	43
5.1.3.	Υλικά. Πλαίσια και υαλοπίνακες.....	45
5.1.4.	Ειδικό υαλοπίνακες - Υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου.....	47
5.1.5.	Φύλλα ασφαλείας και σκίασης (εξώφυλλα / σκούρα)	50
5.1.6.	Τύποι κουφωμάτων. Θερμοτεχνικά χαρακτηριστικά.....	50
5.1.7.	Προσαρμογή και ενσωμάτωση των κουφωμάτων στα ανοίγματα.....	52
6.	ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΕΣ.....	53
7.	Ο ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΕΝΟΣ ΚΤΗΡΙΟΥ	59
7.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	59
7.2.	ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ.....	59
7.3.	ΣΤΑΔΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ της ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ	60
7.4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ U ΑΔΙΑΦΑΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	61
7.5.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ U ΔΙΑΦΑΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	64
7.6.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ U ΤΟΙΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ.....	65
7.7.	Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ.....	65
7.8.	Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.....	66
7.9.	Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΟΛΟΥ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ (U_m).....	66
8.	ΘΕΜΑΤΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΟΦΕΙΛΟΜΕΝΑ ΣΕ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΥΔΡΑΤΜΩΝ	68
8.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	68
8.2.	Η υγρασία του αέρα	68
8.3.	Η υγρασία επιφανειακής συμπύκνωσης (δρόσος).....	69
8.3.1.	Η εκδήλωση του φαινομένου	69
8.3.2.	Κύρια χαρακτηριστικά	70
8.3.3.	Η αντιμετώπιση.....	71
8.3.4.	Έλεγχος για το σχηματισμό επιφανειακής συμπύκνωσης.....	72
8.4.	Η διάχυση των υδρατμών	75
8.4.1.	Περιγραφή του φαινομένου.....	75
8.4.2.	Έλεγχος και υπολογισμός του φαινομένου.....	75
8.4.3.	Το φράγμα υδρατμών	81
8.4.3.1.	Η λειτουργία του	81
8.4.3.2.	Ο ρόλος του φράγματος υδρατμών	82
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο άρθρο 8 του Κ.Εν.Α.Κ., ορίζονται οι ελάχιστες προδιαγραφές για τα νέα και ριζικώς ανακαινιζόμενα κτήρια, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται και τα θερμικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτηριακού κελύφους, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2. Στο ίδιο άρθρο στην παράγραφο 2.3., αναφέρεται ότι η διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων, των γραμμικών συντελεστών θερμοπερατότητας (θερμογεφυρών), καθώς και του μέγιστου επιτρεπόμενου μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας (U_m) του κτηρίου καθορίζεται από τη σχετική τεχνική οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων». Αυτή η τεχνική οδηγία εγκρίθηκε με την υπουργική απόφαση αριθ. οικ.17178/2010 «Έγκριση και εφαρμογή των τεχνικών οδηγιών Τ.Ε.Ε. για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων», Φ.Ε.Κ. 1387/2-9-2010, έκδοση Β'.

 **Το περιεχόμενο της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 και οι σχετικές με τη θερμομονωτική επάρκεια ενότητες της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 περιλαμβάνονται στη διδακτέα ύλη αυτής της θεματικής ενότητας και στην εξεταστέα ύλη για τους ενεργειακούς επιθεωρητές κτηρίων.**

1.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ

1.1.1. Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) και οι θεμελιώδεις μονάδες

Το 1960 το 11ο Συνέδριο Μέτρων και Σταθμών όρισε το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (Système International d' Unités) ή συνοπτικά SI από τις γαλλικές λέξεις Système International. Στο σύστημα ορίστηκαν 7 θεμελιώδεις (βασικές) μονάδες και όλες οι παράγωγοι προέρχονται από αυτές διά αλγεβρικών σχέσεων μεταξύ τους, στις οποίες όλοι οι αριθμητικοί συντελεστές ισούνται με τη μονάδα.

Η εκλογή των θεμελιωδών μονάδων έγινε κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ανεξάρτητες τόπου και χρόνου και με σταθερό και μονοσήμαντο ορισμό. Τα 7 θεμελιώδη μεγέθη του Διεθνούς Συστήματος Μονάδων είναι:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Σύμβολο μονάδας	Ορισμός
Μήκος	l	μέτρο	m	Ένα μέτρο ισούται με απόσταση ίση προς 1.650.763,73 φορές το μήκος κύματος στο κενό της πορτοκαλόχρους ερυθράς γραμμής του φάσματος της ακτινοβολίας του στοιχείου κρυπτόν 86 (Kr^{86}).
Μάζα	m	χιλιόγραμμα	kg	Ένα χιλιόγραμμα ισούται με τη μάζα του προτύπου χιλιογράμμου από ιριδιούχο λευκόχρυσο (90% λευκόχρυσο Pt και 10% ιρίδιο Ir)
Χρόνος	t	δευτερόλεπτο	s	Ένα δευτερόλεπτο ισούται με το χρόνο που απαιτείται για 9.192.631.770 κύκλους της ακτινοβολίας μιας καθορισμένης ενεργειακής μετάπτωσης του ατόμου του στοιχείου καισίου 133 (Cs^{133}).
Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος	i	αμπέρ (ampère)	A	Ένα αμπέρ στο σταθερό ρεύμα ισούται με την ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο όταν ρέει μέσω δύο παράλληλων κυκλικής διατομής και απείρου μήκους αγωγών τοποθετημένων σε απόσταση ενός μέτρου ο ένας από τον άλλο παράγεται λόγω του προκύπτοντας μαγνητικού πεδίου δύναμη μεταξύ των αγωγών ίση με $2 \cdot 10^{-7}$ N/m.
Θερμοδυναμική θερμοκρασία	θ	βαθμός Κέλβιν (Kelvin)	K	Ένας βαθμός Κέλβιν αντιστοιχεί σε ένα βαθμό της κλίμακας Κελσίου, έχοντας ως θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός τους $-273,16^\circ C$ και ως τριπλό σημείο του νερού (δυναμική ισορροπία μεταξύ πάγου, νερού και υδρατμού) τους $+273,16$ K, που αντιστοιχούν σε $0,01^\circ C$.
Ένταση φωτός	I	κηρίο (candela)	cd	Ένα κηρίο ισούται με το 1/600.000 της φωτεινής έντασης επιφανείας 1 m^2 μέλανος σώματος στη θερμοκρασία στερεοποίησης του λευκόχρυσου (2046 K)
Ποσότητα ύλης	n	γραμμομόριο	mol	Ένα γραμμομόριο ισούται με την ποσότητα μάζας που περιέχει $6,02252 \cdot 10^{23}$ μόρια (αριθμός Avogadro).

Το 1971 οι Η.Π.Α. χρησιμοποίησαν το Διεθνές Σύστημα Μονάδων προσθέτοντας δύο ακόμη θεμελιώδεις μονάδες:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Σύμβολο μονάδας	Ορισμός
Επίπεδη γωνία	φ	ακτίνιο (radian)	rad	Το ακτίνιο είναι η επίπεδη γωνία, η οποία σε μια περιφέρεια ακτίνας και κέντρο την κορυφή της γωνίας αποκόπτει τόξο ίσο προς την ακτίνα αυτής της περιφέρειας (ένας κύκλος ισούται με 2π rad).
Στερεή γωνία	Ω	στερακτίνιο (steradian)	sr	Το στερακτίνιο είναι η στερεά γωνία, η οποία επάνω σε μια σφαίρα που έχει κέντρο την κορυφή της γωνίας αποκόπτει σφαιρικό τμήμα επιφανείας ίση προς την επιφάνεια ενός τετραγώνου, το οποίο έχει πλευρά ίση με την ακτίνα αυτής της σφαίρας.

Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων καθιερώθηκε διεθνώς σε όλες τις χώρες μέσα στη δεκαετία του 1970 και μόνο κάποιες αγγλοσαξονικές χώρες συνέχισαν να διατηρούν το δικό τους σύστημα ή να κάνουν χρήση και των δύο.

1.1.2. Παράγωγοι μονάδες

Στο Διεθνές Σύστημα για τη μέτρηση άλλων μεγεθών που προέρχονται από τα θεμελιώδη γίνεται χρήση των παραγώγων μονάδων. Αυτές προκύπτουν μέσω αλγεβρικών σχέσεων από τις θεμελιώδεις μονάδες διά της συνεκτικότητας του συστήματος, δηλαδή διά σχέσεων, στις οποίες όλοι οι αριθμητικοί συντελεστές ισούνται με 1.

Στον τομέα της γεωμετρίας. Βάσει των παραπάνω για την εμβαδομέτρηση και για την ογκομέτρηση προκύπτουν:

- ως μονάδα επιφανείας το $1 \text{ m}^2 = 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$,
- ως μονάδα όγκου το $1 \text{ m}^3 = 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$,

Στον τομέα της μηχανικής. Οι παράγωγες μονάδες που προκύπτουν είναι:

- ως μονάδα ταχύτητας το 1 m/s ,
- ως μονάδα επιτάχυνσης το $1 \text{ m/s/s} = 1 \text{ m/s}^2$,
- ως μονάδα γωνιακής ταχύτητας το 1 rad/s ,
- ως μονάδα γωνιακής επιτάχυνσης το $1 \text{ rad/s/s} = 1 \text{ rad/s}^2$,
- ως μονάδα πυκνότητας το 1 kg/m^3

(σημειώνεται ότι στο Διεθνές Σύστημα δεν υπάρχει η έννοια του ειδικού βάρους).

Στο Διεθνές Σύστημα η δύναμη εισάγεται πλέον ως παράγωγο μέγεθος και μετράται με το Newton (N). Ορίζεται από τη σχέση της μηχανικής:

$$F = m \cdot g$$

Το 1 N είναι ίσο με τη δύναμη που όταν ασκείται στη μονάδα της μάζας ενός σώματος (1 kg) προσδίδει σ' αυτό επιτάχυνση ίση με 1 m/s^2 . Άρα:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Άρα η βαρυτική επιτάχυνση για το μέσο επίπεδο της θάλασσας θα ισούται με $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Ωστόσο, πολλές φορές για απλοποίηση των πράξεων η επιτάχυνση της βαρύτητας προσεγγιστικά λαμβάνεται ίση με 10 m/s^2

Βάσει των παραπάνω σώμα μάζας 1 kg , που παλαιότερα λογιζόταν ως βάρους 1 kp , τώρα θα έχει βάρος:

$$1 \text{ kp} = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,81 \text{ N}$$

ή κατά προσέγγιση: $1 \text{ kp} = 1 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 10 \text{ N}$ και $1 \text{ N} = 0,1 \text{ kp}$

Η πίεση (ή η τάση) μετράται με το Pascal (Pa) και ορίζεται ως η δύναμη 1 N που ασκείται επί επιφανείας 1 m^2 κατά τη σχέση:

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} \quad \text{ή αλλιώς} \quad 1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ kg} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1 \text{ s}^2}}{1 \text{ m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Μονάδα έργου είναι το Joule (J) και ορίζεται ως το έργο που παράγεται από δύναμη 1 N, όταν το σημείο εφαρμογής της δύναμης μετακινηθεί κατά 1 m κατά τη διεύθυνση της δύναμης:

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot 1\text{m} = 1\text{N} \cdot \text{m} \quad \text{ή αλλιώς} \quad 1\text{J} = 1\text{N} \cdot 1\text{m} = 1\text{kg} \cdot \frac{1\text{m}}{1\text{s}^2} \cdot 1\text{m} = 1\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Μονάδα ισχύος είναι το Watt (W) και ορίζεται ως η ισχύς συστήματος που αποδίδει ενέργεια 1J ανά 1 δευτερόλεπτο (1s):

$$1\text{W} = \frac{1\text{J}}{1\text{s}} \quad \text{ή αλλιώς} \quad 1\text{W} = \frac{1\text{J}}{1\text{s}} = \frac{1\text{kg} \cdot \frac{1\text{m}}{1\text{s}^2}}{1\text{s}} = 1\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

Στον τομέα της θερμότητας και της θερμοδυναμικής. Οι μονάδες μέτρησης των κυριότερων μεγεθών στον τομέα της θερμότητας είναι:

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα μέτρησης
Η ποσότητα θερμότητας		Joule (J)
Η ροή θερμότητας	Q	Watt (W)
Η ειδική θερμότητα ή ειδική θερμοχωρητικότητα	C	J/(kg·K) ή kWh/(kg·K)
Η εντροπία	S	J/K
Ο συντελεστής θερμικής διαστολής	a	K ⁻¹
Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	λ	W/(m·K)
Ο συντελεστής θερμοπερατότητας	U	W/(m ² ·K)
Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας	Ψ	W/(m·K)
Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	H	W/K

Στον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού. Οι μονάδες μέτρησης των κυριότερων μεγεθών στον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού είναι:

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης	Σχέση ισότητας
Η ροή ηλεκτρικού ρεύματος	Coulomb (Cb)	1 Cb = 1 A·s
Η τάση του ηλεκτρικού ρεύματος	Volt (V)	1 V = 1 W/A
Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου		V/m
Η ηλεκτρική αντίσταση	Ohm (Ω)	1 Ω = 1 V/A
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα	Siemens (S)	1 S = 1 A/V
Η μαγνητική ροή	Weber (Wb)	1 Wb = 1 V·s
Η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος		A/m ²
Η ηλεκτρική επαγωγή	Henry (H)	1 H = 1 Wb/A
Η ένταση μαγνητικού πεδίου		A/m
Η ηλεκτρική ενέργεια		1 W·s = 1 J

Στον τομέα του φωτισμού. Οι μονάδες μέτρησης των κυριότερων μεγεθών στον τομέα του φωτισμού είναι:

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης	Σχέση ισότητας
Η φωτεινότητα		cd/m ²
Η φωτεινή ροή	lumen (lm)	1 lm = 1 cd/sr
Η ένταση φωτισμού	lux (lx)	1 lx = 1 lm/m ²

1.1.3. Πολλαπλάσια και υποπολλαπλάσια μονάδων

Για τον υπολογισμό των πολλαπλάσιων ή υποπολλαπλάσιων ποσοτήτων τόσο των θεμελιωδών, όσο και των παραγώγων εξ αυτών μονάδων ορίστηκε σειρά συμβόλων που χρησιμοποιούνται ως πρόθεμα στα σύμβολα των θεμελιωδών ή παραγώγων μονάδων.

Αυτά τα σύμβολα με την ισοδυναμία του μεγέθους της βασικής μονάδας δίνονται στους δύο παρακάτω πίνακες:

Πολλαπλάσια μονάδων

Σύμβολο	Ονομασία	Σχέση ως προς τη βασική μονάδα
da	déca	10 ¹ ή 10
h	hecto	10 ² ή 100
k	kilo	10 ³ ή 1.000
M	méga	10 ⁶ ή 1.000.000
G	giga	10 ⁹ ή 1.000.000.000
T	téra	10 ¹² ή 1.000.000.000.000
P	péta	10 ¹⁵ ή 1.000.000.000.000.000
E	exa	10 ¹⁸ ή 1.000.000.000.000.000.000

Υποπολλαπλάσια μονάδων

Σύμβολο	Ονομασία	Σχέση ως προς τη βασική μονάδα
d	déci	10 ⁻¹ ή 0,1
c	centi	10 ⁻² ή 0,01
m	milli	10 ⁻³ ή 0,001
μ	micro	10 ⁻⁶ ή 0,000.001
n	nano	10 ⁻⁹ ή 0,000.000.001
p	pico	10 ⁻¹² ή 0,000.000.000.001
f	femto	10 ⁻¹⁵ ή 0,000.000.000.000.001
a	atto	10 ⁻¹⁸ ή 0,000.000.000.000.000.001

1.1.4. Άλλες μονάδες

Τόσο στις μαθηματικές σχέσεις, όσο και στην καθημερινότητα πολλές φορές γίνεται χρήση και άλλων μονάδων, που μπορεί μεν να μη συμπεριλαμβάνονται στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων, έχουν όμως καθιερωθεί και βοηθούν στην καλύτερη αντίληψη διαφόρων μεγεθών. Αυτές οι μονάδες είτε παρέμειναν από προηγούμενα μετρητικά συστήματα είτε αποτελούν ενδιάμεσες υποδιαιρέσεις ή πολλαπλάσια άλλων μονάδων και μάλιστα όχι κατ' ανάγκη δεκαδικά.

Οι συνηθέστερες από αυτές τις μονάδες είναι:

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης	Σχέση ισότητας
Για τη μέτρηση του μήκους		
Το ναυτικό μίλι, για θαλάσσιες αποστάσεις	mile	1 mile (ναυτικό) = 1.853,3 m
Το αγγλικό μίλι, για αποστάσεις στη στεριά	mile	1 mile (αγγλικό) = 1.609,3 m
Για τη μέτρηση της επιφάνειας		
Το στρέμμα		1 στρέμμα = 1.000 m ²
Το εκτάριο	ha	1ha = 10.000 m ²
Για τη μέτρηση του όγκου		
Το λίτρο (litre ή liter)	l	1 l = 1 dm ³ = 0,001 m ³
Για τη μέτρηση του χρόνου		
Το πρώτο λεπτό	min	1 min = 60 s
Η ώρα	h	1 h = 60 min = 60 · 60 s = 3600 s
Για τη μέτρηση της επίπεδης γωνίας		
Η μοίρα	°	360° = 2π rad και 1° = 2π/360 rad
Ο βαθμός	grad	400 grad = 2π rad και 1 grad = 2π/400 rad
Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας		
Ο βαθμός Κελσίου (Celsius)	°C	$1^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$ και $\theta^{\circ}\text{C} = \theta\text{ K} - 273,15$. $\theta^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} \cdot (\theta^{\circ}\text{F} - 32)$. $\theta^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} \cdot \theta^{\circ}\text{R} - 273,15$.
Ο βαθμός Φαρενάιτ (Fahrenheit)	°F	$1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9} \cdot \text{K}$ και $\theta^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \cdot (\theta\text{ K} - 273,15) + 32$ $\theta^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \cdot \theta^{\circ}\text{C} + 32$ $\theta^{\circ}\text{F} = \theta^{\circ}\text{R} - 273,15 \cdot \frac{9}{5} + 32$
Ο βαθμός Ρανκίν (Rankine)	°R	$1^{\circ}\text{R} = \frac{9}{5} \text{ K}$ και $\theta^{\circ}\text{R} = \frac{9}{5} \cdot \theta\text{ K}$. $\theta^{\circ}\text{R} = (\theta^{\circ}\text{C} + 273,15) \cdot \frac{9}{5}$ $\theta^{\circ}\text{R} = \theta^{\circ}\text{F} - 32 + \frac{9}{5} \cdot 273,15$
Για τη μέτρηση της ταχύτητας		
Τα χιλιόμετρα ανά ώρα	km/h	$1\text{ km/h} = 1.000\text{ m} / 3600\text{ s} = 0,2778\text{ m/s}$ $1\text{ m/s} = 3,6\text{ km/h}$
Για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης		
Το μπαρ	bar	$1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$ $1\text{ mbar} = 0,001\text{ bar} = 100\text{ Pa}$
Η ατμόσφαιρα	at	$1\text{ at} = 9,80665\text{ N/cm}^2 = 9,80665 \cdot 10^4\text{ Pa}$
Η κανονική ατμόσφαιρα	atm	$1\text{ atm} = 1,01325\text{ bar} = 101.325\text{ N/m}^2$
Η στήλη υδραργύρου	mm Hg ή Torr	$1\text{ Torr} = 9,81 \cdot 13,6 = 133,32\text{ N/m}^2 = 1/760\text{ atm}$ (13,6 = ειδικό βάρος Hg)

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης	Σχέση ισότητας
Για τη μέτρηση της μάζας		
Ο μετρικός τόνος	t	1 t = 1000 kg
Για τη μέτρηση της δύναμης, του βάρους		
Η δύννη (dyne)	dyn	1 dyn = 10^{-5} N
Το κιλοπόντ	kp	1 kp = 9,80665 N
Η θερμογόνος δύναμη	kcal/kg	1 kcal/kg = 4186,8 J/kg
Για τη μέτρηση του έργου, της ενέργειας		
Το έργοιο	erg	1 erg = 1 dyn · 1 cm = 10^{-5} N · 10^{-2} m = 10^{-7} N·m 10^7 erg = 1 J
Το ωριαίο bat (η batώρα)	Wh	1 Wh = 1 W·1h = 1W·3.600 s = 3.600 J 1 kWh = 3.600 kJ
Η χιλιοθερμίδα (kilocalorie)	kcal	1 kcal = 1/860 kWh = 1,1631 Wh 1 kcal = 3.600/860 kJ = 4,1868 kJ
Το κιλοποντόμετρο	kpm	1 kpm = 1kp · 1 m = 9,80665 N · 1 m = 9,80665 J και 1 J = 0,10197 kpm
Το Btu	Btu	1 Btu = 1,055 kJ 1 Btu = 0,252 kcal 1 Btu = 0,2931 Wh
Για τη μέτρηση της ισχύος		
Οι θερμίδες ανά ώρα	kcal/h	1 kcal/h = 4,1868 kJ / 3600 s = 1,163 W και 1 W = 0,86 kcal/h
Ο ίππος	CV ή PS	1 CV = 75 kpm/s = 75 · 9,80665 N·m/s = 735,5 W
Ο αγγλικός ίππος	HP	1 HP = 745,7 W

1.1.5. Το αγγλοσαξονικό μετρητικό σύστημα

Σε ορισμένες αγγλοσαξονικές χώρες, όπως στις Η.Π.Α., συνεχίζει ακόμη και σήμερα να είναι σε ισχύ και το παλαιό αγγλικό σύστημα μέτρησης ή αυτό συνεχίζει να λειτουργεί παράλληλα με το Διεθνές Σύστημα Μονάδων. Και σ' αυτό το σύστημα τα θεμελιώδη μεγέθη είναι τα ίδια: μάζα ή βάρος (δύναμη), μήκος και χρόνος. Οι κυριότερες μονάδες αυτού του συστήματος είναι:

Για τη μέτρηση του μήκους. Βασική μονάδα μήκους είναι η γιάρδα (yard - yd) με τις υποδιαιρέσεις της στο 12-δικό σύστημα: το πόδι (foot - ft) και την ίντσα (inch - in ή "), που συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις:

$$1 \text{ ft} = 12 \text{ in} \quad \text{και} \quad 1 \text{ yd} = 3 \text{ ft} = 3 \cdot 12 \text{ in} = 36 \text{ in}$$

$$\begin{aligned} \text{Η ισοδυναμία στο Διεθνές Σύστημα είναι:} \quad & 1 \text{ yd} = 0,9144 \text{ m} \quad \text{και} \quad 1 \text{ m} = 1,093613 \text{ yd} \\ & 1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m} \quad \text{και} \quad 1 \text{ m} = 3,280840 \text{ ft} \\ & 1 \text{ in} = 2,540 \text{ cm} \quad \text{και} \quad 1 \text{ cm} = 0,3937008 \text{ in} \end{aligned}$$

Βασική μονάδα μάζας είναι η λίβρα (pound - lb, ο συμβολισμός lb από τη ρωμαϊκή μονάδα μήκους libra) με τις υποδιαιρέσεις της στο 16-δικό σύστημα: η ουγκιά (ounce - oz) και το δράμι (dram) , που συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις:

$$1 \text{ oz} = 16 \text{ drams} \quad \text{και} \quad 1 \text{ lb} = 16 \text{ oz} = 16 \cdot 16 = 256 \text{ drams}$$

Η ισοδυναμία στο Διεθνές Σύστημα είναι:

$$\begin{aligned} 1 \text{ lb} &= 0,453592 \text{ kg} \quad \text{και} \quad 1 \text{ kg} = 2,204623 \text{ lb} \\ 1 \text{ oz} &= 28,34952 \text{ g} \quad \text{και} \quad 1 \text{ g} = 0,0352740 \text{ oz} \\ 1 \text{ dram} &= 1,77184 \text{ g} \quad \text{και} \quad 1 \text{ g} = 0,564385 \text{ dram} \end{aligned}$$

Η επιτάχυνση της βαρύτητας $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ στο αγγλοσαξονικό σύστημα ισούται με:

$$g = 9,80665 \text{ m/s}^2 = 9,80665 \cdot 3,280840 \text{ ft/s}^2 = 32,17405 \text{ ft/s}^2$$

Μονάδα δύναμης είναι το poundal (pdl) και από τη γνωστή σχέση $F = m \cdot g$ προκύπτει:

$$1 \text{ pdl} = 1 \text{ lb} \cdot 1 \text{ ft/s}^2 = 0,453592 \text{ kg} \cdot 0,3048 \text{ m/s}^2 = 0,138255 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 0,138255 \text{ N}$$

Από το 1965 άρχισε στη Μ. Βρετανία η σταδιακή μετατροπή των αγγλοσαξονικών μονάδων σε μετρικές, προβλέποντας τότε ένα μεταβατικό διάστημα με παράλληλη εφαρμογή των δύο συστημάτων. Σήμερα στις περισσότερες χώρες χρησιμοποιείται το μετρικό σύστημα.

2. Η ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι αρχές μετάδοσης της θερμότητας έχουν μεγάλη εφαρμογή στις κτηριακές εγκαταστάσεις και η χρήση τους ποσοτικοποιεί τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη. Η μετάδοση θερμότητας δύναται να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους: τη μετάδοση με αγωγή (αγωγιμότητα), τη μετάδοση με συναγωγή και τη μετάδοση με ακτινοβολία. Στην πράξη, σπάνια συναντάται μια μόνο μορφή μετάδοσης θερμότητας αλλά συνήθως τα φαινόμενα είναι συνδυασμός δύο ή και των τριών μορφών μετάδοσης θερμότητας.

2.1. ΜΟΡΦΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

2.1.1. Μετάδοση με αγωγή

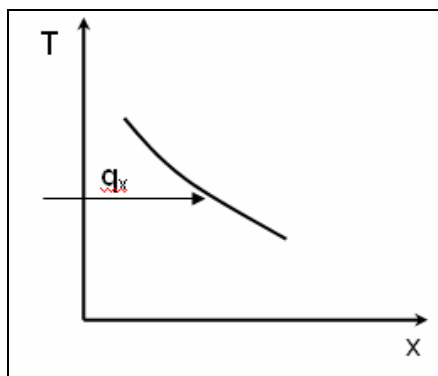
Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή πραγματοποιείται με άμεση επαφή μεταξύ των τμημάτων ενός στερεού ή μεταξύ δύο στερεών σωμάτων, μέσω της διάχυσης των ατόμων ή μορίων και διάχυσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η θερμική αγωγή συμβαίνει πάντοτε από μια μάζα υψηλής θερμοκρασίας σε μια μάζα χαμηλότερης, ακολουθώντας τις αρχές του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής.

Η θερμική αγωγή δίνεται από τη σχέση του Fourier, η οποία για μονοδιάστατη ροή υπό μόνιμες συνθήκες είναι:

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2.1.)$$

όπου	q	[W]	η ροή θερμότητας (W)
	A	[m ²]	επιφάνεια κάθετη προς τη μεταφερομένη θερμότητα (m ²)
	λ	[W/(mK)]	συντελεστής αναλογίας (W/(mK))
	dT/dx	[K/m]	διαφορική μεταβολή θερμοκρασίας και μήκους (K/m)

Η παραπάνω σχέση δηλώνει ότι η ροή θερμότητας είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων ενός υλικού, την απόσταση των δύο σημείων, το χρόνο και την επιφάνεια του υλικού που βρίσκεται κάθετα προς τη διεύθυνση της ροής θερμότητας. Η ισότητα επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συντελεστή αναλογίας, λ , ο οποίος καλείται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και αποτελεί μια φυσική ιδιότητα του υλικού και χαρακτηρίζει την ικανότητα της μεταφοράς θερμότητας διά μέσου της μάζας του υλικού. Το αρνητικό πρόσημο στη σχέση υποδηλώνει ότι η ροή θερμότητας είναι θετική όταν η θερμοκρασία μειώνεται και η μονάδα μήκους αυξάνεται (σχήμα 2.1.).



Σχήμα 2.1. Διεύθυνση ροής θερμότητας για μετάδοση με αγωγή.

2.1.1.1. Αγωγή θερμότητας σε ομογενές επίπεδο υλικό.

Στην περίπτωση ενός ομογενούς επίπεδου υλικού (σχήμα 2.2.) του οποίου ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι σταθερός και στις οριακές του επιφάνειες η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή, τότε για μόνιμη μονοδιάστατη ροή θερμότητας ο νόμος του Fourier λαμβάνει την ακόλουθη διατύπωση:

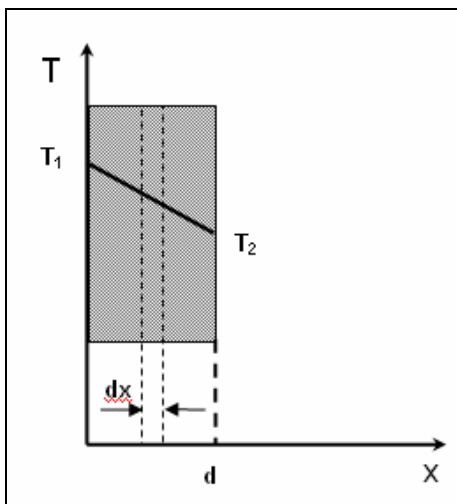
$$q = \lambda A \frac{\Delta T}{dx} \Rightarrow q = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.2.)$$

όπου d [m] το πάχος του υλικού
 T_1, T_2 [K] θερμοκρασίες επιφανείας υλικού

Η σχέση αυτή αποτελεί την απλούστερη μορφή της εξίσωσης μετάδοσης θερμότητας με αγωγή. Στην περίπτωση που η επιφάνεια του υλικού (A) δεν είναι γνωστή, χρησιμοποιείται η πυκνότητα ροής θερμότητας που δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{q} = \frac{q}{A} \quad (2.3.)$$

Οι μονάδες της πυκνότητας ροής θερμότητας δίδονται σε W/m^2 (συναντώνται και σε $kcal/(m^2 \cdot h)$).



Σχήμα 2.2. Μεταφορά θερμότητας σε ομογενές επίπεδο υλικό.

Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα του ενός στρώματα υλικών (π.χ. τρία όπως απεικονίζονται στο σχήμα 2.3.), τότε σε μόνιμες συνθήκες η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας είναι σταθερή ισχύουν οι κάτωθι σχέσεις:

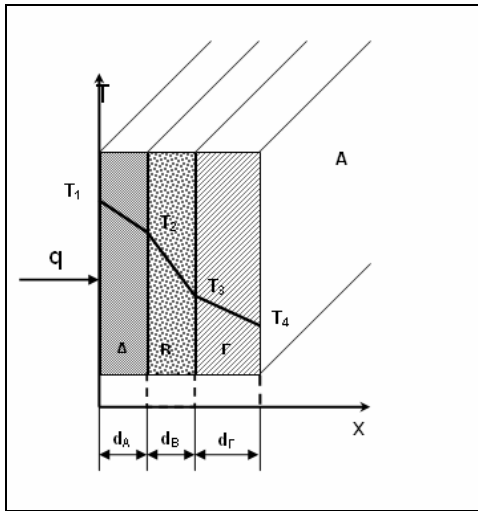
$$q = \lambda_A A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_A} = \lambda_A A \frac{T_1 - T_2}{d_A} \quad (2.4.)$$

$$q = \lambda_B A \frac{T_2 - T_3}{\Delta x_B} = \lambda_B A \frac{T_2 - T_3}{d_B} \quad (2.5.)$$

$$q = \lambda_\Gamma A \frac{T_3 - T_4}{\Delta x_\Gamma} = \lambda_\Gamma A \frac{T_3 - T_4}{d_\Gamma} \quad (2.6.)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει για τη ροή θερμότητας:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{d_A / \lambda_A A + d_B / \lambda_B A + d_\Gamma / \lambda_\Gamma A} \quad (2.7.)$$



Σχήμα 2.3. Μεταφορά θερμότητας σε σύνθετο επίπεδο στοιχείο.

2.1.1.2. Θερμική αντίσταση δομικού υλικού

Στη σχέση 2.7. μπορεί να θεωρηθεί ότι ο αριθμητής εκφράζει το θερμικό δυναμικό ή την κινητήρια δύναμη της ροής θερμότητας και ο παρανομαστής, ο οποίος είναι συνάρτηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, του πάχους του υλικού και της επιφάνειας του, την αντίσταση σε αυτή τη ροή. Έτσι, η σχέση γίνεται:

Ροή θερμότητας = διαφορά θερμικού δυναμικού / θερμική αντίσταση

η οποία ομοιάζει κατά πολύ με το νόμο του Ohm για τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Η θερμική αντίσταση εξαρτάται από το πάχος του υλικού και το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του και δίνεται από τη σχέση:

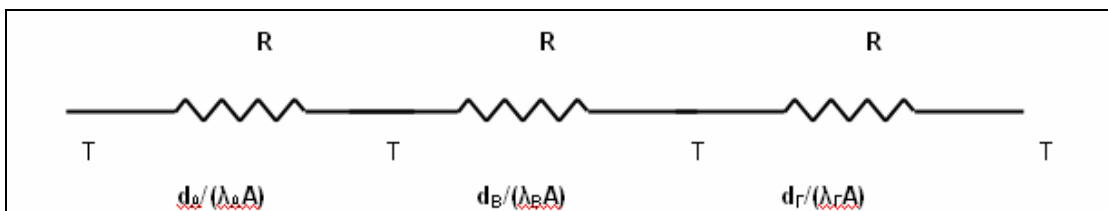
$$R = \frac{d}{\lambda A} \quad \text{σε K/W} \quad (2.8.)$$

Στις δομικές κατασκευές η θερμική αντίσταση δίνεται βάσει της επιφάνειας του κάθε υλικού σε (m²K)/W ή R = d/λ. Οπότε η σχέση 2.7. γίνεται:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_\Gamma} = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{ολ}}} \quad (2.9.)$$

όπου R_{ολ} είναι η συνολική θερμική αντίσταση όλων των επιμέρους υλικών του στοιχείου.

Το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα του σύνθετου επίπεδου στοιχείου φαίνεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4. Ηλεκτρικό ανάλογο.

2.1.2. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δομικού υλικού

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (ή ειδική θερμική αγωγιμότητα), λ , ορίζει την ποσότητα θερμικής ροής η οποία διαπερνά σε 1 ώρα ένα σώμα επιφάνειας 1 m^2 και πάχους 1 m , το οποίο έχει σταθερή διαφορά θερμοκρασίας επιφανειών της διεύθυνσης της ροής θερμότητας της τάξεως του 1 K . Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δίδεται σε $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ενώ συναντάται και σε $\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι μια σημαντική φυσική ιδιότητα του σώματος και η τιμή του αποτελεί σημαντικό κριτήριο της καταλληλότητας του για μια συγκεκριμένη χρήση. Το λ εξαρτάται από την εσωτερική δομή του, τη θερμοκρασία, την πυκνότητα, την υγρασία και την πίεση.

Για τα περισσότερα σώματα ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία με μια γραμμική σχέση, ήτοι:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bT) \quad (2.10.)$$

όπου λ_0 ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στους 0°C ,

b η σταθερά που έχει προσδιορισθεί για το συγκεκριμένο σώμα.

T η μέση τιμή της θερμοκρασίας στα άκρα των επιφανειών του σώματος.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στα αέρια σώματα κυμαίνεται από $0,006$ έως $0,58 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ και αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας. Γενικά, ο μηχανισμός της θερμικής αγωγής πραγματοποιείται με την κίνηση μορίων του αερίου από μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας σε μια περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας.

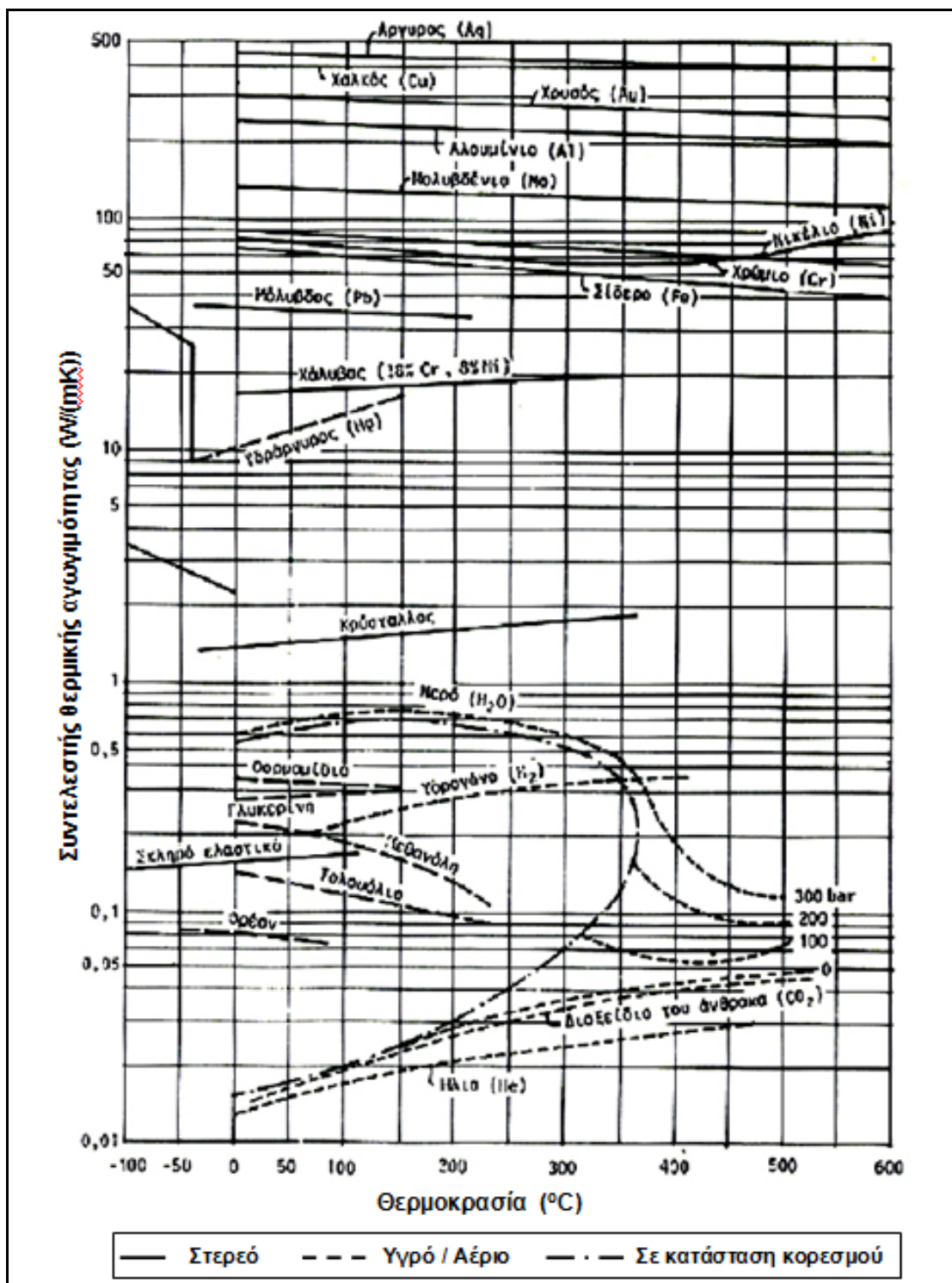
Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των υγρών κυμαίνεται από $0,09$ έως $0,70 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Το λ για τα περισσότερα υγρά σώματα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Εξάρεση στον κανόνα αποτελούν οι διακυμάνσεις του λ του νερού και της γλυκερίνης.

Στην περίπτωση των δομικών υλικών ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ $0,023$ και $3,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ και αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Γενικώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα δομικά υλικά με μεγάλο ειδικό βάρος διαθέτουν υψηλή τιμή λ . Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι επίσης το πορώδες του υλικού και η περιεκτικότητά του σε υγρασία.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των μετάλλων κυμαίνεται από $2,3$ έως $400 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. για τα περισσότερα μέταλλα το λ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Λόγω του γεγονότος ότι τόσο η θερμική αγωγιμότητα, όσο και η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλονται κυρίως στη διάχυση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, για τα καθαρά μέταλλα οι δύο ιδιότητες είναι ανάλογες, οπότε ένα σώμα με υψηλό συντελεστή ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαθέτει και υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και αντίστροφα. Στην περίπτωση που το μέταλλο δεν είναι καθαρό αλλά υπάρχουν προσμίξεις, τότε το λ μειώνεται δραστικά.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα διαγραμμάτων και πινάκων με τις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ανάλογα με το είδος του σώματος (στερεό, υγρό, αέριο), τη χρήση για την οποία προορίζεται και σειρά παραμέτρων από τους επηρεάζεται όπως η θερμοκρασία, η πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε υγρασία, την πίεση, το πάχος του κ.ά.

Η διακύμανση του λ διαφόρων σωμάτων συναρτήσει της θερμοκρασίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.5. Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για ένα μεγάλο εύρος δομικών υλικών για κτηριακές κυρίως κατασκευές /εφαρμογές παρατίθενται στον πίνακα 2 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων». Σημειώνεται πάντως ότι, τόσο ο μελετητής όσο και ο ενεργειακός επιθεωρητής οφείλει να λαμβάνει υπόψη στους υπολογισμούς του τις δεδομένες από τον παραγωγό τιμές του λ για το εκάστοτε δομικό προϊόν (από έγκυρο πιστοποιητικό ή αναγραφόμενη τιμή στη σήμανση του υλικού κατά CE).



Σχήμα 2.5. Τιμές συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στερεών, αερίων και υγρών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία [21].

2.1.3. Μετάδοση με συναγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή συμβαίνει όταν υπάρχει μακροσκοπική κίνηση των μορίων και του ίδιου του ρευστού και προϋποθέτει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο μαζών. Η μετακίνηση των στοιχειωδών σωματιδίων του ρευστού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες οι κυριότεροι των οποίων είναι οι συνθήκες της ροής και των αιτιών που την προκάλεσαν, το είδος και τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού, το μέγεθος και το σχήμα της επιφάνειας που μεταδίδεται η θερμότητα.

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή συναντάται σε δύο τύπους ανάλογα με το αίτιο που την προκαλεί: τη μετάδοση θερμότητας με φυσική (ελεύθερη) συναγωγή και τη μετάδοση θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή. Στην ελεύθερη συναγωγή η κίνηση του ρευστού οφείλεται αποκλειστικά στη διαφορά της πυκνότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών σωματιδίων του ρευστού και της βαρύτητάς τους. Η ένταση της μετάδοσης θερμότητας καθορίζεται πλήρως από τις θερμικές συνθήκες της εκάστοτε διαδικασίας και εξαρτάται από το είδος του ρευστού, το εύρος της διαφοράς θερμοκρασίας και τον όγκο του χώρου όπου συμβαίνει η διαδικασία. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή κάποιο εξωτερικό αίτιο προκαλεί τη μετάδοση θερμότητας με την κίνηση του ρευστού, όπως ένας ανεμιστήρας, μια αντλία, κ.τ.λ. Οι συνθήκες εξαναγκασμένης συναγωγής εξαρτώνται από το είδος και τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού, την ταχύτητα της ροής και τη θερμοκρασία του καθώς και το μέγεθος και σχήμα του χώρου/σώματος στην επιφάνεια του οποίου λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας.

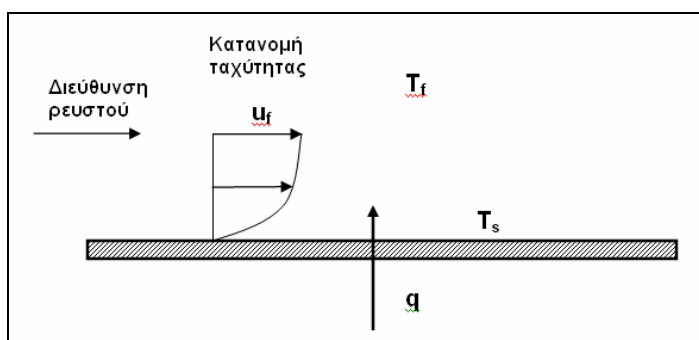
2.1.3.1. Εξίσωση συναγωγής θερμότητας.

Η σχέση που εκφράζει την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή χρησιμοποιεί το νόμο του Newton για την ψύξη, καίτοι (σχήμα 2.6.):

$$q = h_c A (T_s - T_f) \quad (2.11.)$$

όπου	q	[W]	η ροή θερμότητας
	h_c	[W/(m ² ·K)]	ο συντελεστής συναγωγής
	A	[m ²]	η επιφάνεια μετάδοσης της θερμότητας
	T_s	[K]	η θερμοκρασία επιφανείας
	T_f	[K]	η θερμοκρασία ρευστού

Η σχέση υποδεικνύει ότι η ροή θερμότητας από το σώμα στο ρευστό ή και αντίστροφα, είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο σωμάτων και την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας. Η ισότητα επιτυγχάνεται με τη χρήση του συντελεστή συναγωγής, h_c , ο οποίος ουσιαστικά καθορίζει την ένταση της μετάδοσης θερμότητας.



Σχήμα 2.6. Αρχή μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή.

2.1.3.2. Συντελεστής συναγωγής

Ο συντελεστής συναγωγής (συναντάται και ως ειδική συναγωγιμότητα), h_c , καθορίζει το μέγεθος της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και δίδεται σε $W/(m^2 \cdot K)$ ή $kcal/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$.

Ο προσδιορισμός του είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθότι εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η ταχύτητα του ρευστού, οι συνθήκες της ροής, οι διαστάσεις και το είδος της επιφάνειας επαφής, το είδος και οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού (π.χ. ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, η πυκνότητα, το δυναμικό ιξώδες, η ειδική θερμοχωρητικότητα κ.ά.). Συνήθως στη βιβλιογραφία συναντώνται τιμές του συντελεστή συναγωγής για συγκεκριμένες συνθήκες μετάδοσης θερμότητας και συγκεκριμένης γεωμετρίας υλικών.

Προσεγγιστικές τιμές του συντελεστή συναγωγής για συνθήκες μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και διαφορετικά σώματα/ρευστά και συνθήκες ροής δίδονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Προσεγγιστικές τιμές συντελεστή συναγωγής [16, 17].

Κατάσταση	Συντελεστής συναγωγής, h_c $W/(m^2 \cdot K)$
Συνθήκες φυσικής συναγωγής	
Κατακόρυφη επιφάνεια ύψους 0,25 m με $\Delta T=25^\circ C$ και αέρας	5
Κατακόρυφη επιφάνεια ύψους 0,3 m με $\Delta T=30^\circ C$ και αέρας	4,5
Οριζόντιος κύλινδρος διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=25^\circ C$ και αέρας	8
Οριζόντιος κύλινδρος διαμέτρου 5 cm με $\Delta T=30^\circ C$ και αέρας	6,5
Οριζόντιος κύλινδρος διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=25^\circ C$ και νερό	741
Οριζόντιος κύλινδρος διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=30^\circ C$ και νερό	890
Σφαίρα διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=25^\circ C$ και αέρας	9
Σφαίρα διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=25^\circ C$ και νερό	606
Συνθήκες εξαναγκασμένης συναγωγής	
Αέρας με ταχύτητα 2 m/s πάνω σε επιφάνεια 0,2 m ²	12
Αέρας με ταχύτητα 35 m/s πάνω σε επιφάνεια 0,75 m ²	75
Αέρας με ταχύτητα 5 m/s κάθετα σε κυλινδρικό σώμα διαμέτρου 1 cm	85
Νερό παροχής 0,5 kg/s κινούμενο μέσα σωλήνα διαμέτρου 2,5 cm	3500
Αέρας κάθετα σε κύλινδρο διαμέτρου 5 cm με ταχύτητα 50 m/s	180
Νερό σε συνθήκες βρασμού	
Σε δεξαμενή ή σε πισίνα	2500 – 35000
Σε ροή μέσα σε σωλήνα	5000 – 100000
Συμπύκνωση υδρατμού σε πίεση 1 atm	
Σε κατακόρυφες επιφάνειες	4000 – 11300
Στην εξωτερική πλευρά οριζόντιων αγωγών	9500 – 25000

2.1.4. Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.

Οποιοδήποτε αντικείμενο με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 0 K εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή οφείλεται στην εσωτερική ενέργεια του υλικού η οποία, σε κατάσταση ισορροπίας, είναι ανάλογη με τη θερμοκρασία του υλικού (θερμική ακτινοβολία). Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ σωμάτων η οποία συμβαίνει μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καλείται μεταφορά

θερμότητας με ακτινοβολία. Το δε μεγαλύτερο μέρος της θερμικής ακτινοβολίας εκπέμπεται σε περιορισμένο πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ανάμεσα στα 0,1 μm και 100 μm .

2.1.4.1. Μέλαν σώμα - Νόμος του Planck - Νόμος των Stefan-Boltzmann

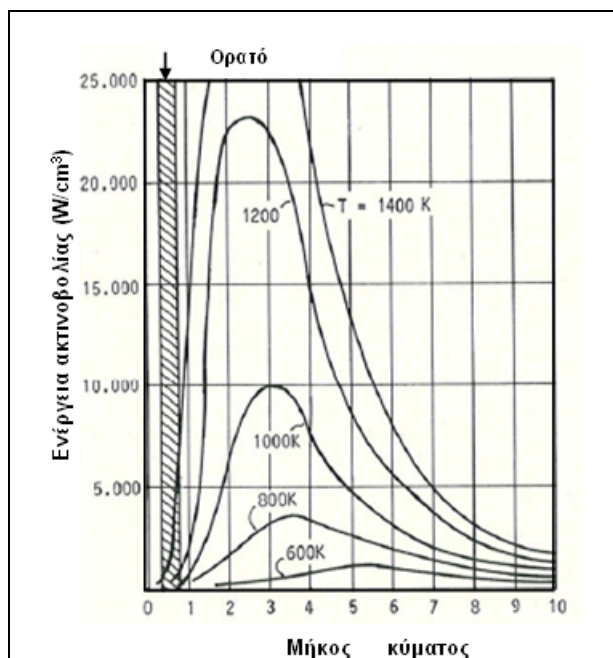
Μέλαν σώμα. Ως μέλαν (μαύρο) σώμα ορίζεται ένα ιδανικό σώμα που απορροφά ολόκληρη την ποσότητα ακτινοβολίας που δέχεται για όλα τα μήκη κύματος και για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Από τον ορισμό του, το μέλαν σώμα εκπέμπει και τη μέγιστη ενέργεια ακτινοβολίας σε κάθε μήκος κύματος. Οι φυσικοί νόμοι περιγράφουν την εκπομπή του μαύρου σώματος οπότε η εκπομπή των πραγματικών σωμάτων υπολογίζεται αντίστοιχα με την εκπομπή του μαύρου σώματος κάτω από όμοιες συνθήκες με τη χρήση ενός συντελεστή, του επονομαζόμενου συντελεστή εκπομπής.

Νόμος του Planck. Ο νόμος του Planck εκφράζει τη φασματική εκπομπή του μαύρου σώματος $E_{b\lambda}(T)$ σε $\text{W}/(\text{m}\cdot\mu\text{m})$, σε θερμοκρασία T και ένα μήκος κύματος λ σύμφωνα με την ακόλουθη έκφραση:

$$E_{b\lambda}(T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2.12.)$$

όπου λ [μm] το μήκος κύματος,
 T [K] η απόλυτη θερμοκρασία,
 C_1 [$\text{W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$] σταθερά ίση με $3,741\cdot 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ και
 C_2 [μmK] σταθερά ίση με 14388 μmK .

Βάσει του νόμου ο οποίος σχηματικά παριστάνεται στο σχήμα 2.7., όταν το μήκος κύματος είναι μηδέν τότε δεν υπάρχει ενέργεια ακτινοβολίας. Η ενέργεια αυτή αρχικά αυξάνεται συναρτήσει του μήκους κύματος έως μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται έως την τιμή μηδέν όταν το λ τείνει στο άπειρο.



Σχήμα 2.7. Ενέργεια ακτινοβολίας μέλανος σώματος συναρτήσει του λ (σε μm).

Νόμος των Stefan-Boltzmann

Ο νόμος αυτός εκφράζει τη συνολική ημισφαιρική (προς όλες τις κατευθύνσεις) ισχύ εκπομπής ενός μαύρου σώματος (σε W/m^2) σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.13.)$$

όπου $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και η θερμοκρασία εκφράζεται σε Κ. Η συνολική ημισφαιρική ισχύς εκπομπής ενός πραγματικού σώματος υπολογίζεται από το νόμο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό συντελεστή εκπομπής, ϵ , από τη σχέση:

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.14.)$$

Δεδομένου του γεγονότος ότι το μαύρο σώμα αποτελεί τον ιδανικό ακτινοβολητή ο οποίος σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία έχει τη μέγιστη ημισφαιρική ισχύ εκπομπής ($\epsilon=1$), συμπεραίνεται ότι ο συνολικός συντελεστής εκπομπής, ϵ ενός πραγματικού σώματος είναι πάντα χαμηλότερος της μονάδας.

2.1.4.2. Ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα, διαπερατότητα ακτινοβολούμενης θερμότητας.

Όταν ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα σώμα, ένα ποσοστό της απορροφάται, ένα ποσοστό ανακλάται και ένα ποσοστό το διαπερνά (σχήμα 2.8.). Τα ποσοστά της απορροφούμενης, ανακλώμενης και διαπερατής ακτινοβολίας ονομάζονται αντίστοιχα απορροφητικότητα (α), ανακλαστικότητα (ρ) και διαπερατότητα (τ).

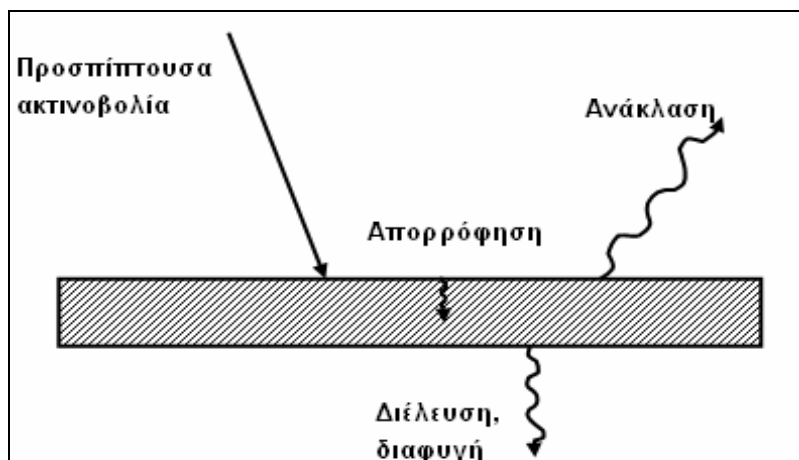
$$\alpha = \frac{\text{απορροφούμενη ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}}$$

$$\rho = \frac{\text{ανακλώμενη ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}}$$

$$\tau = \frac{\text{διαφυγόμενη ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}}$$

Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.15.)$$



Σχήμα 2.8. Προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα σώμα.

Οι τιμές αυτών των παραμέτρων είναι συνολικές ημισφαιρικές τιμές και χαρακτηρίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός σώματος και της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας.

Σε ένα αδιαφανές σώμα είναι $\tau = 0$, οπότε η σχέση 2.15. γίνεται: $\alpha + \rho = 1$.

Όπως είναι φανερό, σε ένα μέλαν σώμα $\rho = 0$, $\tau = 0$, άρα $\alpha = 1$.

2.1.4.3. Νόμος του Kirchhoff

Ο νόμος του Kirchhoff περιγράφει τη σχέση ανάμεσα στις ιδιότητες εκπομπής και απορροφητικότητας ενός σώματος. Σύμφωνα με αυτό το νόμο, για κάθε μήκος κύματος και κάθε διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, η φασματική εκπομπή ενός σώματος είναι ίση με την φασματική απορροφητικότητά του:

$$\alpha_\lambda (T, \varphi, \theta) = \varepsilon_\lambda (T, \varphi, \theta) \quad (2.16.)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος,

φ και θ οι γωνιακές συντεταγμένες που ορίζουν τη διεύθυνση της διάδοσης και

T η θερμοκρασία του σώματος.

Αυτή η σχέση ισχύει και για ημισφαιρικές ιδιότητες:

$$\alpha_\lambda (T) = \varepsilon_\lambda (T) \quad (2.17.)$$

Γκρίζο (φαιό) σώμα. Ένα σώμα του οποίου ο μονοχρωματικός συντελεστής εκπομπής, ε_λ , είναι ανεξάρτητος από το μήκος κύματος καλείται γκρίζο σώμα. Ως μονοχρωματικός συντελεστής εκπομπής καλείται ο λόγος της μονοχρωματικής ισχύος εκπομπής του σώματος με την μονοχρωματική ισχύ εκπομπής του μελανού σώματος στο ίδιο μήκος κύματος και θερμοκρασία.

$$\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{b\lambda} \quad (2.18.)$$

Ο συνολικός συντελεστής εκπομπής του σώματος συνδέεται με τον μονοχρωματικό συντελεστή εκπομπής μέσω της σχέσης:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda} \quad (2.19.)$$

Εάν ισχύει η συνθήκη του γκρίζου σώματος ($\varepsilon_\lambda = \text{σταθερό}$), τότε: $\varepsilon = \varepsilon_\lambda$.

Στους υπολογισμούς θεωρείται ότι τα σώματα συμπεριφέρονται ως γκρίζα.

Στη φυσική των κτηρίων και τη μηχανική της ηλιακής ενέργειας είναι απαραίτητη η γνώση των οπτικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται για δύο κυρίως ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η απορρόφηση είναι απαραίτητη για τα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος ώστε να υπολογίζονται τα ηλιακά κέρδη. Ο συντελεστής εκπομπής χρειάζεται για την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεγάλου μήκους κύματος για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών με ακτινοβολία. Η ηλιακή απορρόφηση και η θερμική εκπομπή διαφόρων υλικών ορίζεται ως εξής:

- Ηλιακή απορροφητικότητα, $\alpha(T)$:

$$\alpha(T) = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} a_\lambda(T) I_\lambda d\lambda}{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_\lambda d\lambda} \quad (2.20.)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας απορρόφησης και

I_λ η ηλιακή ακτινοβολία.

- Συντελεστής θερμικής εκπομπής, $\varepsilon_T(T)$:

$$\varepsilon_T(T) = \frac{\int_{1\mu m}^{100\mu m} \varepsilon_{\lambda}(T) E_{b\lambda}(T) d\lambda}{\int_{1\mu m}^{100\mu m} E_{b\lambda}(T) d\lambda} \quad (2.21.)$$

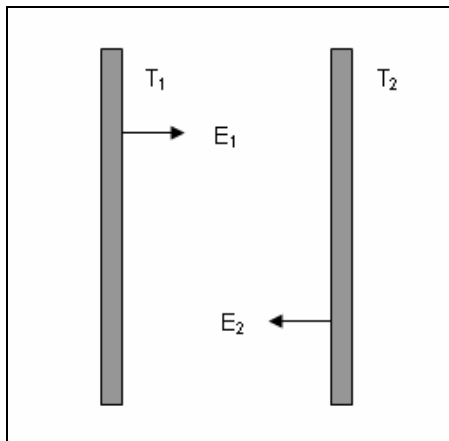
όπου T είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας εκπομπής και $E_{b\lambda}(T)$ η φασματική ημισφαιρική ισχύς εκπομπής του μαύρου σώματος σε θερμοκρασία T , που δίδεται από το νόμο του Planck.

2.1.4.4. Ακτινοβολία μεταξύ δύο μαύρων παράλληλων πλακών

Η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο σωμάτων διέπεται από δύο κύρια χαρακτηριστικά:

- Το πρώτο είναι ότι λόγω της ηλεκτρομαγνητικής φύσεως της θερμικής ακτινοβολίας, η ανταλλαγή θερμότητας συμβαίνει ακόμη και χωρίς την παρουσία ενός φυσικού μέσου.
- Το δεύτερο είναι ότι παρόλο που η αγωγιμότητα και η συναγωγή σταματούν όταν τα θερμοδυναμικά συστήματα, ανάμεσα στα οποία λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας, αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία, η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία συμβαίνει ακόμα και μεταξύ όμοιων επιφανειών με την ίδια θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η θερμική ισορροπία με ακτινοβολία είναι ένα δυναμικό φαινόμενο.

Η καθαρή συναλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο μαύρων παράλληλων πλακών απείρου μήκους υπολογίζεται σύμφωνα με το νόμο των Stefan-Boltzmann (σχήμα 2.9.).



Σχήμα 2.9. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο μαύρων παράλληλων πλακών.

Η ισχύς εκπομπής της πλάκας σε θερμοκρασία T_1 είναι:

$$E_1 = \sigma T_1^4 \quad (2.22.)$$

και η ισχύς εκπομπής της πλάκας σε θερμοκρασία T_2 είναι:

$$E_2 = \sigma T_2^4 \quad (2.23.)$$

Εάν $T_1 > T_2$, τότε η καθαρή ροή θερμότητας με ακτινοβολία ισούται με:

$$E_{1-2} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.24.)$$

Ο δείκτης της καθαρής ισχύος με ακτινοβολία υποδηλώνει τη διεύθυνση της ροής η οποία είναι από τη θερμότερη επιφάνεια προς την ψυχρότερη. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι από την επιφάνεια 1 προς την επιφάνεια 2.

Στην περίπτωση που οι πλάκες δεν είναι μαύρα σώματα αλλά σώματα με ημισφαιρικούς συντελεστές εκπομπής ε_1 και ε_2 αντίστοιχα, τότε η καθαρή ροή ακτινοβολίας θα είναι:

$$E_{1-2} = \sigma (\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_2 T_2^4) \quad (2.25.)$$

3. Η ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ως θερμοχωρητικότητα ενός υλικού, συστήματος ή δομικού στοιχείου καλείται η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά 1 βαθμό K ή °C. Καταδεικνύει την ικανότητα του σώματος να αποθηκεύει θερμότητα και δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (3.1.)$$

όπου C [J/K] η θερμοχωρητικότητα,
 dQ [J] η αποθηκευμένη θερμότητα,
 dT [K] η διαφορά θερμοκρασίας.

Ειδική θερμοχωρητικότητα, c , καλείται η ανοιγμένη τιμή της θερμοχωρητικότητας του σώματος ανά μονάδα μάζας (σε J/kg·K).

Η αποθηκευμένη θερμότητα αυξάνεται με την αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας καθώς επίσης με την αύξηση της θερμοχωρητικότητας και της μάζας του σώματος.

Η θερμοχωρητικότητα ενός δομικού στοιχείου (τοιχοποιία, οροφή) που βρίσκεται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον επηρεάζει τις θερμικές ανάγκες του χώρου και την θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειάς του όταν η θέρμανση του χώρου δεν είναι σταθερή και υπάρχει διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Υψηλή τιμή της θερμοχωρητικότητας σημαίνει χαμηλό ρυθμό ροής θερμότητας ή ψύξης στο χώρο και μείωση των αναγκών θέρμανσής του.

Στην περίπτωση που ένα κτήριο έχει ανάγκη ταχείας θέρμανσης (αλλά και ψύξης) τότε τοποθετείται ένα θερμομονωτικό υλικό στο εσωτερικών των επιφανειών των εξωτερικών δομικών στοιχείων και η επίδραση της θερμοχωρητικότητας δεν λαμβάνεται υπόψη. Αντίθετα, εάν χρειάζεται / απαιτείται η επίδραση της θερμοχωρητικότητας, τότε το θερμομονωτικό υλικό τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά του δομικού στοιχείου.

Η εσωτερική θερμοχωρητικότητα θερμικής ζώνης/κτηρίου, C_m , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_m = \sum (k_j \cdot A_j) \quad (3.2.)$$

όπου C_m [kJ/K] η εσωτερική θερμοχωρητικότητα της θερμικής ζώνης (kJ/K),
 k_j [(kJ/(m²·K))] η εσωτερική θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του δομικού στοιχείου j
 A_j [m²] η εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου j .

Η τιμή του k_j υπολογίζεται από τη θερμοχωρητικότητα των επιμέρους υλικών που αποτελούν το δομικό στοιχείο και βρίσκονται μέχρι το «μέγιστο» ενεργό βάθος του δομικού στοιχείου. Ως ενεργό βάθος ορίζεται η μικρότερη τιμή μήκους από την εσωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου μέχρι:

- 1) τη θέση της θερμομονωτικής στρώσης του δομικού στοιχείου,
- 2) το ήμισυ του πάχους του δομικού στοιχείου ή
- 3) το βάθος των 10 cm του δομικού στοιχείου από την εσωτερική του πλευρά.

Η εσωτερική θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του δομικού στοιχείου δίνεται για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες της θερμικής ζώνης / ορόφου / κτηρίου από την ακόλουθη σχέση:

$$k_j = \sum \rho_j c_j d_j \quad (3.3.)$$

όπου ρ_j [kg/m³] η πυκνότητα του υλικού j ,
 d_j [m] το πάχος του υλικού j και
 c_j [kJ/(kg·K)] η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού.

4. ΤΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

4.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Θερμομονωτικά χαρακτηρίζονται τα υλικά, τα οποία συντελούν στη μείωση της ροής θερμότητας μέσω των δομικών στοιχείων μιας κτιριακής κατασκευής, οδηγώντας με τον τρόπο αυτό στη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς της. Η θερμική προστασία που παρέχουν οφείλεται στον αέρα που είναι εγκλωβισμένος στη μάζα τους, είτε μέσα σε κλειστές ή ανοικτές κυψελίδες, είτε ανάμεσα σε πολλές μικρές και λεπτές ίνες, ο οποίος θεωρείται πρακτικά ακίνητος και ως εκ τούτου παρουσιάζει πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα. Σε ακραίες περιπτώσεις, ο αέρας μπορεί να καταλαμβάνει μέχρι και το 96% του όγκου των θερμομονωτικών υλικών, γι' αυτό το βάρος τους είναι συνήθως πολύ χαμηλότερο από αυτό των λοιπών οικοδομικών υλικών.

Όπως προκύπτει από τα σχετικά πρότυπα, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως θερμομονωτικό όταν ο συντελεστής θερμοπερατότητάς του δεν υπερβαίνει μια ανώτερη τιμή, η οποία κυμαίνεται από 0,060 W/(m·K) έως 0,100 W/(m·K). Αλλά και αρκετά ακόμη υλικά που υπερβαίνουν αυτές τις καθοριζόμενες τιμές δεν παύουν να προσφέρουν θερμική προστασία και να συνυπολογίζονται στα θερμομονωτικά υλικά.

Τα θερμομονωτικά υλικά αναλόγως της πρώτης ύλης παραγωγής τους, του τρόπου επεξεργασίας της, της μορφής και των ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες.

Έτσι, ανάλογα με τα κριτήρια διαχωρισμού τους μπορούν να διακριθούν:

- σε **οργανικά** και **ανόργανα** (με βασικό κριτήριο την πρώτη ύλη παραγωγής τους),
- σε **ινώδη**, **κυψελώδη** και **κοκκώδη** (με βασικό κριτήριο τη μορφή τους),
- σε **προσβαλλόμενα** και **μη προσβαλλόμενα** από την υγρασία, ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες κ.τ.λ. (με βασικό κριτήριο τις ιδιότητές τους),
- σε **πλάκες**, **παπλώματα**, **χύδην**, **άκαμπτα** ή **εύκαμπτα** (με βασικό κριτήριο τη μορφή τους),
- σε **φυσικά** και **τεχνητά** (με βασικό κριτήριο την παραγωγή τους),
- σε **βαριά** και σε **ελαφρά** (με βασικό κριτήριο το βάρος τους).

4.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η γνώση των ιδιοτήτων που παρουσιάζει το κάθε θερμομονωτικό υλικό αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ορθή επιλογή κατά τη χρήση του στη δόμηση.

Οι κυριότερες ιδιότητες που θα πρέπει να λάβει υπόψη του ο μηχανικός κατά την επιλογή ενός θερμομονωτικού υλικού είναι τα ιδιαίτερα θερμοτεχνικά του χαρακτηριστικά, οι μηχανικές του ιδιότητες, η ανθεκτικότητά του στην επίδραση των διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων, η φιλικότητα προς το περιβάλλον, οι δυνατότητες χρήσης και εφαρμογής του, η συνεργασιμότητά του με τα άλλα υλικά. Οι περισσότερες από τις ιδιότητες των θερμομονωτικών υλικών και τα όρια εντός των οποίων καθιστούν αυτά τα υλικά αποδεκτά στη δόμηση περιγράφονται στα διάφορα πρότυπα. Ωστόσο, σημαντικό κριτήριο για την επιλογή ενός υλικού αποτελεί το κόστος του, καθώς και το κόστος μεταφοράς και τοποθέτησης.

Για τα συνήθως απαντώμενα υλικά στην ελληνική αγορά αυτά τα πρότυπα είναι:

A/A	ΠΡΟΤΥΠΟ	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ
1	ΕΛΟΤ EN 13162 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από ορυκτόμαλλο (MW). - Προδιαγραφή.
2	ΕΛΟΤ EN 13163 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS). - Προδιαγραφή
3	ΕΛΟΤ EN 13164 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από εξηλασμένο αφρό πολυστερίνης (XPS). - Προδιαγραφή
4	ΕΛΟΤ EN 13165 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από άκαμπτο αφρό πολυουρεθάνης (PUR). - Προδιαγραφή
5	ΕΛΟΤ EN 13166 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από φαινολικό αφρό (PF). - Προδιαγραφή
6	ΕΛΟΤ EN 13167 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από κυψελωτό γυαλί (CG). - Προδιαγραφή
7	ΕΛΟΤ EN 13168 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από ξυλόμαλλο (WW). - Προδιαγραφή
8	ΕΛΟΤ EN 13169 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένο περλίτη (EPB). - Προδιαγραφή
9	ΕΛΟΤ EN 13170 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένο φελλό (ICB). - Προδιαγραφή
10	ΕΛΟΤ EN 13171 E2 (2009)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από ίνες ξύλου (WF). - Προδιαγραφή
11	ΕΛΟΤ EN 14316.01 (2005)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Επί τόπου κατασκευαζόμενη θερμομόνωση από προϊόντα διογκωμένου περλίτη (EP). - Μέρος 1: Προδιαγραφή για συνδεδεμένα και χαλαρής πλήρωσης προϊόντα πριν από την εγκατάσταση
12	ΕΛΟΤ EN 14316.02 (2007)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Επί τόπου κατασκευαζόμενη θερμομόνωση από προϊόντα διογκωμένου περλίτη (EP). - Μέρος 2: Προδιαγραφή για εγκατεστημένα προϊόντα
13	ΕΛΟΤ EN 14317.01 (2005)	Θερμομονωτικά προϊόντα κτηρίων. - Επί τόπου κατασκευαζόμενη θερμομόνωση από προϊόντα διογκωμένου βερμικουλίτη (EV). - Μέρος 1: Προδιαγραφή για συνδεδεμένα και χαλαρής πλήρωσης προϊόντα πριν από την εγκατάσταση

4.2.1. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ ορίζει την ποσότητα της ροής θερμότητας, που διέρχεται από τη μονάδα επιφάνειας ενός υλικού, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο απέναντι επιφανειών του είναι ίση με τη μονάδα.

Η τιμή του υπολογίζεται εργαστηριακά σε θερμοκρασία 10°C και σε ξηρή κατάσταση και κατόπιν γίνεται μια προσαύξηση, ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της “**πρακτικής υγρασίας**”, δηλαδή της υγρασίας που προσλαμβάνει το υλικό από το περιβάλλον του υπό κανονικές συνθήκες.

Στον πίνακα 2 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-2/2010 περί «*θερμοφυσικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών και έλεγχο της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων*» που συνοδεύει τον Κ.Εν.Α.Κ. δίδονται οι τιμές των περισσότερων και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων δομικών υλικών. Αυτές οι τιμές είναι ενδεικτικές και ο μελετητής μηχανικός κατά τη σύνταξη της ενεργειακής μελέτης μπορεί να κάνει χρήση αυτής ή άλλης τιμής του υλικού, που ενδεχομένως να μην υπάρχει στον πίνακα των υλικών της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε., αρκεί αυτή να είναι πιστοποιημένη κατά CE.

4.2.2. Η επίδραση της θερμοκρασίας

Η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Άνοδος της θερμοκρασίας επιφέρει και άνοδο της τιμής του λ και άρα μείωση της θερμομονωτικής ικανότητας του υλικού. Όμως για συνηθισμένες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας (ημερήσιες ή εποχιακές) η μεταβολή της τιμής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας θεωρείται αμελητέα και δεν λαμβάνεται υπόψη.

Ωστόσο, κάποια θερμομονωτικά υλικά είναι ευπαθή σε πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας, καθώς προκαλείται αλλοίωση της υφής τους και θραύση των κυψελών τους. Τέτοια συμπεριφορά στη θερμότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή του θερμομονωτικού υλικού, όπως για παράδειγμα στη θερμομόνωση ενός δώματος, στο οποίο αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες κατά τη θερινή περίοδο με έντονη ηλιακή ακτινοβολία (έχουν καταμετρηθεί τιμές μεγαλύτερες των 70°C), στη θερμομόνωση αεραγωγών θερμού αέρα (καπνοδόχου) ανοικτών εστιών καύσης (τζακιών) ή αγωγών μεταφοράς θερμού νερού κ.τ.λ.

Εκτός από ενδεχόμενη βλάβη, η άνοδος της θερμοκρασίας επιφέρει επιμήκυνση των διαστάσεων των υλικών σε βαθμό που εξαρτάται από το συντελεστή θερμοδιαστολής τους. Στα θερμομονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται υπό μορφή σκληρών πλακών τυχόν επιμήκυνση λόγω διαστολής μπορεί να επιφέρει ανασήκωσή τους και η συρρίκνωσή τους να δημιουργήσει θερμογέφυρες στις ακμές συναρμογής τους. Γι' αυτό είναι σκόπιμο οι πλάκες αυτών των υλικών να σχηματίζουν περιμετρικά αναβαθμό (πατούρα), προκειμένου να αφήνεται ο απαραίτητος αρμός και ταυτόχρονα να αποφεύγεται ο σχηματισμός θερμογεφυρών. Μέριμνα επίσης πρέπει να λαμβάνεται και για τα θερμομονωτικά υλικά που κατασκευάζονται με θερμικές διεργασίες και που μετά την ψύξη τους παρουσιάζουν μικρή συρρίκνωση των αρχικών τους διαστάσεων της τάξης του 0,3% λόγω απομάκρυνσης της υγρασίας που απέκτησαν κατά το στάδιο παραγωγής. Είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται αφού περάσει το απαραίτητο διάστημα αποβολής της υγρασίας.

4.2.3. Η επίδραση της υγρασίας

Η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζεται άμεσα και από την υγρασία. Υλικά που έχουν εμποτισθεί με υγρασία μειώνουν ή ακόμη και χάνουν τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες και αυξάνουν αντιστοίχως τη θερμική τους αγωγιμότητα.

Όταν ένα υλικό εμποτισθεί από την υγρασία ουσιαστικά το νερό εκτοπίζει τον αέρα που βρίσκεται ανάμεσα στις ίνες του ή στις ανοικτές κυψελίδες του και καταλαμβάνει τη θέση του. Δεδομένου δε ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νερού ($\lambda = 0,60 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), είναι περίπου 24 φορές μεγαλύτερος αυτού του αέρα (ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα στους 20°C είναι ίσος με $\lambda = 0,025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα του εμποτισμένου υλικού.

4.2.4. Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας

Τα αφρώδη οργανικά θερμομονωτικά υλικά και κυρίως τα πολυστερινικά και πολυουρεθανικά επηρεάζονται από την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν παραμένουν επί μακρόν εκτεθειμένα σ' αυτήν. Οι ακτίνες του ηλίου αλλοιώνουν σταδιακά το υλικό, μειώνοντας την αντοχή του και καθιστώντας το πιο εύθραυστο. Τα συμπτώματα εμφανίζονται συνήθως με ελαφρά απόχρωση της επιφάνειάς του και κατόπιν με θρυμματισμό του υλικού.

Προκειμένου να περιοριστεί η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στα ευπρόσβλητα από τον ήλιο υλικά αυτά οφείλουν να παραμένουν μέχρι τη χρήση τους προφυλαγμένα σε υπόγειους χώρους ή τουλάχιστον σε χώρους σκιασμένους και με κατάλληλο προστατευτικό επικάλυμμα. Ομοίως μετά την

τοποθέτησή τους στα δομικά στοιχεία πρέπει σε σύντομο χρονικό διάστημα να επικαλύπτονται από άλλα υλικά.

4.2.5. Η χημική συμπεριφορά

Ορισμένα οργανικά θερμομονωτικά υλικά προσβάλλονται από ποικιλία χημικών διαλυτών, όπως είναι οι βενζίνες, το ασετόν, το βενζόλιο κ.ά. Επίσης τα περισσότερα αφρώδη οργανικά υλικά επηρεάζονται από την πίσσα και τη ρευστή άσφαλτο. Κατά τις κατασκευές των δωματίων οι ασφαλικές μεμβράνες δεν πρέπει να επικολλώνται επάνω σε πολυστερινικής προέλευσης υλικά, διότι υπάρχει κίνδυνος καταστροφής τους.

Ομοίως, ορισμένες κόλλες και χημικοί διαλύτες μπορούν να καταστρέψουν θερμομονωτικά υλικά που έχουν ως πρώτη ύλη το ξύλο ή διάφορα άλλα είδη φυτών (άχυρα καλάμια κ.τ.λ.).

4.2.6. Η αντίσταση στη φωτιά

Όλα σχεδόν τα θερμομονωτικά υλικά ανόργανης προέλευσης παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά απέναντι στη φωτιά. Τα περισσότερα από αυτά δεν αναφλέγονται και δεν συντηρούν τη φωτιά. Τέτοια είναι ο υαλοβάμβακας, ο πετροβάμβακας, το αφρώδες γυαλί, ο περλίτης κ.ά.

Αντιθέτως, τα περισσότερα θερμομονωτικά υλικά οργανικής προέλευσης, φυσικά ή τεχνητά, έχουν κακή συμπεριφορά στη φωτιά και κατατάσσονται στην κατηγορία των καυστών υλικών ή αναφλέγονται αν εκτεθούν απευθείας σε φλόγα και κατατάσσονται στην κατηγορία των καυστών ή αυτοσβεννόμενων υλικών. Σ' αυτήν την κατηγορία υπάγονται τα πολυστερινικά και πολυουρεθανικά υλικά και τα παράγωγα από ξύλα και φυτά (ξύλομαλλο, φελλός, καλάμια, γιούτα).

4.2.7. Η μηχανική αντοχή

Το θέμα της αντοχής των υλικών σε θλιπτικά ή εφελκυστικά φορτία άλλοτε είναι πολύ σημαντικό και άλλοτε όχι. Για παράδειγμα μικρή σημασία έχει η μηχανική αντοχή της θερμομονωτικής στρώσης στον πυρήνα μιας τοιχοποιίας πλήρωσης. Είναι όμως πρώτης σημασίας αν η τοιχοποιία είναι φέρουσα και το θερμομονωτικό υλικό ανήκει στα φέροντα στοιχεία της κατασκευής (π.χ. θερμομονωτικά τούβλα).

Κατά ανάλογο τρόπο αξιολογείται η μηχανική αντοχή των θερμομονωτικών υλικών, όταν πρόκειται να τοποθετηθούν σε δώμα ή σε δάπεδο και πρόκειται να ασκηθούν σ' αυτό ισχυρά φορτία.

Κάποια υλικά (π.χ. ξυλόμαλλο, αφρώδες γυαλί) παρουσιάζουν πολύ υψηλές αντοχές και ορισμένα εξ αυτών μπορούν να χρησιμεύσουν ταυτοχρόνως και ως ξυλότυποι κατά την κατασκευή. Άλλα πάλι (π.χ. πάπλωμα υαλοβάμβακα) δεν προσφέρονται για καταπονήσεις, ενώ άλλα (διογκωμένη πολυστερίνη, εξηλασμένη πολυστερίνη) είναι επιδεκτικά γραμμικών φορτίων, όχι όμως και μοναχικών.

Επίσης η γνώση της αντοχής των θερμομονωτικών υλικών σε εφελκυσμό είναι χρήσιμη, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως αυτοφερόμενες κατασκευές ή να τοποθετηθούν σε ψευδοροφές που παρουσιάζουν μεγάλα ανοίγματα.

4.2.8. Η ηχομονωτική ικανότητα

Η ικανότητα των υλικών να περιορίζουν τη μετάδοση του αερόφερτου ήχου (δηλαδή του μεταφερόμενου μέσω του αέρα) και του κτυπογενούς (δηλαδή του παραγόμενου από την κρούση δύο

στερεών υλικών) καθορίζει την ηχομονωτική του συμπεριφορά. Ορισμένα θερμομονωτικά υλικά απορροφούν τον ήχο περιορίζοντας την επίδρασή του. Τέτοια υλικά είναι τα διάφορα ανόργανα ινώδη (υαλοβάμβακας, πετροβάμβακας) ή οργανικά πορώδη ή ινώδη (φελλός, ξυλόμαλλο).

4.3. Η ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι προδιαγραφές που πρέπει να πληροί ένα θερμομονωτικό υλικό ορίζονται από πρότυπα. Αυτά καθορίζουν τις απαιτήσεις ως προς τις ιδιότητές τους, τις ικανότητές τους και τη συμπεριφορά τους. Σύμφωνα με τις κοινοτικές οδηγίες που ισχύουν ήδη από ήδη από το 1988 (Οδηγία 89/106/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21ης Δεκεμβρίου 1988), ένα προϊόν θεωρείται κατάλληλο προς χρήση, εφόσον ανταποκρίνεται προς ένα εναρμονισμένο πρότυπο, μια ευρωπαϊκή τεχνική έγκριση ή μια μη εναρμονισμένη τεχνική προδιαγραφή, αναγνωρισμένη σε κοινοτικό επίπεδο.

Τα προϊόντα που ικανοποιούν αυτές τις απαιτήσεις αποκτούν το δικαίωμα να φέρουν τη σήμανση CE. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα πιστοποιητικό που δηλώνει ότι για την παραγωγή του προϊόντος έχουν τηρηθεί όλες οι προδιαγραφές που θέτουν τα πρότυπα. Και αυτό βεβαιώνεται με τον έλεγχο της παραγωγής στο εργοστάσιο και με τις δοκιμές των δειγμάτων του προϊόντος. Σύμφωνα με την κοινή υπουργική απόφαση 9451/208 (Φ.Ε.Κ. 815Β/24-5-07) όλοι οι παραγωγοί θερμομονωτικών προϊόντων οφείλουν πλέον να συμμορφωθούν προς τις απαιτήσεις των προτύπων και τα βιομηχανικά παραγόμενα θερμομονωτικά προϊόντα τους να φέρουν την ένδειξη CE.

4.4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

4.4.1. Η διογκωμένη πολυστερίνη

Προέρχεται από την πετροχημική βιομηχανία και ανήκει στην κατηγορία των αφρωδών συνθετικών υλικών. Διεθνώς είναι γνωστή ως EPS (expanded polystyrene). Πρόκειται για άοσμο υλικό κι έχει δομή κλειστών κυψελίδων.

- Η διογκωμένη πολυστερίνη που χρησιμοποιείται στη δόμηση κυκλοφορεί συνήθως σε δύο μορφές
- Σε κόκκους (χύμα).
 - Σε ορθογωνισμένες πλάκες.

Οι ορθογωνισμένες πλάκες απαντώνται στην αγορά σε διάφορα πάχη, ανάλογα με την κάθε εταιρεία παραγωγής. Τα πλέον συνηθισμένα είναι μεταξύ 2 cm και 10 cm. Οι πλάκες μπορεί να είναι απόλυτα ορθογωνισμένες ή με περιμετρικό αναβαθμό (πατούρα), προκειμένου κατά τη συναρμογή να αποφεύγεται ο αρμός καθ' όλο το πάχος της στρώσης, που λειτουργεί ως θερμογέφυρα. Ανάλογα με τον τύπο τους οι πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης μπορεί να έχουν τελική επιδερμίδα ή όχι.

Τα προϊόντα διογκωμένης πολυστερίνης κυκλοφορούν στο εμπόριο συνήθως σε χρώμα λευκό. Ωστόσο, μπορεί κανείς να τα συναντήσει και σε άλλα χρώματα, όπως απαλό κίτρινο ή ροζ, που επιλέγουν ορισμένοι παραγωγοί για τα προϊόντα τους προς διάκριση από των υπολοίπων.

Στην αγορά κυκλοφορεί επίσης διογκωμένη πολυστερίνη με γραφίτη στη μάζα της. Το χρώμα της είναι συνήθως γκρι με απόκλιση προς το ασημί. Οι πλάκες με γραφίτη παρουσιάζουν καλύτερη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες της διογκωμένης πολυστερίνης παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες της διογκωμένης πολυστερίνης.

Μορφή	Σε πλάκες. Συνήθη πάχη 2 - 10 cm Σε μορφή κόκκων (χύμα)
Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Ναι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Ναι: από ακετόνη (ασετόν), αιθέρα, βενζόλιο, βενζίνες, κετόνες, ρευστή ασφαλτο και υλικά που περιέχουν πίσσα
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	Ναι
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Αντοχή περίπου από -80°C έως +80°C
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	Σε κόκκους 0,033 - 0,038 W/(m·K) Σε πλάκες 0,033 - 0,038 W/(m·K) Με γραφίτη, σε πλάκες 0,030 - 0,032 W/(m·K)
Απορρόφηση νερού (σύμφωνα με το πρότυπο EN 13163/2009)	Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απορροφώμενου νερού μικρότερο από 2% έως 5% κατ' όγκο.
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	Σε πλάκες $\mu = 20 - 100$ Με γραφίτη, σε πλάκες $\mu = 30 - 80$
Αντοχή στη συμπίεση	Ικανοποιητική
Μεταβολή διαστάσεων	Σχετική σταθερότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 1% σε συγκεκριμένες συνθήκες υπό παραμονή 48 ωρών.
Συμπεριφορά σε φωτιά	Εύφλεκτο και αυτοσβεννόμενο υλικό Με γραφίτη: άφλεκτο υλικό

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 13163/2009, τα προϊόντα διογκωμένης πολυστερίνης κατατάσσονται σε διαφορετικούς τύπους βάσει της αντοχής τους σε θλίψη (για παράδειγμα, ο τύπος EPS 100, δηλώνει θλιπτική αντοχή 100 kPa). Αυτή η τιμή αφορά σε κατανεμημένα φορτία και συνήθεις τιμές κυμαίνονται στην περιοχή 30-500 kPa. Ωστόσο, η εφαρμογή ισχυρών μοναχικών φορτίων μπορεί να οδηγήσει σε παραμόρφωση και θραύση των υπερκείμενων υλικών και γι' αυτό συνήθως απαιτείται η μεσολάβηση στρώσεων από ισχυρά υλικά, κατά προτίμηση οπλισμένων με πλέγμα, που παραλαμβάνουν τα μοναχικά φορτία και τα μετατρέπουν σε γραμμικά.

Η διογκωμένη πολυστερίνη χρησιμοποιείται στη δόμηση ως θερμομονωτικό προϊόν για τη θερμική προστασία των περισσότερων δομικών στοιχείων: κατακόρυφων στοιχείων φέροντος οργανισμού (δοκών, υποστυλωμάτων, τοιχίων), κατά προτίμηση όταν δεν είναι εκτεθειμένα στην επίδραση της βροχής, τοιχοποιίας πλήρωσης, δαπέδων επί εδάφους, που είναι προστατευμένα έναντι της υγρασίας εδάφους, δαπέδων επάνω από υπόγειο ή πιλοτή, ψευδοροφών, δωμάτων (συμβατικού τύπου) και στεγών, κεκλιμένων επιφανειών των στεγών και οριζόντιων οροφών κάτω από μη θερμομονωμένες στέγες.

Κατά κανόνα χρησιμοποιείται σε πλάκες και σε ειδικές περιπτώσεις σε μορφή κόκκων (χύμα), κυρίως για την πλήρωση κενών.

Λόγω των καλών θερμομονωτικών της ιδιοτήτων και του σχετικά χαμηλού κόστους της, η διογκωμένη πολυστερίνη αποτελεί ένα από τα περισσότερο προτιμώμενα θερμομονωτικά υλικά.

4.4.2. Η αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη

Αποτελεί συγγενές προϊόν της διογκωμένης πολυστερίνης και προέρχεται και αυτή από την πετροχημική βιομηχανία. Ανήκει στην κατηγορία των αφρώδων συνθετικών υλικών και είναι διεθνώς γνωστή ως XPS (extruded polystyrene). Είναι άοσμο υλικό κι έχει δομή κλειστών πολυεδρικών κυψελίδων.

Κυκλοφορεί στο εμπόριο σε ορθογωνισμένες πλάκες, σε πάχη συνήθως μεταξύ 2 και 10 cm. Οι εταιρείες παραγωγής παράγουν, ωστόσο, και πλάκες σε μεγαλύτερα πάχη, συνήθως μετά από παραγγελία.

Οι πλάκες μπορεί να είναι απόλυτα ορθογωνισμένες ή να έχουν περιμετρικό αναβαθμό (πατούρα), προκειμένου κατά τη συναρμογή να αποφεύγεται ο αρμός καθ' όλο το πάχος της στρώσης, που λειτουργεί ως θερμογέφυρα. Μπορεί επίσης να είναι με εξωτερική επιδερμίδα ή όχι (εφόσον προέρχεται από την κοπή μεγαλύτερων τεμαχίων), με λεία ή τραχιά επιφάνεια.

Τα προϊόντα αφρώδους εξηλασμένης πολυστερίνης απαντώνται στο εμπόριο συνήθως σε γαλάζιο ή ανοιχτό πράσινο χρώμα. Δεν αποκλείεται όμως και η παρουσία τους σε άλλα χρώματα, ανάλογα με τις επιλογές της παραγωγού εταιρείας.

Συνοπτικά, οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες της αφρώδους εξηλασμένης πολυστερίνης παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες της αφρώδους εξηλασμένης πολυστερίνης.

Μορφή	Πλάκες. Συνήθη πάχη 2 - 10 cm
Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Ναι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Ναι: από ακετόνη (ασετόν), αιθέρας, βενζόλιο, βενζίνες, κετόνες, ρευστή άσφαλτος και υλικά που περιέχουν πίσσα
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	ΝΑΙ
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Αντοχή από -50°C ως +75°C
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	σε πλάκες: 0,031 - 0,038 W/(m·K) με άνθρακα σε πλάκες: 0,030 - 0,032 W/(m·K)
Απορρόφηση νερού (σύμφωνα με το πρότυπο EN 13163/2009)	Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απορροφώμενου νερού μικρότερο από 0,7% έως 3% κατ' όγκο.
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	$\mu = 80 - 250$
Αντοχή στη συμπίεση	Ικανοποιητική
Μεταβολή διαστάσεων	Σχετική σταθερότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 2% σε συγκεκριμένες συνθήκες υπό παραμονή 48 ωρών.
Συμπεριφορά σε φωτιά	Εύφλεκτο και αυτοσβεννόμενο υλικό

Η αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη παρουσιάζει ικανοποιητικές αντοχές σε θλίψη με τιμές στην περιοχή 100 - 1000 kPa (CS(10/Y)100 – CS(10/Y)1000) σύμφωνα με το πρότυπο EN 13164/2009. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση της διογκωμένης πολυστερίνης, όταν εφαρμόζονται στις εξωτερικές στρώσεις δομικών στοιχείων απαιτείται προστασία έναντι εφαρμογής ισχυρών μοναχικών φορτίων (μόνιμων ή κρουστικών), η οποία επιτυγχάνεται, για παράδειγμα, με την επίχρισή τους με οπλισμένο κονίαμα για τη μετατροπή των μοναχικών φορτίων σε κατανεμημένα.

Η αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη χρησιμοποιείται στη δόμηση ως θερμομονωτικό υλικό για τη θερμική προστασία σχεδόν όλων των δομικών στοιχείων: κατακόρυφων στοιχείων φέροντος οργανισμού (δοκών, υποστυλωμάτων, τοιχίων), τοιχίων υπογείων που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, τοιχοποιίας πλήρωσης, δαπέδων επί εδάφους, δαπέδων επάνω από υπόγειο ή πιλοτή, ψευδοροφών, δωματίων συμβατικού ή αντεστραμμένου τύπου και στεγών.

Έχει σημαντικό μερίδιο στην αγορά θερμομονωτικών προϊόντων, υπολείπεται όμως αυτού της διογκωμένης πολυστερίνης.

4.4.3. Η πολυουρεθάνη

Η πολυουρεθάνη ανήκει στην κατηγορία των σκληρών αφρωδών μονωτικών υλικών κλειστής κυψελωτής δομής. Διεθνώς ο συντετμημένος όρος του άκαμπτου αφρού πολυουρεθάνης είναι PUR (polyurethane foam).

Στο εμπόριο διατίθεται σε διάφορες μορφές:

- σε σκληρές πλάκες,
- σε αφρό σε φιάλες για ατομική χρήση ή σε κυλινδρικά κιβώτια για γενικό ψεκασμό),
- σε μορφοποιημένα κογχύλια,
- σε μορφή πετασμάτων τύπου σάντουιτς με εκατέρωθεν επικαλύψεις μεταλλικών φύλλων,
- σε πλάκες με επικάλυψη λεπτού φύλλου αλουμινίου επίπεδης ή τραπεζοειδούς μορφής.

Η πολυουρεθάνη έχει χρώμα κίτρινο σε αποχρώσεις προς το λευκό έως το κιτρινοπορτοκαλί.

Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες της πολυουρεθάνης παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες της πολυουρεθάνης

Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Ναι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Ναι: από ακετόνη (ασετόν) και άλλοι ισχυροί διαλύτες Όχι: από βενζίνη και πετρελαιοειδή, οξέα και βάσεις
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	Ναι
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Αντοχή από -50°C έως +110°C
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	0,023 - 0,030 W/(m·K)
Απορρόφηση νερού	Όχι
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	$\mu = 50 - 100$
Αντοχή στη συμπίεση	Ικανοποιητική
Μεταβολή διαστάσεων	Σχετική σταθερότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο Για μικρότερη διάσταση των 1000 mm η ανοχή στην απόκλιση είναι ± 5 mm σε συγκεκριμένες συνθήκες.
Συμπεριφορά σε φωτιά	Αυτοσβεννόμενο υλικό

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 13165/2009, η αντοχή της πολυουρεθάνης σε θλίψη είναι ικανοποιητική και οι ελάχιστες τυποποιημένες τιμές βρίσκονται στην περιοχή 25 - 800 kPa. Ωστόσο, για την αποφυγή παραμόρφωσης κατά την εφαρμογή μοναχικών φορτίων απαιτείται η προστασία της από την εκτιθέμενη πλευρά, με κάποια από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν και στα προηγούμενα θερμομονωτικά υλικά.

Κατά την εφαρμογή της υπό μορφή αφρού, ψεκάζεται και σε σύντομο χρονικό διάστημα πολυμερίζεται με την υγρασία της ατμόσφαιρας και στερεοποιείται. Προσφύεται στα περισσότερα οικοδομικά υλικά και ιδιαίτερα στα πετρώδη. Δεν έχει καλή πρόσφυση επάνω σε φύλλα πολυαιθυλενίου, σιλικόνες, σε ορισμένα πλαστικά, καθώς και σε ρυπαρές επιφάνειες με λίπη και έλαια.

Βρίσκει στη δόμηση ευρεία χρήση εφαρμογών. Ανεξάρτητα από τη μορφή της, βρίσκει εφαρμογή στη θερμομονωτική προστασία: εξωτερικών τοιχοποιιών, δοκών, τοιχίων και υποστυλωμάτων με τοποθέτηση είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά, δαπέδων σε ευπρόσβλητες από την υγρασία κατασκευές, δωματίων συμβατικού ή αντεστραμμένου τύπου, ψευδοροφών

Ο εκτοξευόμενος αφρός πολυουρεθάνης χρησιμοποιείται επιπλέον σε καμπύλες, θολωτές ή σφαιρικές επιφάνειες, στις οποίες δεν είναι δυνατή η χρήση πλακών.

Τα προκατασκευασμένα πετάσματα πολυουρεθάνης έχουν περισσότερο εφαρμογές σε λυόμενες κατασκευές, βιομηχανικά κτήρια, περίπτερα εκθέσεων, στα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και ως στοιχεία πλήρωσης

4.4.4. Ο υαλοβάμβακας

Ανήκει στην κατηγορία των ανόργανων ινωδών υλικών.

Ο υαλοβάμβακας στο εμπόριο κυκλοφορεί σε διάφορες μορφές, ανάλογα με τη χρήση του, όπως: ως πάπλωμα σε ρολά, ως πάπλωμα προστατευμένο από τη μια του όψη με φύλλο αλουμινίου, ως πάπλωμα ενισχυμένο με μεταλλικό πλέγμα, ως απλές ή ενισχυμένες πλάκες, ως κογχύλια για θερμομονώσεις και ηχομονώσεις σωληνώσεων.

Τα προϊόντα υαλοβάμβακα έχουν κίτρινο χρώμα, που το αποκτούν κατά την επεξεργασία των ινών του γυαλιού με τη θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, ενώ ορισμένα προϊόντα του συναντώνται και σε λευκό χρώμα. Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του υαλοβάμβακα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του υαλοβάμβακα.

Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Όχι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Όχι (προσβάλλεται όμως από το υδροχλωρικό οξύ)
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	Όχι
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Αντοχή έως 400°C
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	Παπλώματα 0,035 - 0,041 W/(m·K) Σκληρές πλάκες 0,033 - 0,041 W/(m·K)
Συγκράτηση νερού	Ναι
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	$\mu = 1,0 - 1,5$
Αντοχή στη συμπίεση	Όχι (το πάπλωμα)
Μεταβολή διαστάσεων	Σταθερότητα (όταν δεν συμπιέζεται)
Συμπεριφορά σε φωτιά	Άκαυστο

Γενικά, ο υαλοβάμβακας δεν παρουσιάζει υψηλές μηχανικές αντοχές. Ειδικά τα παπλώματα υαλοβάμβακα παρουσιάζουν πολύ μικρή αντοχή σε συμπίεση και γι' αυτό δεν πρέπει να τοποθετούνται ως ενδιάμεση στρώση σε οριζόντια δομικά στοιχεία, όταν δέχονται θλιπτικά φορτία διότι κινδυνεύουν να συμπιεστούν και να μειώσουν τόσο το πάχος, όσο και την προσφερόμενη θερμομονωτική του προστασία.

Ο υαλοβάμβακας έχει ευρύτατη χρήση στη δόμηση και στη βιομηχανία. Χρησιμοποιείται τόσο ως θερμομονωτικό, όσο και ως ηχομονωτικό υλικό.

Ως θερμομονωτικό υλικό χρησιμοποιείται για τη θερμική προστασία των διαφόρων δομικών στοιχείων των κτιριακών κατασκευών, καθώς και τη θερμική προστασία φούρνων, καυστήρων, καπνοδόχων, αεραγωγών, δεξαμενών κτλ. Ως ηχομονωτικό υλικό χρησιμοποιείται για την ηχομόνωση τόσο επί μέρους δομικών στοιχείων και εγκαταστάσεων (σωληνώσεων, αεραγωγών, μηχανημάτων), όσο και χώρων με έντονη παραγωγή ήχου (χώρων ψυχαγωγίας, εργαστηρίων με θορυβώδη μηχανήματα κτλ.).

Ο υαλοβάμβακας υπό μορφή παπλώματος εξυπηρετεί τη θερμική προστασία δοχείων, καμπύλων επιφανειών, δομικών στοιχείων με ακανόνιστη επιφάνεια, ξύλινων δαπέδων, επειδή μπορεί να παρακολουθήσει τη μορφή της επιφάνειας που καλύπτει. Επίσης προτιμάται ως θερμομονωτικό υλικό σε ξύλινα πατώματα.

Τα κογχύλια χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θερμική προστασία σωληνώσεων, αεραγωγών.

Στα δομικά στοιχεία των κτηρίων χρησιμοποιείται τόσο με τη μορφή παπλώματος, όσο και με τη μορφή σκληρών ή ημίσκληρων πλακών. Εφαρμόζεται σχεδόν σε όλα τα δομικά στοιχεία: σε κατακόρυφα δομικά στοιχεία του φέροντος οργανισμού, προστατευμένος πάντα από την υγρασία, όταν τοποθετείται εξωτερικά, σε τοιχοποιία πλήρωσης στον πυρήνα της τοιχοποιίας ή εσωτερικά., σε ξύλινα δάπεδα υπό μορφή παπλώματος, σε δάπεδα επάνω από υπόγεια ή πιλοτές με τοποθέτηση του υλικού κατά προτίμηση από την κάτω πλευρά της πλάκας, σε ψευδοροφές, σε δώματα συμβατικού τύπου με τη χρήση σκληρών πλακών, που θα προστατεύονται από την υγρασία, στις κεκλιμένες επιφάνειες των στεγών και σε οριζόντιες οροφές κάτω από μη θερμομονωμένες στέγες κτηρίων.

4.4.5. Ο πετροβάμβακας

Ανήκει όπως και ο υαλοβάμβακας στην κατηγορία των ανόργανων ινωδών υλικών.

Ο πετροβάμβακας παράγεται με την ίδια διαδικασία που παράγεται και ο υαλοβάμβακας με τη διαφορά ότι ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται δολομίτης, ασβεστόλιθος, βωξίτης και πλουτώνια πετρώματα που δεν περιέχουν χαλαζία.

Στο εμπόριο κυκλοφορεί σε διάφορες μορφές, ανάλογα με τη χρήση του: ως πάπλωμα σε ρολό, απλό ή ενισχυμένο με μεταλλικό πλέγμα, ως απλές ή ενισχυμένες πλάκες, ως κογχύλια για θερμομονώσεις και ηχομονώσεις σωληνώσεων, σε ακανόνιστη μορφή.

Παράγεται επίσης με διάφορες επικαλύψεις (π.χ. με υαλοϋφασμα, με φύλλο αλουμινίου, με ασφαλισμένο υαλοπίλημα) Τα προϊόντα πετροβάμβακα στο εμπόριο συναντώνται με ένα σκούρο κιτρινοπράσινο χρώμα.

Για την παραγωγή του χρησιμοποιούνται φυσικά πετρώματα σε ποσοστό περίπου 80% χωρίς να αφήνει πολύ μεγάλες ποσότητες αποβλήτων, ενώ και οι ίνες του προϊόντος κατά την αποκομιδή τους σε βάθος χρόνου είναι βιοδιαλυτές. Ωστόσο, κατά τη διαδικασία παραγωγής του απαιτείται η κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας (υψηλή εμπεριεχόμενη ενέργεια)

Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του πετροβάμβακα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του πετροβάμβακα.

Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Όχι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Όχι (προσβάλλεται όμως από το υδροχλωρικό οξύ)
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	Όχι
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Αντοχή έως 750°C
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	Παπλώματα 0,035 - 0,041 W/(m·K)
	Σκληρές πλάκες 0,033 - 0,041 W/(m·K)
	Χύμα (κοκκώδης μορφή) 0,058 W/(m·K)
Συγκράτηση νερού	Ναι
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	$\mu = 1,0 - 1,5$
Αντοχή στη συμπίεση	Όχι
Μεταβολή διαστάσεων	Σταθερότητα (όταν δεν συμπιέζεται)
Συμπεριφορά σε φωτιά	Άκαυστο, πυράντοχο

Ο πετροβάμβακας στη μορφή παπλώματος ή χύμα δεν παρουσιάζει υψηλές μηχανικές αντοχές, διότι μπορεί να συμπίεσθεί. Στη μορφή των πλακών εμφανίζονται ελαφρώς καλύτερες αντοχές (5 έως

20 kPa σε τάση θλίψης 10%, σύμφωνα με διάφορους παραγωγούς), οι οποίες και πάλι όμως δεν επαρκούν για την τοποθέτηση των πλακών σε οριζόντια δομικά στοιχεία που αναμένεται να δεχθούν συμπίεση.

Ο πετροβάμβακας έχει σχεδόν τις ίδιες χρήσεις που έχει και ο υαλοβάμβακας τόσο στη δόμηση, όσο και στη βιομηχανία. Επιπλέον όμως προτιμάται σε χώρους στους οποίους αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες, επειδή παρουσιάζει υψηλότερες αντοχές στη θερμότητα.

Ο πετροβάμβακας, όπως και ο υαλοβάμβακας, δεν πρέπει να τοποθετείται με γυμνά χέρια αλλά με γάντια λόγω μικρών τριμμάτων που μπορεί να αφήσουν οι ίνες του.

4.4.6. Το αφρώδες γυαλί

Είναι γνωστό και ως κυψελωτό γυαλί και εμφανίζεται διεθνώς με το συμβολισμό CG (cellular glass). Πρόκειται για υλικό ορυκτής προέλευσης με κυψελωτή δομή. Αποτελείται από πλήθος πολύ μικρών κυψελών ερμητικά κλειστών και ανεξάρτητων μεταξύ τους. Έχει ως βασικό υλικό παραγωγής την καθαρή άμμο και παρασκευάζεται με θερμική διεργασία αλεσμένου γυαλιού που έχει αναμειχθεί με άνθρακα. Στην Ελλάδα δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο ως θερμομονωτικό υλικό.

Στο εμπόριο κυκλοφορεί σε πλάκες μικρών διαστάσεων, με ενιαίο πάχος, που κυμαίνεται από 2,5 έως 12,0 cm ή με μεταβλητό πάχος για θερμομόνωση δωματίων, προκειμένου με την τοποθέτησή του να διαμορφωθούν οι απαραίτητες κλίσεις.

Το αφρώδες γυαλί είναι πρακτικά ασυμπίεστο υλικό και παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε θλίψη (600 έως 1200 kPa), Γι' αυτό και χρησιμοποιείται στη θερμομόνωση δαπέδων και άλλων επιφανειών, στα οποία ασκούνται υψηλά φορτία. Παρουσιάζει όμως ευαισθησία στα κρουστικά φορτία.

Το αφρώδες γυαλί είναι κατάλληλο για θερμική προστασία τοιχοποιίας με θερμομόνωση εξωτερικά ή στον πυρήνα, συνολικών όψεων εξωτερικά, τοιχίων υπόγειων χώρων, δωματίων, πλακών οροφής κάτω από στέγη και κεκλιμένης στέγης, δαπέδων σε επαφή ή όχι με το έδαφος.

Στις κατακόρυφες επιφάνειες το υλικό στερεώνεται με ισχυρά βύσματα και με ειδικές ελαστικές κόλλες ασφατικής βάσης. Σε δάπεδα και σε δώματα επικολλάται σε καθαρό υπόστρωμα με τη βοήθεια θερμής ή ψυχρής ασφάλτου.

Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του αφρώδους γυαλιού παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του αφρώδους γυαλιού.

Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Όχι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Όχι: (προσβάλλεται όμως από το υδροφθορικό οξύ)
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	Όχι
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Αντοχή από -260° έως 430°C
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	0,040 - 0,052 W/(m·K)
Απορρόφηση νερού	Μηδενική
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	$\mu = 100.000$
Αντοχή στη συμπίεση	Ναι
Μεταβολή διαστάσεων	Σχετική σταθερότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 1% σε συγκεκριμένες συνθήκες υπό παραμονή 48 ωρών.
Συμπεριφορά σε φωτιά	Άκαυστο

4.4.7. Το ξυλόμαλλο

Συμβολίζεται με τους χαρακτήρες WW (wood wool). Αποτελείται από ξυλώδεις ίνες, που έχουν αναμειχθεί και ορυκτοποιηθεί με τσιμέντο υψηλής αντοχής. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται το ξύλο και σε συγγενή προϊόντα προς το ξυλόμαλλο χρησιμοποιούνται ροκανίδια, άχυρα και άλλα φυτικά προϊόντα υπό μορφή ινών.

Το ξυλόμαλλο κυκλοφορεί στο εμπόριο σε δυο βασικούς τύπους:

- Απλές συμπαγείς πλάκες.
- Πλάκες τύπου σάντουιτς με εκατέρωθεν εξωτερικές στρώσεις ξυλόμαλλου και ενδιάμεση στρώση διογκωμένης πολυστερίνης ή πετροβάμβακα. Είναι προφανώς ελαφρότερες των συμπαγών πλακών και συνδυάζουν τις ιδιότητες του ξυλόμαλλου και της διογκωμένης πολυστερίνης ή του πετροβάμβακα.

Το ξυλόμαλλο είναι άοσμο, έχει χρώμα φαιό και εκτός από θερμομονωτικό θεωρείται και καλό ηχομονωτικό υλικό.

Το ξυλόμαλλο αποτελεί ένα από τα θερμομονωτικά υλικά με τις μεγαλύτερες αντοχές σε θλίψη με τιμές αντοχής από 1000 έως 1800 kPa. Μπορεί να παραλάβει χωρίς προβλήματα τόσο κατανεμημένα, όσο και μοναχικά φορτία χωρίς κίνδυνο παραμόρφωσης

Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του ξυλόμαλλου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του ξυλόμαλλου.

Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Ναι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Όχι
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	Όχι
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Ικανοποιητική
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	Πλάκες πάχους < 25 mm 0,150 W/(m·K) Πλάκες πάχους ≥ 25 mm 0,090-0,100 W/(m·K)
Απορρόφηση νερού	Ναι
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	$\mu = 2,0 - 5,0$
Αντοχή στη συμπίεση	Ναι
Μεταβολή διαστάσεων	Σταθερότητα
Συμπεριφορά σε φωτιά	Θεωρείται πυράντοχο μόνο με την επίχρισή του

Λόγω των υψηλών αντοχών του μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ξυλότυπος σε στοιχεία φέροντος οργανισμού και μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος να μην αφαιρεθεί, αλλά να παραμείνει ως θερμομονωτική στρώση. Προσφέρεται για τη θερμομονωτική προστασία όλων σχεδόν των δομικών στοιχείων, αρκεί να μην προσβάλλονται από την υγρασία. Προτιμάται κυρίως στη θερμομόνωση στοιχείων του φέροντος οργανισμού (αρκεί να μην προσβάλλονται από την υγρασία), στην εσωτερική θερμομόνωση οροφών μεγάλων χώρων, στους οποίους παραμένει ως εμφανές στοιχείο, σε πλάκες οροφής κάτω από στέγη και σε κεκλιμένες στέγες, στην εξωτερική θερμομόνωση υπόστυλων χώρων και ανοικτών διαβάσεων (πιλοτών), στη θερμομόνωση μεγάλων οριζόντιων και κατακόρυφων επιφανειών που πρέπει να επιχρισθούν, λόγω της καλής πρόσφυσης των επιχρισμάτων στο ξυλόμαλλο, σε χώρους, στους οποίους εκτός από θερμομονωτική απαιτείται και ηχητική προστασία.

Η επιφάνειά του μπορεί να επιχριστεί, να καλυφθεί με ταπετσαρία ή να μείνει ελεύθερη. Συνεργάζεται πολύ καλά σχεδόν με κάθε τύπο επιχρίσματος. Εφόσον βαφεί, ως υλικό βαφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κοινό διακοσμητικό υδατοδιαλυτό χρώμα.

4.4.8. Τα πορώδη θερμομονωτικά τούβλα

Πρόκειται για τούβλα στη μάζα των οποίων έχουν δημιουργηθεί πολλές μικρές κυψελίδες αέρα. Τα θερμομονωτικά τούβλα διαφέρουν από τα λοιπά θερμομονωτικά υλικά στο γεγονός ότι δεν χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικά υλικά για να προσδώσουν στην κατασκευή θερμική προστασία, αλλά ως κύρια δομικά υλικά που παρέχουν ταυτόχρονα και τη θερμική προστασία. Τα πορώδη θερμομονωτικά τούβλα παράγονται με την πρόσμειξη κόκκων διογκωτικού υλικού στη μάζα της αργίλου πριν ακόμη αυτή να ψηθεί. Με το ψήσιμο των τούβλων σε υψηλές τιμές θερμοκρασίας το διογκωτικό υλικό καίγεται και αφήνει στη μάζα της αργίλου κυψέλες με αέρα.

Δεν υπάρχουν κοινώς αποδεκτές προδιαγραφές για τις διαστάσεις των θερμομονωτικών τούβλων. Στο εμπόριο κυκλοφορούν σε πολλές διαστάσεις σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει η κάθε εταιρεία παραγωγής.

Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των πορωδών οπτοπλίνθων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των πορωδών οπτοπλίνθων.

Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Όχι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Όχι
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	Όχι
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Αντοχή σε παγετό και υψηλές θερμοκρασίες
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	$\lambda = 0,260 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ για πυκνότητα $\rho = 940 \text{ kg/m}^3$ *
Απορρόφηση νερού	Ναι
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	$\mu = 10$
Αντοχή στη συμπίεση	Ναι
Μεταβολή διαστάσεων	Σταθερότητα
Συμπεριφορά σε φωτιά	Άκαυστα
* Οι διάφορες εταιρείες παραγωγής πορωδών θερμομονωτικών οπτοπλίνθων δίνουν καλύτερες τιμές για τα προϊόντα τους. Πάντως για τον προσδιορισμό της θερμομονωτικής ικανότητας των τούβλων είναι προτιμότερο να λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής θερμοδιαφυγής $U_\lambda = \lambda/d$ (όπου d το πάχος του τούβλου) και όχι ένας θεωρητικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ του συμπαγούς μήματος. Έτσι, ο συντελεστής θερμοδιαφυγής U_λ για τους διάφορους τύπους που δίνουν οι κατασκευάστριες εταιρείες:	
• Για $d = 7,5 \text{ cm}$	$U_\lambda = 2,25 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
• Για $d = 10,0 \text{ cm}$	$U_\lambda = 1,71 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
• Για $d = 12,0 \text{ cm}$	$U_\lambda = 1,50 - 1,60 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
• Για $d = 18,0 \text{ cm}$	$U_\lambda = 0,98 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
• Για $d = 20,0 \text{ cm}$	$U_\lambda = 0,65 - 0,70 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
• Για $d = 22,5 \text{ cm}$	$U_\lambda = 0,63 - 0,69 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

Τα θερμομονωτικά τούβλα έχουν το χρώμα και τη μορφή των κοινών τούβλων. Είναι κατά 25% - 40% ελαφρότερα από τα κοινά διάτρητα τούβλα.

Τα πορώδη θερμομονωτικά τούβλα εμφανίζουν παρόμοιες μηχανικές αντοχές με τα συνηθισμένα τούβλα. Η αντοχή σε θλίψη φτάνει μέχρι τα 5.000 kPa. Εμφανίζουν εξαιρετική συμπεριφορά τόσο στην εφαρμογή μοναχικών φορτίων όσο και κατανεμημένων φορτίων.

Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εξωτερικών τοιχοποιιών πλήρωσης, χωρίς τη χρήση κάποιου πρόσθετου θερμομονωτικού υλικού. Σύμφωνα με τους παραγωγούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για κατασκευή φερουσών εξωτερικών τοιχοποιιών χαμηλών κτισμάτων. Ωστόσο, δεν συνιστάται η χρήση τους ως φερόντων δομικών στοιχείων.

Εσωτερικά και εξωτερικά επιχρίονται με όλα τα επιχρίσματα που εφαρμόζονται και στα κοινά τούβλα. Αυτό πάντως που θα πρέπει να προσέξει κανείς κατά την κατασκευή μιας τοιχοποιίας με θερμομονωτικά τούβλα είναι το συνδετικό τους κονίαμα που πρέπει να παρουσιάζει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ανάλογο αυτού των θερμομονωτικών τούβλων. Διαφορετικά οι μεταξύ τους αρμοί κινδυνεύουν να λειτουργήσουν ως θερμογέφυρες.

Τα θερμομονωτικά τούβλα λόγω του πορώδους της μάζας τους παρουσιάζουν μικρότερη θερμοχωρητικότητα έναντι των κοινών τούβλων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ικανότητα συσσώρευσης μικρότερης ποσότητας θερμότητας και αντίστοιχα επαναπόδοσής της μέσα στο χώρο όταν θα διακοπεί η λειτουργία της θέρμανσης.

4.4.9. Οι ελαφροβαρείς τσιμεντόλιθοι

Οι ελαφροβαρείς τσιμεντόλιθοι, ή ελαφροτσιμεντόλιθοι, είναι τεχνητοί δομικοί λίθοι από αφρώδες σκυρόδεμα που παράγονται με υδροθερμική κατεργασία και χρησιμοποιούνται στη δόμηση, κυρίως για την κατασκευή τοιχοποιιών. Θεωρούνται υλικά φιλικά προς το περιβάλλον, δεδομένου ότι οι πρώτες ύλες παραγωγής τους προέρχονται στο σύνολό τους από ανόργανα υλικά.

Οι τσιμεντόλιθοι είναι τεχνητοί λίθοι σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με μεγάλου εύρους διαστάσεις, που καθορίζεται από την κάθε εταιρεία παραγωγής.

Στο εργοτάξιο μπορεί να επιτευχθεί οποιοδήποτε μέγεθος καθώς οι ελαφροτσιμεντόλιθοι μπορούν να κοπούν και να τεμαχιστούν εύκολα με ειδικό πριόνι στην επιθυμητή διάσταση. Εξίσου εύκολα μπορούν να ανοιχθούν οπές στη μάζα τους ή κανάλια για τη διέλευση σωληνώσεων υδραυλικών ή ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών εγκαταστάσεων. Οι ελαφροτσιμεντόλιθοι έχουν συνήθως ανοικτό γκριζο ή υπόλευκο χρώμα, μπορούν όμως να αποκτήσουν και οποιοδήποτε άλλο χρώμα με ανάμειξη στη μάζα παραγωγής του επιθυμητού χρώματος.

Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των ελαφροτσιμεντόλιθων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των ελαφροβαρών τσιμεντόλιθων.

Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Όχι
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Όχι
Προσβολή από την ηλιακή ακτινοβολία	Όχι
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	- Ελαφροβαρείς τσιμεντόλιθοι Για $\rho = 400 - 800 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,110 - 0,220 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ - Διάτρητες πλίνθοι από κυψελωτό σκυρόδεμα Για $\rho = 600 - 1600 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,350 - 1,000 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ - Κισηρόλιθοι Για $\rho = 500 - 800 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,170 - 0,260 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Απορρόφηση νερού	Ναι
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	$\mu = 3,0-10,0$
Αντοχή στη συμπίεση	Ναι
Μεταβολή διαστάσεων	Σταθερότητα
Συμπεριφορά σε φωτιά	Άκαυστο

Οι αντοχή σε θλίψη είναι πολύ μεγάλη, τόσο σε κατανεμημένα όσο και σε μοναχικά φορτία. Η θλιπτική τους αντοχή βρίσκεται στην περιοχή των 2.500 έως 5.000 kPa, ανάλογα με τον τύπο του υλικού.

Οι ελαφροτσιμεντόλιθοι βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή τοιχοποιιών παντός είδους κτιριακών κατασκευών τόσο του εξωτερικού τους κελύφους, όσο και των εσωτερικών διαχωριστικών τους τοίχων. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην κατασκευή άλλων στοιχείων του κτηρίου όπως κλιμάκων, οροφών, στεγών κτλ. Αν και οι εταιρείες παραγωγής, προτείνουν υπό προϋποθέσεις τη χρήση των ελεφροτσιμεντόλιθων και ως φερόντων στοιχείων σε μικρές και χαμηλές κατασκευές, η συμμετοχή τους στο φέροντα οργανισμό είναι καλύτερα να αποφεύγεται.

Οι ελαφροτσιμεντόλιθοι θεωρούνται υλικά με μικρή θερμοχωρητικότητα αλλά με καλές ηχομονωτικές ιδιότητες, καθώς το μεγάλο πορώδες τους επιτρέπει την απορρόφηση και την ανάκλαση του ήχου.

Η τοιχοποιία από ελαφροτσιμεντόλιθους μπορεί να παραμείνει ανεπίχριστη ή να επιχριστεί. Η ανεπίχριστη τοιχοποιία μπορεί να σπατουλαριστεί ή/και να βαφεί με συνήθη χρώματα. Συνήθως όμως η τοιχοποιία επιχρίεται με κονίαμα που κατά προτίμηση θα πρέπει να είναι υδαταπωθητικό και να προστατεύει κατά το δυνατόν την τοιχοποιία από τα νερά της βροχής.

4.4.10. Ο φελλός

Ο φελλός ανήκει στην κατηγορία των φυσικών θερμομονωτικών υλικών και αποτελεί ένα από τα παλαιότερα μονωτικά υλικά με χρήση τόσο στη θερμική, όσο και στην ηχητική προστασία των κατασκευών. Καθώς για την παραγωγή του δεν απαιτείται η κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, έχει μικρή ποσότητα ενσωματωμένης ενέργειας και θεωρείται υλικό φιλικό προς το περιβάλλον.

Στο εμπόριο κυκλοφορεί: υπό μορφή κοκκώδους φελλού και πλακών ή σανίδων.

- Υπό κοκκώδη μορφής που προέρχεται από την απόξεση και την επεξεργασία του ακατέργαστου φελλού.
- Υπό μορφή πλακών σκληρής μορφής που προέρχονται από τη διόγκωση του κοκκώδους φελλού σε θερμοκρασία περίπου 400°C και υπό πίεση με συγκόλληση των κόκκων του.

Σπανιότερα συναντάται επίσης και υπό μορφή ανοικτών «κογχυλίων» (σωληνωτή μορφή) για τη μόνωση σωληνώσεων.

Συναντάται στο εμπόριο στο φυσικό του χρώμα, ωστόσο δίνεται η δυνατότητα χρωματισμού του με ειδικές βαφές.

Οι κυριότερες φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του φελλού παρουσιάζονται στον πίνακα 4.10.

Πίνακας 4.10. Οι φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του φελλού.

Προσβολή από έντομα / πουλιά / τρωκτικά	Προσβάλλεται από ορισμένες μόνο κατηγορίες εντόμων)
Προσβολή από χημικούς διαλύτες	Ναι
Συμπεριφορά στη θερμότητα	Αντοχή από -200°C έως +130°C
Θερμική αγωγιμότητα (σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010)	Σκληρά πλακίδια 0,065 W/(m•K) Φύλλα και πλάκες 0,042 - 0,046 W/(m•K).
Απορρόφηση νερού	Αδιάβροχο
Αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών	Σκληρά πλακίδια $\mu = 40$ Φύλλα και πλάκες $\mu = 10 - 30$
Αντοχή στη συμπίεση	Ικανοποιητική
Μεταβολή διαστάσεων	Σταθερότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 0,5% σε συγκεκριμένες συνθήκες υπό παραμονή 48 ωρών.
Συμπεριφορά σε φωτιά	Καίγεται δύσκολα.

Ο φελλός αποτελεί συμπίεσιμο υλικό, το οποίο όμως με την απομάκρυνση του φορτίου μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 13170, οι ελάχιστη αντοχή σε θλίψη για 10% παραμόρφωση βρίσκεται στην περιοχή 90 έως 110 kPa.

Η χρήση του φελλού στην Ελλάδα δεν είναι πολύ διαδεδομένη, κυρίως λόγω υψηλού κόστους. Έτσι, δεν παρατηρείται ευρεία χρήση του ως θερμομονωτικού υλικού. Αντιθέτως, λόγω των ηχομονωτικών του ιδιοτήτων επιλέγεται κυρίως ως ηχομονωτικό υλικό και παράλληλα λειτουργεί και ως θερμομονωτικό.

Οι πιο κοινές εφαρμογές μόνωσης είναι σε μονωμένα συστήματα επικάλυψης, και κυρίως ως τελική επικάλυψη τοιχοποιιών και δαπέδων λόγω του καλού αισθητικού αποτελέσματος που δίνει. Και στις δύο περιπτώσεις αξιοποιείται η σταθερότητα διαστάσεων του φελλού, η ελαστικότητά του και η αντίστασή του στη συμπίεση.

4.4.11. Άλλα φυσικά θερμομονωτικά υλικά

Στα θερμομονωτικά υλικά φυτικής και ζωικής προέλευσης μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν προϊόντα που προέρχονται από άλλες φυσικές ύλες. Στο σύνολό τους αυτά τα υλικά θεωρούνται ανακυκλώσιμα και βιοδιασπώμενα. Ωστόσο δύσκολα συναντώνται στην ελληνική αγορά. Αλλά και στο εξωτερικό, εκτός από ορισμένες περιπτώσεις, δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα.

4.4.11.1. Η κυτταρίνη

Είναι υλικό που προέρχεται από την ανακύκλωση του χαρτιού. Παράγεται από απορρίμματα χαρτιών, που δέχονται κατάλληλη επεξεργασία προκειμένου να καταστούν κατά το δυνατόν ανθεκτικά έναντι της φωτιάς και απρόσβλητο από μύκητες και έντομα.

Στην ελληνική αγορά δεν συναντάται εύκολα. Σε άλλες χώρες διατίθεται σε δύο μορφές:

- σε μη μορφοποιημένη μορφή, που διαστρώνεται ελεύθερα ή με ψεκασμό,
- σε μορφή πλακών.

Αποτελεί συμπίεσιμο υλικό και δεν παρουσιάζει σημαντική αντοχή σε θλίψη.

Σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι:

- για τη χαλαρή ινώδη μορφή του $\lambda = 0,040 - 0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- για τη συμπαγή κολλώδη μορφή του $\lambda = 0,040 - 0,060 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Προσφέρεται κυρίως για τη θερμική προστασία οριζόντιων οροφών κάτω από μη θερμομονωμένες στέγες είτε στη χύμα μορφή του είτε υπό μορφή πλακών. Μπορεί πάντως να τοποθετηθεί και σε τοιχοποιίες, είτε στον πυρήνα ανάμεσα σε δύο κελύφη, είτε ως εσωτερική θερμομόνωση που θα επικαλυφθεί με υλικά ξηρής δόμησης υπό την προϋπόθεση ότι η τοιχοποιία δεν κινδυνεύει να προσβληθεί από την υγρασία.

4.4.11.2. Το μαλλί προβάτου

Είναι φυσικό προϊόν που παράγεται κατά κύριο λόγο από το φυσικό μαλλί του προβάτου, είτε από ανακύκλωση είτε από νέο μαλλί με κουρά του ζώου. Για τη διαμόρφωσή του δέχεται επεξεργασία με πολυεστερικές ρητίνες, που το καθιστούν ανθεκτικό έναντι της φωτιάς και της προσβολής από έντομα. Θεωρείται φιλικό προς το περιβάλλον, αν και οι πολυεστερικές ρητίνες και οι βιοκτόνες ενώσεις που περιέχει δεν είναι ανανεώσιμα υλικά.

Αποτελεί συμπίεσιμο υλικό χωρίς ιδιαίτερες αντοχές σε θλίψη.

Σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι $\lambda = 0,040 - 0,050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Στην Ελλάδα η χρήση του ως μονωτικού υλικού είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη μόνωση οροφών κάτω από μη θερμομονωμένη στέγη ή

και των ίδιων των κεκλιμένων επιπέδων των στεγών. Διαστρώνεται επάνω στην πλάκα ή τοποθετείται ανάμεσα στα ξύλινα στοιχεία της στέγης. Οφείλει πάντα να προστατεύεται από την υγρασία.

4.4.11.3. Η κάνναβη

Είναι ινώδες υλικό και προέρχεται από ένα είδος κάνναβης με χαμηλή περιεκτικότητα σε τετραϋδροκανναβινόλη, που είναι ψυχοτρόπο συστατικό της κάνναβης. Για τη σύνδεση των ινών χρησιμοποιούνται πολυεστερικά υλικά, που προσδίδουν επίσης στο προϊόν σταθερότητα και ικανότητα αντίστασης στη φωτιά. Παρουσιάζει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 0,038 - 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. προσβάλλεται από την υγρασία και γι' αυτό πρέπει να προστατεύεται.

Είναι ακριβότερο υλικό σε σύγκριση με άλλα φυσικά προϊόντα της δικής του κατηγορίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως θερμομονωτικό όσο και ως ηχομονωτικό υλικό σε κατακόρυφα και οριζόντια δομικά στοιχεία. Προτιμάται ωστόσο κυρίως για τη μόνωση οροφών κάτω από μη θερμομονωμένη στέγη ή και των ίδιων των κεκλιμένων επιπέδων των στεγών.

4.4.11.4. Το λινάρι

Προέρχεται από τις ίνες του μίσχου του φυτού του λιναριού, που δέχεται επεξεργασία, προκειμένου να καταστεί ανθεκτικό απέναντι σε έντομα και ζώδια και στην επίδραση της φωτιάς.

Είναι φυσικό προϊόν και αν εξαιρεθούν οι ουσίες που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση των ινών του, θεωρείται ανανεώσιμο, ανακυκλώσιμο και βιοδιασπώμενο υλικό. Σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 παρουσιάζει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 0,038 - 0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Όπως και τα προηγούμενα υλικά φυτικής και ζωικής προέλευσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θερμική προστασία τόσο των οριζόντιων όσο και των κατακόρυφων δομικών στοιχείων, αρκεί αυτά να μην προσβάλλονται από την υγρασία. Προτιμάται, ωστόσο, και στις δύο μορφές του (πάπλωμα και πλάκες) για τη θερμομόνωση οριζόντιων πλακών κάτω από μη θερμομονωμένη στέγη και κεκλιμένων στεγών.

4.5. Η ΘΕΡΜΟΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ

Είναι υλικά που έχουν την ικανότητα να ανακλούν την προσπίπτουσα επί της επιφάνειάς τους ακτινοβολία. Συνήθως συντίθενται από τρεις τουλάχιστον επάλληλες στρώσεις. Η κεντρική αποτελείται από κάποιο συνθετικό υλικό που σχηματίζει κλειστές κυψελίδες με αέρα (φυσαλίδες) και εκατέρωθεν έχει μια στρώση με υψηλή ανακλαστικότητα. Ως ανακλαστικό υλικό χρησιμοποιείται κυρίως το φύλλο αλουμινίου, του οποίου η ανακλαστικότητα φθάνει το 95% - 97%.

Τα θερμοανακλαστικά υλικά συνδυάζουν την ικανότητά τους να αντιδρούν τόσο στη μετάδοση της θερμότητας με αγωγιμότητα όσο και με ακτινοβολία.

Έτσι, οι θερμοανακλαστικές επιφάνειες λειτουργούν προς διπλή κατεύθυνση:

- Το καλοκαίρι παρεμποδίζουν την απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας από τη μάζα του υλικού και την επανεκπέμπουν προς το εξωτερικό περιβάλλον.
- Το χειμώνα παρεμποδίζουν τη ροή της μεταδιδόμενης θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το εξωτερικό περιβάλλον και την επανεκπέμπουν προς τον εσωτερικό χώρο.

Τα θερμοανακλαστικά υλικά, προκειμένου να λειτουργήσουν αποτελεσματική, πρέπει μπροστά από την ανακλαστική τους επιφάνεια να έχουν ένα λεπτό στρώμα αέρα, μέσω του οποίου ανακλάται προς την ανακλαστική επιφάνεια η μεταδιδόμενη θερμότητα και από αυτήν επαναανακλάται προς τα πίσω.

Η προβαλλόμενη αντίσταση από ένα θερμοανακλαστικό υλικό παρέχεται από τον παραγωγό και στην τιμή της συμπεριλαμβάνεται και η αντίσταση του εκατέρωθεν ευρισκόμενου πάχους αέρα (περίπου 1,0 - 1,5 cm). Η τιμή της θερμικής αντίστασης είναι διαφορετική για οριζόντια ροή θερμότητας (κατακόρυφη θέση του δομικού στοιχείου) και διαφορετική για κατακόρυφη ροή θερμότητας προς τα επάνω (οροφή) ή προς τα κάτω (δάπεδο). Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Κ.Εν.Α.Κ. πρέπει να συνοδεύεται από σχετικό πιστοποιητικό διαπιστευμένου προς αυτό το σκοπό εργαστηρίου.

Τα θερμοανακλαστικά υλικά μπορούν να βρουν πεδίο εφαρμογής στα περισσότερα δομικά στοιχεία των κτιριακών κατασκευών: στο δώμα, στην τοιχοποιία πλήρωσης, σε δικέλυφη αεριζόμενη τοιχοποιία, σε δάπεδα κ.ά.

Οι σχετικές τιμές δίνονται στον πίνακα 4.11. Προϋπόθεση για να ισχύουν οι τιμές του πίνακα είναι:

- η στρώση του αέρα που βρίσκεται εγκλωβισμένη μέσα στο δομικό στοιχείο, να μην επικοινωνεί με το εξωτερικό ή εσωτερικό περιβάλλον και
- η στρώση του αέρα να έχει πάχος μικρότερο του 1/10 εκάστης των άλλων δύο διαστάσεων και πάντως όχι μεγαλύτερο των 30 cm.

Πίνακας 4.11. Η τιμή θερμικής αντίστασης μη αεριζόμενου στρώματος αέρα, ευρισκόμενου πρακτικά σε κατάσταση ηρεμίας για οριζόντια και κατακόρυφη ροή θερμότητας και με ανακλαστική επιφάνεια στη μια πλευρά του διακένου σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 για τρεις διαφορετικές τιμές εκπεμπτικότητας της ανακλαστικής μεμβράνης ($\varepsilon = 0,05, 0,10$ και $0,20$)).

Πάχος ακίνητης στρώσης αέρα	Εκπεμπτικότητα $\varepsilon = 0,05$			Εκπεμπτικότητα $\varepsilon = 0,10$			Εκπεμπτικότητα $\varepsilon = 0,20$		
	Οριζόντια ροή	Ροή από κάτω προς τα άνω	Ροή από άνω προς τα κάτω	Οριζόντια ροή	Ροή από κάτω προς τα άνω	Ροή από άνω προς τα κάτω	Οριζόντια ροή	Ροή από κάτω προς τα άνω	Ροή από άνω προς τα κάτω
mm	m ² ·K/W	m ² ·K/W	m ² ·K/W	m ² ·K/W	m ² ·K/W	m ² ·K/W	m ² ·K/W	m ² ·K/W	m ² ·K/W
5	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17
7	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,22	0,22	0,22
10	0,36	0,36	0,36	0,33	0,33	0,33	0,29	0,29	0,29
15	0,52	0,45	0,52	0,46	0,41	0,46	0,38	0,34	0,38
25	0,67	0,45	0,80	0,57	0,41	0,66	0,44	0,34	0,50
50	0,67	0,45	0,80	0,57	0,41	0,66	0,44	0,34	0,67
100	0,67	0,45	0,80	0,57	0,41	0,66	0,44	0,34	0,75
300	0,67	0,45	0,80	0,57	0,41	0,66	0,44	0,34	0,75

5. ΚΟΥΦΩΜΑΤΑ

5.1. ΤΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΚΟΥΦΩΜΑΤΑ

5.1.1. Κουφώματα και υαλοπετάσματα .

Τα εξωτερικά κουφώματα και υαλοπετάσματα αποτελούν ολοκληρωμένα δομικά στοιχεία που συμπληρώνουν τα ανοίγματα των τοίχων στις όψεις των κτηρίων. Ως στοιχεία του εξωτερικού κτιριακού περιβλήματος πρέπει να ικανοποιούν τις γενικότερες απαιτήσεις προστασίας των εσωτερικών χώρων από τις εξωτερικές επιδράσεις (θερμοκρασιακές μεταβολές, βροχή, χιόνι, άνεμο, θόρυβο, σκόνη) και επιπλέον να εξασφαλίζουν την επιθυμητή οπτική, ακουστική και γενικότερη επικοινωνία και κίνηση ανάμεσα στο εσωτερικό των κτηρίων και στο εξωτερικό περιβάλλον και να επιτρέπουν τον φυσικό φωτισμό, τον ηλιασμό και τον αερισμό των χώρων. Τέλος, αποτελούν σημαντικό χαρακτηριστικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής πρότασης του κτηρίου.

Τα **εξωτερικά κουφώματα** (παράθυρα, εξωστόθυρες / μπαλκονόπορτες, εξώθυρες) προσφέρουν το σύνολο ή μέρος των παραπάνω λειτουργιών και τοποθετούνται σε μεμονωμένα ανοίγματα των όψεων των κτηρίων, καταλαμβάνοντας μικρά κατά κανόνα ποσοστά της συνολικής επιφάνειας των εξωτερικών τοίχων. Τα κύρια κατασκευαστικά μέρη ενός κουφώματος είναι το σταθερό πλαίσιο (κάσα) –που προσαρμόζεται μόνιμα στο οικοδομικό άνοιγμα– και τα κινητά φύλλα. Τα τελευταία είτε είναι αδιαφανή στοιχεία (π.χ. φύλλα πόρτας) είτε αποτελούνται από πλαίσια που δέχονται υαλοπίνακες (υαλοστάσια / τζαμιλίκια) ή/και αδιαφανή στοιχεία. Σπανιότερες είναι οι μορφές των σταθερών κουφωμάτων (χωρίς κινητό τμήμα) και των κουφωμάτων χωρίς κάσα (όπως υαλοπίνακες ή υαλόθυρες) που προσαρμόζονται κατευθείαν στο άνοιγμα.

Τα **υαλοπετάσματα** εντάσσονται στα μικρού βάρους, μη φέροντα, τοιχοπετάσματα, στα οποία κυριαρχούν τα διαφανή στοιχεία πλήρωσης. Καταλαμβάνουν το ύψος μεταξύ τουλάχιστον δύο ορόφων, διαμορφώνοντας μεγάλα τμήματα όψεων ή και ολόκληρες όψεις. Τα υαλοπετάσματα κατασκευάζονται με τη μορφή πλαισίου από μέταλλο, ξύλο συνθετικό υλικό ή συνδυασμούς τους. Το σκελετό του συνολικού δομικού στοιχείου συνθέτουν κατακόρυφα και οριζόντια μέλη (ορθοστάτες και τραβέρσες) που συνδέονται μεταξύ τους και αγκυρώνονται στο φέροντα οργανισμό, εκπληρώνοντας σε συνεργασία με στοιχεία πλήρωσης της κατασκευής (παράθυρα, αδιαφανή τμήματα - ποδιές, ηλιοπροστατευτικές διατάξεις κ.τ.λ.) όλες τις λειτουργίες ενός εξωτερικού στοιχείου, χωρίς να συμμετέχουν στη φέρουσα λειτουργία του κτηρίου. Στη σύγχρονη οικοδομική πρακτική τα εξωτερικά κουφώματα και τα υαλοπετάσματα αναπτύσσονται ως ολοκληρωμένα πιστοποιημένα προϊόντα που παράγονται σε εξειδικευμένες μονάδες παραγωγής και έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν τις ποικίλες και διαφοροποιημένες απαιτήσεις του πεδίου των κτιριακών εφαρμογών, ανάμεσα στις οποίες οι απαιτήσεις για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων έχουν βαρύνουσα σημασία.

5.1.2. Χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες που προσδιορίζουν την ενεργειακή απόδοση των κουφωμάτων και υαλοπετασμάτων

Γενικά, κάτω από το πρίσμα της εξοικονόμησης ενέργειας, τα κουφώματα & τα υαλοπετάσματα θα πρέπει:

- Σε κλιματικές συνθήκες που απαιτούν θέρμανση (δηλ. τη χειμερινή περίοδο) να συμβάλλουν στη μείωση των θερμικών απωλειών, με εξασφάλιση της δυνατότητας επαρκούς αερισμού των εσωτερικών χώρων και να μεγιστοποιούν τα ηλιακά κέρδη, ώστε να αντισταθμίζονται ή ακόμη και να υπερκαλύπτονται οι θερμικές τους απώλειες,
- Σε κλιματικές συνθήκες που απαιτούν ψύξη (δηλ. τη θερινή περίοδο) να συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση του θερμικού κέρδους και τη συνεπακόλουθη μείωση των ψυκτικών φορτίων,

ενώ ταυτόχρονα να εξυπηρετούν την απομάκρυνση της θερμότητας μέσω φυσικού αερισμού και παθητικού δροσισμού.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες που προσδιορίζουν την ενεργειακή απόδοση των κουφωμάτων και υαλοπετασμάτων εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τις τιμές δύο συντελεστών:

- Του συντελεστή θερμοπερατότητας του στοιχείου (U_w [$W/(m^2 \cdot K)$]) για τα κουφώματα / U_{cw} [$W/(m^2 \cdot K)$] για τα υαλοπετάσματα).
- Του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους του στοιχείου (g_w).

A. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του στοιχείου αντιπροσωπεύει το βαθμό της ροής θερμότητας διά μέσου του δομικού στοιχείου, του κουφώματος ή υαλοπετάσματος και την ικανότητα του να μειώνει τις θερμικές απώλειες των εσωτερικών χώρων. Μικρότερες τιμές του σημαίνουν αυξημένο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας. Με δεδομένο ότι στην κατασκευή του στοιχείου συμμετέχουν πλαίσιο και υαλοπίνακες, ο συντελεστής U_w αποτελεί στην ουσία ένα μέσο συντελεστή, που συντίθεται από τους επί μέρους συντελεστές U_f του πλαισίου και U_g του υαλοπίνακα, σε αναλογία που προσδιορίζεται από ποσοστό συμμετοχής της κάθε μιας από τις επιφάνειες πλαισίου και υαλοπινάκων στη συνολική επιφάνεια του στοιχείου. (βλ. παρ. 2.2., 2.3. και πίνακες 10α, 10β, 10γ, 11, 12 στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων»). Στη συνολική απόδοση του στοιχείου θα πρέπει να συνυπολογίζεται και ο συντελεστής Ψ_g των γραμμικών απωλειών εξαιτίας θερμογεφυρών διά μέσου του περιγράμματος επαφής υαλοπίνακα - πλαισίου, ενώ για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή θα πρέπει να υπεισέρχεται και ο αντίστοιχος συντελεστής που χαρακτηρίζει τις απώλειες εξαιτίας θερμογεφυρών διά μέσου του περιγράμματος επαφής του ολοκληρωμένου στοιχείου με το οικοδομικό άνοιγμα. (βλ. παρ. 3.2.7. και πίνακες 3.16. και 3.17. στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 «Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης»).

Σημειώνεται ότι υψηλές τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας των κουφωμάτων και υαλοπετασμάτων δεν υπογραμμίζουν μόνο τη μειωμένη θερμομονωτική ικανότητα του κάθε στοιχείου, αλλά δηλώνουν και τον κίνδυνο δημιουργίας ζωνών με χαμηλές θερμοκρασίες στις αντίστοιχες περιοχές του εσωτερικού των χώρων, για περιόδους με χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες (χειμερινή περίοδος, ψυχρά κλίματα), με επιπτώσεις στη θερμική άνεση.

B. Ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους του στοιχείου (g_w) εκφράζει τη μέση τιμή του λόγου της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά την επιφάνειά του κουφώματος ή του υαλοπετάσματος προς το σύνολο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην ίδια επιφάνεια. Λαμβάνεται ίση με το 90% του συντελεστή ηλιακού κέρδους g , σε κάθετη πρόσπτωση και πρακτικά αντιπροσωπεύει την ικανότητά του δομικού στοιχείου να μεταφέρει τη θερμότητα που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία στους εσωτερικούς χώρους. (βλ. πίνακες 13, 14α, 14β, 14γ, 14δ στο Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων»).

Οι τιμές του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους του κουφώματος g_w διαμορφώνονται καθοριστικά από το συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους g_{gl} των υαλοπινάκων, ενώ επηρεάζονται από το ποσοστό συμμετοχής της επιφάνειας του πλαισίου στη συνολική επιφάνεια του στοιχείου, γεγονός που σημαίνει ότι κουφώματα ίδιων διαστάσεων με υαλοπίνακες με ίδια χαρακτηριστικά, μπορούν, ανάλογα με το πλάτος του πλαισίου τους, να έχουν διαφορετικούς συντελεστές. Οι τιμές του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Μεγαλύτερες τιμές του σημαίνουν μεγαλύτερες ποσότητες αξιοποιήσιμων θερμικών ηλιακών κερδών που προσφέρει το κούφωμα ή το υαλοπέτασμα, με συνέπεια στοιχεία με μεγαλύτερες τιμές να είναι επιθυμητά σε κλιματικές συνθήκες

που απαιτούν θέρμανση, ενώ αντίθετα για κλιματικές συνθήκες που κυριαρχούν απαιτήσεις ψύξης να προτιμώνται στοιχεία με μικρότερες τιμές, ώστε να μειώνονται οι απαιτήσεις των ψυκτικών φορτίων.

Ο συντελεστής διαπερατότητας του στοιχείου στο φυσικό φως (TV). Αντιπροσωπεύει την ικανότητα του κουφώματος ή του υαλοπετάσματος να μεταφέρει το φυσικό ηλιακό φως στους εσωτερικούς χώρους και ως εκ τούτου έχει έμμεση επίπτωση στην ενεργειακή του απόδοση, καθόσον όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές του τόσο μεγαλύτερες είναι και οι ποσότητες φυσικού φωτός που μεταφέρει το κούφωμα ή το υαλοπέτασμα και συνεπώς τόσο μικρότερη η ανάγκη για συμπληρωματικό τεχνητό φωτισμό. Καθορίζεται από τον αντίστοιχο συντελεστή διαπερατότητας των υαλοπινάκων και εξαρτάται από τη σχέση των επιφανειών τους προς τη συνολική επιφάνεια του κάθε στοιχείου, κουφώματος ή υαλοπετάσματος, γεγονός που στη πράξη σημαίνει ότι στοιχεία ίδιων διαστάσεων με ίδιους υαλοπίνακες μπορεί, ανάλογα με το πλάτος του πλαισίου τους, να έχουν διαφορετικούς συντελεστές διαπερατότητας στο φυσικό φως. Συναφές πρόσθετο χαρακτηριστικό, που φανερώνει τη δυνατότητα ενός κουφώματος να προσφέρει ποσότητες φυσικού φωτός στο χώρο αποτελεί ο δείκτης DP (δυναμικό φυσικού φωτισμού - Daylight Potential κατά ISO 18292), που εξαρτάται από το συντελεστή διαπερατότητας του στοιχείου στο φυσικό φως (TV), τη σχέση του μεγέθους της επιφάνειας του υαλοπίνακα προς τη συνολική του κουφώματος και το συντελεστή θέας ουρανού του υαλοπίνακα.

Συνοπτικά, με βάση τα παραπάνω, σημειώνεται ότι:

- Για κτήρια στα οποία η θέρμανση αποτελεί προτεραιότητα, οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας U_w των κουφωμάτων και υαλοπετασμάτων θα πρέπει να είναι οι μικρότερες δυνατές και οι τιμές του συντελεστή θερμικού κέρδους ηλιακής ακτινοβολίας g οι υψηλότερες δυνατές.
- Για κτήρια στα οποία προτεραιότητα έχει η ψύξη, οι τιμές του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (g_w), θα πρέπει να είναι οι χαμηλότερες δυνατές, με πρόνοια για την εξασφάλιση ικανοποιητικών επιπέδων διαπερατότητας στο φυσικό φως.
- Για κτήρια που απαιτούν και θέρμανση και ψύξη, η χρήση κουφωμάτων και υαλοπετασμάτων με χαμηλές τιμές τόσο του συντελεστή θερμοπερατότητας U_w , όσο και του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (g_w), εξοικονομούν ενέργεια. Στην ίδια περίπτωση, εφόσον χρησιμοποιηθούν στοιχεία σκίασης, θα πρέπει να επιλέγονται υψηλές τιμές του (g_w), σε συνδυασμό με χαμηλές τιμές του U_w .

Σε πολλές περιπτώσεις η βέλτιστη λύση οδηγεί στην επιλογή στοιχείων με διάφορους συντελεστές για διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς:

- Σε ψυχρά κλίματα, θα πρέπει να επιλέγεται η τοποθέτηση στοιχείων με χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας U_w στο βορρά και στοιχείων με υψηλό συντελεστή κέρδους ηλιακής ακτινοβολίας (g_w), στο νότο.
- Σε θερμά κλίματα, στα οποία η υπερθέρμανση αποτελεί σημαντικό και συνηθισμένο πρόβλημα, επιδιώκεται η επιλογή στοιχείων που εξασφαλίζουν υψηλή διαπερατότητα στην ορατή ακτινοβολία (που σημαίνει ανεμπόδιο φυσικό φωτισμό), ενώ εμποδίζουν την είσοδο της ανεπιθύμητης, εκτός του ορατού φάσματος, θερμικής κυρίως ακτινοβολίας.

5.1.3. Υλικά. Πλαίσια και υαλοπίνακες

Το βασικό υλικό κατασκευής του πλαισίου, κουφώματος και φύλλων, αποτελεί το κριτήριο κατηγοριοποίησης των κουφωμάτων σε ξύλινα, μεταλλικά, συνθετικά και μεικτά / σύνθετα κουφώματα. Ειδικότερα στα μεταλλικά κουφώματα, η διαμόρφωση της διατομής του πλαισίου σε δύο τμήματα που

συνδέονται μεταξύ τους σε λειτουργικά ενιαίο και άκαμπτο στοιχείο, αλλά διαχωρίζονται θερμικά με τοποθέτηση κατάλληλου υλικού (που συνήθως πρόκειται για οπλισμένο με ίνες γυαλιού πολυαμίδιο), τα διακρίνει σε κουφώματα με θερμοδιακοπή ή χωρίς θερμοδιακοπή.

Ο αριθμός των κινητών φύλλων των κουφωμάτων τα διαχωρίζει σε μονόφυλλα, δίφυλλα κτλ., ενώ με κριτήριο τον τρόπο λειτουργίας των κινητών φύλλων κατατάσσονται σε:

- ανοιγόμενα (περί κατακόρυφο άξονα –στο άκρο ή στο μέσο–, περί οριζόντιο άνω άξονα, περί οριζόντιο κάτω άξονα, περί οριζόντιο μεσαίο άξονα, περί κατακόρυφο & οριζόντιο άξονα, με παράλληλη ως προς την κάσα κίνηση του φύλλου),
- συρόμενα (συρόμενα επάλληλα, συρόμενα με σταθερά φύλλα, συρόμενα σε διάκενο της εξωτερικής τοιχοποιίας, ανασυρόμενα καθ' ύψος),
- σε πτυσσόμενα και
- σε μεικτές μορφές.

Τα πλαίσια στα σύγχρονα κουφώματα και υαλοπετάσματα κατασκευάζονται από ξύλο, αλουμίνιο, χάλυβα, συνθετικά υλικά ή και συνδυασμούς αυτών των υλικών. Η θερμομονωτική ικανότητα του κάθε πλαισίου εξαρτάται τόσο από το υλικό κατασκευής, όσο και τη διαμόρφωση της διατομής του. Η εφαρμογή πλαισίων με χαμηλό συντελεστή θερμοδιαπερατότητας επιτυγχάνει χαμηλότερες τιμές στις θερμικές απώλειες και στις ενεργειακές καταναλώσεις και αύξηση των θερμοκρασιών στις εσωτερικές επιφάνειες των πλαισίων (όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1.), γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για τη θερμική άνεση σε περιπτώσεις με χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες. Η συμμετοχή της επιφάνειας των πλαισίων στη συνολική επιφάνεια του στοιχείου είναι –ιδιαίτερα στα μικρότερου μεγέθους κουφώματα– σημαντική με αποτέλεσμα η θερμομονωτική ικανότητα του κάθε πλαισίου να επηρεάζει ανάλογα τη θερμομονωτική και ενεργειακή συμπεριφορά του κουφώματος ή υαλοπετάσματος. Πλαίσια με κακή θερμομονωτική συμπεριφορά υποβαθμίζουν σημαντικά τα ενεργειακά κέρδη που προσφέρουν οι ενεργειακά αποδοτικοί υαλοπίνακες (βλ. πίνακα 3.12. στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 «Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης»). Είναι σαφές ότι για να αξιοποιηθεί η εφαρμογή των σύγχρονων υψηλής ενεργειακής απόδοσης υαλοπινάκων στα κουφώματα και τα υαλοπετάσματα, απαιτούνται ανάλογες βελτιωμένες αποδόσεις και από τα πλαίσια. Το υλικό κατασκευής των πλαισίων καθορίζει εκτός από τη θερμομονωτική συμπεριφορά τους και άλλα χαρακτηριστικά με ιδιαίτερη σημασία για τη λειτουργία των κουφωμάτων και των υαλοπετασμάτων και την αντοχή τους στη διάρκεια της ζωής τους. Στον πίνακα 5.2. αξιολογούνται πλαίσια από διάφορα υλικά και βαθμολογούνται οι επιδόσεις τους με βάση γενικότερα κριτήρια επιλογής.

Οι υαλοπίνακες αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας των τυπικών κουφωμάτων και διαχωρίζονται:

- στους συμβατικούς υαλοπίνακες (απλούς διπλούς και τριπλούς),
- στους υαλοπίνακες ειδικών λειτουργιών και εφαρμογών (υαλοπίνακες θερμομονωτικούς, ενεργειακούς, ηχομονωτικούς, πυροπροστασίας, ασφαλείας κ.τ.λ.) και
- στους υαλοπίνακες σύνθετων λειτουργιών (π.χ. υαλοπίνακες θερμομονωτικούς και ασφαλείας, ηχομονωτικούς και πυροπροστασίας κ.τ.λ.).

Οι συμβατικοί διπλοί και τριπλοί υαλοπίνακες, αποτελούνται από απλούς που διαχωρίζονται αντίστοιχα από ένα ή δύο διάκενα με πλήρωση ξηρού αέρα και συνδέονται σε ενιαίο αεροστεγές και υδατοστεγές στοιχείο με τη χρήση ειδικών προφίλ και κατάλληλων συγκολλητικών και σφραγιστικών υλικών, προσφέροντας σημαντικά βελτιωμένες θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες σε σύγκριση με τους απλούς.

Με στόχο ενεργειακά αποδοτικότερες λύσεις η αγορά έχει εμπλουτιστεί με βελτιωμένους θερμομονωτικούς - ενεργειακούς διπλούς και τριπλούς υαλοπίνακες, στους οποίους ο ξηρός αέρας πλήρωσης των διακένων αντικαθίσταται από τα ευγενή, χαμηλής αγωγιμότητας αέρια αργό, κρυπτό και –σπανιότερα– ξένο. Όπως φαίνεται στους συγκριτικούς πίνακες (πίνακα 5.1. και πίνακα 5.2.) που ακολουθούν, με εφαρμογή των υαλοπινάκων αυτών στα κουφώματα και υαλοπετάσματα επιτυγχάνονται χαμηλότερες τιμές στις θερμικές απώλειες και τις ενεργειακές καταναλώσεις και αύξηση των θερμοκρασιών στις εσωτερικές επιφάνειές τους, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για τη θερμική άνεση σε περιπτώσεις με χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες. Το ιδανικό πλάτος του διακένου σ' αυτούς τους υαλοπίνακες είναι μεταξύ 15 και 16 mm στους διπλούς και από 10 mm για το κάθε διάκενο στους τριπλούς.

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά της θερμομονωτικής συμπεριφοράς των πλαισίων με βάση το υλικό κατασκευής και τη διαμόρφωση των διατομών τους

Υλικό πλαισίου	U-value [W/(m²·K)]	Θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας του υαλοπίνακα με εξωτ. θερμοκρασία -10°C & εσωτ. θερμοκρασία +20°C
Ξύλο	1,4 – 1,7	13,0 -15,0°C
Συνθετικό υλικό		
– PVC (2 θαλάμων)	2,8	9,0°C περίπου
– PVC (7 θαλάμων)	1,1	15,0°C περίπου
– με πλήρωση αφρού πολυουρεθάνης	1,7 – 2,1	11,0 - 14,0°C
Αλουμίνιο		
– χωρίς θερμοδιακοπή	περ. 5,8	-2,0°C περίπου
– με θερμοδιακοπή	2,8 – 3,5	6,0 - 9,0°C
– προφίλ βέλτιστης θερμ. απόδοσης	περ. 1,5	14,0 °C περίπου
Πλαίσια υψηλής θερμομόνωσης	περ. 0,8	17,0°C περίπου

Πίνακας 5.2. Αξιολόγηση πλαισίων με βάση το υλικό κατασκευής τους

	Αλουμίνιο	Ξύλο		Συνθετικό	
Κριτήρια επιλογής	Με θερμοδιακοπή	Με λαζούρα εμποτισμού	Με επικαλυπτικό χρώμα	PVC	PUR
Χρωματισμός	1÷2	2÷4	1÷2	2÷4	2÷4
Διαμόρφωση προφίλ	2÷3	1	1	2÷3	3÷4
Μέγεθος	1	2	2	2÷3	3÷4
Αντοχή στο χρόνο	1÷2	2÷3	2	1÷2	1÷2
Στεγανότητα	1÷2	1÷2	1÷2	1÷2	1÷2
Θερμομόνωση	2÷3	1	1	1	1
Υγροποίηση υδρατμών	2÷3	1	1	2	2
Ηχομόνωση	1÷2	1÷2	1÷2	1÷2	1÷2
Προστασία διάρρηξης	2	3	3	2	3
Καθαρισμός	2	2	2	2	2

5.1.4. Ειδικό υαλοπίνακες - Υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου

Η επιδίωξη για έλεγχο των ανεπιθύμητων θερμικών ηλιακών κερδών, χωρίς να παρεμποδίζεται η θέα και ο φυσικός φωτισμός των εσωτερικών χώρων, οδήγησε στην ανάπτυξη ειδικών υαλοπινάκων

με κατάλληλες ιδιότητες, που προσδίδονται σε αυτούς με ειδικά υλικά (κυρίως μέταλλα και μεταλλικά οξείδια), τα οποία είτε αναμειγνύονται και ενσωματώνονται στη μάζα τους είτε εφαρμόζονται με επιστρώσεις στην επιφάνειά τους. Παρά το γεγονός ότι αρκετοί τύποι από αυτούς μετρούν ήδη δεκαετίες εφαρμογών, ο γενικός όρος «υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου» είναι σχετικά πρόσφατος και αναφέρεται σε προϊόντα υψηλής τεχνολογίας που αναπτύχθηκαν από την υαλοβιομηχανία, ώστε να επιτρέπουν στο ηλιακό φως να τους διαπερνά και ταυτόχρονα να διαχέουν και να αντανακλούν ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής θερμότητας. Τα προϊόντα όπου εφαρμόζονται περιλαμβάνουν διπλούς τουλάχιστον υαλοπίνακες, γεγονός που σημαίνει ότι παρέχουν ικανοποιητική θερμομόνωση.

Από τις βασικές κατηγορίες ειδικών υαλοπινάκων που αναφέρονται στη συνέχεια οι **ηλεκτροχρωμικοί** και οι **θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες** χαρακτηρίζονται και ως **υαλοπίνακες με μεταβαλλόμενες ιδιότητες**, καθώς ρυθμίζουν και τροποποιούν βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς τους σε συνάρτηση με τις μεταβαλλόμενες, εποχιακά και στο 24-ωρο, συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι **έγχρωμοι υαλοπίνακες** αποτελούν μια παραλλαγή των απλών υαλοπινάκων, στη μάζα των οποίων έχουν προστεθεί κατά την παραγωγή τους ειδικές χρωστικές ύλες, που αυξάνουν την απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και συμβάλλουν στη μείωση των ηλιακών θερμικών φορτίων.

Οι **ανακλαστικοί υαλοπίνακες**, με επιστρώσεις από υλικά με έντονες ανακλαστικές ιδιότητες, απομακρύνουν με ανάκλαση περί το 50% της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά τους. Χαρακτηρίζονται από ελαφρές χρωματικές αποχρώσεις, ενώ μειώνουν σε πολύ μικρό μόνο βαθμό το φυσικό φωτισμό των εσωτερικών χώρων.

Οι **απορροφητικοί υαλοπίνακες** περιορίζουν τη μετάδοση της υπέρυθρης, κυρίως, ακτινοβολίας στους εσωτερικούς χώρους, ενώ μειώνουν κατ' ελάχιστον την ορατή. Η υπερθέρμανση που προκαλεί η απορρόφηση μπορεί να οδηγήσει σε θερμικές εντάσεις στους ίδιους τους υαλοπίνακες και γι' αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να αντιμετωπίζεται με εφαρμογή κατάλληλων υλικών στερέωσής τους και κατάλληλες κατασκευαστικές λύσεις.

Οι **ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες** μεταβάλλουν τη διαπερατότητά τους στο ηλιακό φως με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος χαμηλής τάσης. Το ρεύμα μεταφέρεται με μικροσκοπικούς λεπτότατους αγωγούς σε μία ηλεκτροχρωμική επίστρωση που ενεργοποιείται και αλλάζει το χρωματισμό της από ανοικτό σε σκούρο ή αντίστροφα και με αυτό τον τρόπο ελαττώνει ή αυξάνει ανάλογα τις ποσότητες της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στους εσωτερικούς χώρους. Η παροχή του ρεύματος πραγματοποιείται είτε με χειρισμούς και εντολές κατά τη βούληση του χρήστη ή με αυτοματισμούς που στηρίζονται στη λειτουργία ειδικών φωτοαισθητήρων. Με ανάλογο τρόπο λειτουργούν και οι **υαλοπίνακες υγρών κρυστάλλων**, που εφαρμόζονται όμως κυρίως σε διαχωριστικά στοιχεία εσωτερικών χώρων.

Οι **θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες** μεταβάλλουν τη διαπερατότητά τους στο ηλιακό φως με αλλαγή του χρωματισμού τους από ανοικτό σε σκούρο, με παθητικό τρόπο, χωρίς δηλαδή τη δράση ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ελαφρά χρωματισμένων θερμοχρωμικών μεμβρανών, που καθώς θερμαίνονται από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία μειώνουν τη διαπερατότητά τους (σκοτεινιάζουν) και απορροφούν σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας που κατευθύνεται προς το εσωτερικό. Σε απουσία άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ο χρωματισμός των υαλοπινάκων «ανοίγει», ώστε να επιτραπεί η είσοδος της διάχυτης ακτινοβολίας στους χώρους. Οι θερμοχρωμικές μεμβράνες ενσωματώνονται μεταξύ δύο υαλοπινάκων, συνθέτοντας ένα ενιαίο φύλλο, το οποίο κατόπιν αποτελεί μέρος ενός συνθετότερου στοιχείου (π.χ. διπλού ή τριπλού υαλοπίνακα).

Στους **υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (low-e)** εφαρμόζονται στις επιφάνειές τους λεπτότατες, πρακτικά μη ορατές, επιστρώσεις από μέταλλα ή οξειδία μετάλλων. Όπως είναι γνωστό, ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς θερμικών φορτίων στους διπλούς και τριπλούς υαλοπίνακες είναι η ακτινοβολούμενη θερμότητα από ένα θερμό προς έναν ψυχρό υαλοπίνακα. Με την επικάλυψη της επιφάνειας του υαλοπίνακα που είναι στραμμένη προς το διάκενο με υλικό χαμηλής εκπομπής εμποδίζεται σημαντικό μέρος της ακτινοβολούμενης θερμότητας να διέλθει, με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής διακίνησης θερμότητας διά του στοιχείου και τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητάς του.

Η σύγχρονη τεχνολογία εφαρμογής επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής στους υαλοπίνακες προσφέρει εξελιγμένα προϊόντα με εξειδικευμένες ιδιότητες και λειτουργίες. Υπάρχουν αρκετοί τύποι υαλοπινάκων με επιστρώσεις, που κάνουν δυνατή τη μείωση των θερμικών ηλιακών κερδών (σημαντικό χαρακτηριστικό για τη θερινή περίοδο ή τις περιπτώσεις που κυριαρχούν οι απαιτήσεις για ψύξη), τις θερμικές απώλειες (σημαντικό χαρακτηριστικό για τη χειμερινή περίοδο ή τις περιπτώσεις που κυριαρχούν οι απαιτήσεις για θέρμανση) και τη θάμβωση (σημαντικό χαρακτηριστικό για διάφορες συνθήκες φυσικού φωτισμού).

Για εφαρμογές σε κλιματικές συνθήκες στις οποίες επικρατούν απαιτήσεις θέρμανσης, οι επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής τοποθετούνται με τρόπο τέτοιο, ώστε να μειώνουν τις θερμικές απώλειες προς το εξωτερικό περιβάλλον (συνεπώς εφαρμόζονται στην στραμμένη προς το διάκενο επιφάνεια του εσωτερικού υαλοπίνακα) χωρίς να εμποδίζουν το φυσικό φωτισμό. Αντίστροφα, για κλιματικές συνθήκες στις οποίες επικρατούν οι απαιτήσεις ψύξης, οι επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής τοποθετούνται στην στραμμένη προς το διάκενο επιφάνεια του εξωτερικού υαλοπίνακα, ώστε να μειώνουν τις ποσότητες των θερμικών φορτίων που μεταφέρει η ηλιακή ακτινοβολία προς τους εσωτερικούς χώρους (δηλαδή τα θερμικά ηλιακά κέρδη), επιτρέποντας όμως το μέγιστο φυσικό φωτισμό. Συνδυασμοί κατάλληλων επιστρώσεων με βελτιωμένους θερμομονωτικούς διπλούς και τριπλούς υαλοπίνακες (με ευγενή, χαμηλής αγωγιμότητας αέρια στα διάκενα) και με υψηλής απόδοσης πλαίσια, συμβάλλουν καθοριστικά στο σχεδιασμό και στην κατασκευή κτηρίων με εντυπωσιακά μειωμένα τα ποσοστά των ενεργειακών καταναλώσεων που οφείλονται στα κουφώματα και στα υαλοπετάσματα.

Για τους βέλτιστους, κατά περίπτωση και ειδικές συνθήκες, συνδυασμούς low-e επιστρώσεων και τιμών του συντελεστή θερμικού κέρδους ηλιακής ακτινοβολίας g σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Για κτήρια στα οποία η θέρμανση αποτελεί προτεραιότητα, προτείνονται χαμηλής εκπομπής (low-e) υαλοπίνακες με υψηλές τιμές του συντελεστή θερμικού κέρδους ηλιακής ακτινοβολίας g . Αυτοί ακριβώς οι τύποι των υαλοπινάκων επιλέγονται κατά κανόνα για κτήρια που ακολουθούν τις αρχές του ηλιακού - παθητικού σχεδιασμού.
- Για κλιματικές συνθήκες που απαιτούν κυρίως ψύξη ιδανική επιλογή θεωρούνται χαμηλής εκπομπής (low-e) υαλοπίνακες που προσφέρουν χαμηλές τιμές του συντελεστή θερμικού κέρδους ηλιακής ακτινοβολίας g .
- Για κλιματικές συνθήκες που απαιτούν και θέρμανση και ψύξη, η επιλογή χαμηλής εκπομπής (low-e) υαλοπινάκων συμβάλλει στη μείωση του συνολικού ετήσιου ενεργειακού κόστους, εφόσον, στο πλαίσιο των δεδομένων λειτουργίας του κάθε συγκεκριμένου έργου και του ενεργειακού σχεδιασμού του, συνδυαστούν με την επιλογή των κατάλληλων για την κάθε περίπτωση τιμών συντελεστή θερμικών ηλιακών κερδών (υψηλών, ενδιάμεσων ή χαμηλών τιμών του g).
- Η τεχνολογία των επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής (low-e) είναι σε θέση να προσφέρει προϊόντα με ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του συντελεστή θερμικών ηλιακών κερδών g , που χαρακτηρίζονται όμως από σημαντική μείωση της διαπερατότητας ορατής ακτινοβολίας ή εμφανίζονται ως ελαφρά χρωματισμένα, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για την επιλογή τους.

5.1.5. Φύλλα ασφαλείας και σκίασης (εξώφυλλα / σκούρα)

Συμπληρώνουν τα εξωτερικά κουφώματα με σκοπό να καλύψουν τις ανάγκες ασφαλείας, σκίασης, ηλιασμού, φωτισμού, ηχομόνωσης και θερμομόνωσης των εσωτερικών χώρων. Για τη στήριξή τους χρησιμοποιείται η κάσα του εξωτερικού κουφώματος, με κατάλληλη διαμόρφωσή της.

Οι συμβατικοί τύποι των εξωφύλλων διακρίνονται από ποικιλία μορφολογικών, λειτουργικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών, ενώ διαρκώς και περισσότερο έδαφος στις σύγχρονες εφαρμογές κερδίζει η μορφή των ρολών. Στα ρολά λεπτοί πήχεις (περσίδες) με μήκος ίσο με το πλάτος του ανοίγματος συνδέονται μεταξύ τους με εύκαμπτα μέσα, ώστε το πέτασμα (στόρι) που διαμορφώνεται να μπορεί να περιτυλίγεται περί οριζόντιο άξονα και να ανασύρεται σε προστατευτικό κουτί που τοποθετείται στο ανώφλι του κουφώματος. Στα σύγχρονα κουφώματα το κουτί περιέλιξης και προστασίας δεν αποτελεί ανεξάρτητο στοιχείο, αλλά ενσωματώνεται στο πλαίσιο του κουφώματος, καταλαμβάνοντας τμήμα του συνολικού οικοδομικού ανοίγματος. Με δεδομένο ότι το ποσοστό της επιφάνειας που καταλαμβάνει το κουτί του ρολού κυμαίνεται μεταξύ 10% και 20% της συνολικής επιφάνειας του κουφώματος (ανάλογα αν τοποθετείται σε εξωστόθυρα ή παράθυρο), η συμμετοχή του στη θερμομονωτική απόδοση του συνολικού κουφώματος είναι σημαντική και ως εκ τούτου ο συντελεστής θερμοπερατότητάς του θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

5.1.6. Τύποι κουφωμάτων. Θερμοτεχνικά χαρακτηριστικά.

Ειδικοί τύποι:

Κουφώματα με διπλά υαλοστάσια. Αποτελούνται από δύο σειρές παράλληλα τοποθετημένων υαλοστασίων (φύλλων), που συνδέονται μεταξύ τους με ειδικά εξαρτήματα, ώστε να μπορούν να ανοίγουν ως ενιαίο σύνολο, κινούμενα γύρω από κοινό κατακόρυφο άξονα με στροφείς που στηρίζονται στην κοινή κάσα, ενώ παρέχεται η δυνατότητα και ανεξάρτητου ανοίγματος των φύλλων για λόγους καθαρισμού. Η απόσταση μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών φύλλων, που κυμαίνεται από 4 cm έως 7 cm προσδίδει στο σύνολο αυξημένες θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες. Η τοποθέτηση διπλών υαλοπινάκων στα υαλοστάσια της μιας από τις δύο σειρές –κατά κανόνα της εξωτερικής– αυξάνει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του κουφώματος.

Κουφώματα με διπλή κάσα (διπλά ή δίδυμα και κιβωτιοειδή κουφώματα). Πρόκειται για δύο ανεξάρτητα απλά κουφώματα, με ανεξάρτητες κάσες, που τοποθετούνται κατά το βάθος του ανοίγματος με μεταξύ τους απόσταση 10 - 0 cm. Στα **κιβωτιοειδή** κουφώματα ένα πλαίσιο (τελάρο, κάσα) συνδέει τα δύο λειτουργικά και κατασκευαστικά ανεξάρτητα επί μέρους απλά στοιχεία, σε ενιαίο σύνολο. Η τοποθέτηση απλών ή διπλών υαλοπινάκων στα υαλοστάσια, στο ένα ή και στα δύο στοιχεία, ενισχύει ανάλογα την ενεργειακή απόδοση του ενιαίου ολοκληρωμένου στοιχείου (βλ. παρ.2.2.3. στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων»).

Εξέλιξη των παραδοσιακών κιβωτιοειδών στοιχείων μπορούν να θεωρηθούν οι σύγχρονες, υψηλής τεχνολογίας και ενεργειακής απόδοσης *κιβωτιοειδείς* (box-type) γυάλινες διπλοκέλυφες όψεις.

Διπλοκέλυφα παράθυρα - γυάλινες διπλοκέλυφες όψεις. Γενικά, πρόκειται για κατασκευές παραθύρων και όψεων (τμημάτων όψεων ή συνολικών) αποτελούμενων από δύο ανεξάρτητα κελύφη που διαχωρίζονται από χώρο κίνησης αέρα. Στη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται και ως **γυάλινες διπλές όψεις** (GDS-Glass Double Façades) ή **διπλοκέλυφες γυάλινες όψεις** (DGFS-Double Glass Skin Façades).

Ειδικότερα ως **διπλοκέλυφες όψεις** (Double Skin Façades - DSF) θεωρούνται (BBRI 2004) τα ολοκληρωμένα συστήματα όψεων, που διαμορφώνονται από δύο επί μέρους κελύφη (skins), τοποθετημένα σε ανεξάρτητα κατακόρυφα επίπεδα, με μεταξύ τους απόσταση που κυμαίνεται από 0,20 m έως 2,00 m .Στην τυπική τους μορφή το εσωτερικό κέλυφος εκπληρώνει τις βασικές λειτουργίες μιας συμβατικής όψης, με κουφώματα ή/και υαλοπετάσματα, ενώ το εξωτερικό κέλυφος παρέχει επιπρόσθετες λειτουργίες στην όψη (ηχοπροστασία, θερμοπροστασία, ηλιοπροστασία, προστασία από ρύπους κτλ.) και δημιουργεί, σε συνδυασμό με το εσωτερικό κέλυφος, ένα σύστημα με καθοριστική συμμετοχή στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτηρίου. Το εσωτερικό κέλυφος είναι κατά κανόνα θερμομονωμένο και μπορεί να περιλαμβάνει σταθερά και ανοιγόμενα μέρη, ενώ το εξωτερικό κατασκευάζεται συνήθως από απλούς υαλοπίνακες. Στο χώρο μεταξύ εξωτερικού - εσωτερικού κελύφους και σε ελάχιστη απόσταση 0,10 m από το εξωτερικό κέλυφος τοποθετούνται στοιχεία ηλιοπροστασίας. Αυτός ο ενδιάμεσος χώρος (κλωβός) επικοινωνεί με τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος με ξεχωριστά ανοίγματα (θυρίδες) εισαγωγής - απαγωγής αέρα, ώστε, με συνδυασμένη χρήση των ανοιγμάτων του εσωτερικού κελύφους να είναι δυνατός ο φυσικός αερισμός των χώρων του κτηρίου. Η κίνηση του αέρα στο χώρο μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού κελύφους μπορεί να είναι είτε φυσική, στηριζόμενη στη θερμική άνωση που προκαλούν οι θερμοκρασιακές διαφορές και διαφορές πιέσεων του ανέμου - φαινόμενο της «καμινάδας» (stack-effect, chimney-effect), ή με υποβοήθηση μηχανικών διατάξεων, ή υβριδική. Εφόσον οι παραπάνω βασικές λειτουργίες της όψης στηρίζονται αποκλειστικά στην αξιοποίηση των φυσικών παραγόντων που προκαλούν τη θερμική άνωση, το σύνολο εντάσσεται στα παθητικά ηλιακά συστήματα.

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η διπλοκέλυφη όψη (ΔΚΟ) λειτουργεί ως ζώνη θερμικής ανασχεσης και ως χώρος προθέρμανσης αέρα. Ποσότητες ψυχρού αέρα εισέρχονται από τις ανοικτές θυρίδες εισαγωγής στη βάση του στοιχείου, θερμαίνονται κάτω από την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και λόγω της θερμικής άνωσης κινούνται προς τα ανώτερα επίπεδα του κλωβού. Ο θερμός αέρας μπορεί να διοχετευθεί απευθείας στους εσωτερικούς χώρους ή να οδηγηθεί στο κεντρικό σύστημα κλιματισμού. Τη θερινή περίοδο το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το φυσικό αερισμό των εσωτερικών χώρων του κτηρίου, αξιοποιώντας τη διαφορά των πιέσεων του αέρα ανάμεσα στις θυρίδες εισόδου και εξόδου. Αυτές οι λειτουργίες έχουν αποδειχτεί και εφικτές και αποτελεσματικές για ψυχρές ή ενδιάμεσες κλιματικές ζώνες. Σε κλιματικές ζώνες με υψηλές θερμοκρασίες, που διατηρούνται για μεγάλες χρονικές περιόδους, και στις οποίες κυριαρχούν οι ανάγκες ψύξης, βασική προϋπόθεση για την απόδοση της διπλοκέλυφης όψης είναι η εξασφάλιση μιας ελάχιστης συνεχούς ροής αέρα στον κλωβό, ώστε να απομακρύνεται κατ' αρχάς η συγκεντρωμένη εκεί θερμότητα πριν να μεταφερθεί στο εσωτερικό του κτηρίου και –εφόσον οι θερμοκρασίες κλωβού και εξωτερικού αέρα το επιτρέπουν– να πραγματοποιείται ο φυσικός αερισμός και δροσισμός των χώρων.

Σημειώνεται ότι ο τύπος της κίνησης του αέρα αποτελεί σημαντική παράμετρο για τη σταθερότητα της θερμικής και ενεργειακής απόδοσης του συστήματος στη διάρκεια της λειτουργίας του: ενώ είναι σχετικά εύκολος ο έλεγχος και η εξασφάλιση του επιπέδου της απόδοσης ενός μηχανικού συστήματος, η φυσική λειτουργία του αερισμού επηρεάζεται από μεταβολές στις εξωτερικές συνθήκες, κατά κύριο λόγο από την ένταση, την κατεύθυνση των ανέμων και τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Η εξασφάλιση αυτών των λειτουργιών στα παθητικά συστήματα γυάλινων διπλοκέλυφων όψεων απαιτεί τόσο την αξιοποίηση της εμπειρίας από κατασκευές που λειτουργούν, όσο και την εξαντλητική διερεύνηση όλων των ειδικών παραμέτρων της κάθε εφαρμογής και τη μελέτη τους με συνδυασμένη εφαρμογή πειραματικών και αναλυτικών μοντέλων.

Τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των διπλοκέλυφων όψεων διαφοροποιούν τέσσερεις βασικές υποκατηγορίες:

- διπλοκέλυφες όψεις τύπου κιβωτιοειδούς παραθύρου,

- διπλοκέλυφες όψεις τύπου διαδρόμου,
- διπλοκέλυφες όψεις τύπου κιβωτιοειδούς φρεατίου,
- πολυώροφες διπλοκέλυφες όψεις συνεχούς κλωβού και
- διπλοκέλυφα παράθυρα.

Ανεξάρτητα από τη σύνθεση της όψης από μικρότερα ή μεγαλύτερα λειτουργικά στοιχεία, βασικό κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι η λειτουργία του κλωβού. Από τις τέσσερις παραπάνω βασικές κατηγορίες, οι δύο πρώτες έχουν κοινό χαρακτηριστικό την ανά όροφο κατασκευαστική και λειτουργική ανεξαρτησία του κλωβού, ενώ οι άλλες δύο στηρίζονται σε ενιαία λειτουργία του στοιχείου σε όλο το ύψος της όψης.

5.1.7. Προσαρμογή και ενσωμάτωση των κουφωμάτων στα ανοίγματα

Τα τοποθετημένα και στερεωμένα στο οικοδομικό άνοιγμα κουφώματα είναι εκτεθειμένα στη βροχή, σε ανεμοπιέσεις, σε θερμικές επιδράσεις, σε κραδασμούς, σε συστολοδιαστολές και επιβαρύνσεις από τις λειτουργίες των φύλλων, με αποτέλεσμα οι περιοχές στερέωσης και επαφής να δέχονται σημαντικές καταπονήσεις.

Ο τρόπος και η τεχνική τοποθέτησης και η προσαρμογής των κουφωμάτων στα οικοδομικά ανοίγματα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ενεργειακή τους απόδοση. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει στις σχετικές εργασίες να γίνεται χρήση κατάλληλων υλικών και δοκιμασμένων τεχνικών εφαρμογής, ώστε να μην υποβαθμίζεται η πιστοποιημένη ποιότητα των σύγχρονων κουφωμάτων από κακοτεχνίες κατά την εφαρμογή τους στο έργο.

Σημειώνεται ότι, με θερμοτεχνικά και ενεργειακά κριτήρια, οι περιοχές επαφής κάσας - οικοδομικού ανοίγματος είναι ευαίσθητες απέναντι στους κινδύνους:

- ανεπιθύμητων διαφυγών αέρα, με επακόλουθο θερμικές απώλειες από τους θερμαινόμενους εσωτερικούς χώρους προς το εξωτερικό περιβάλλον,
- δημιουργίας θερμογεφυρών, με επακόλουθο θερμικές απώλειες και αυξημένες πιθανότητες υγραποίησης υδρατμών στις περιοχές επαφής,
- διείσδυσης νερού από συνδυασμένη επίδραση βροχής και ανεμοπίεσης, με επακόλουθο τόσο τη διύγρανση και τη φθορά των υλικών των επιφανειών επαφής, όσο και τη διαφυγή θερμότητας στα υγρά τμήματα αυτών των περιοχών.

Αυτοί οι κίνδυνοι αντιμετωπίζονται κατά κανόνα συνολικά:

- με κατάλληλη κατασκευαστική διαμόρφωση των οικοδομικών ανοιγμάτων, ώστε να προστατεύονται κατά το δυνατόν οι περιοχές επαφής,
- με ένταξη της κάσας στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο με εκείνο της θερμομόνωσης της τοιχοποιίας που περιβάλλει το άνοιγμα,
- με εφαρμογή υλικών που αποκλείουν, σε κάθε περίπτωση, τη θερμική γεφύρωση ανάμεσα στην κάσα και την τοιχοποιία που περιβάλλει το οικοδομικό άνοιγμα (όπως π.χ. θερμομονωτικές λωρίδες, αφροί κ.τ.λ.),
- με εφαρμογή υλικών πλήρωσης και σφράγισης αρμών που εξασφαλίζουν υδατοστεγανότητα και αεροστεγανότητα (όπως π.χ. μεμβράνες, κορδόνια, μαστίχες, σιλικόνες κ.τ.λ.) και
- με εφαρμογή τεχνικών που εξασφαλίζουν τη σταθεροποίηση του κουφώματος στο άνοιγμα και επιτρέπουν τις μικρομετακινήσεις, τη σταθερότητα των διαστάσεων των αρμών και τη σταθερή στο χρόνο πρόσφυση των προστατευτικών υλικών.

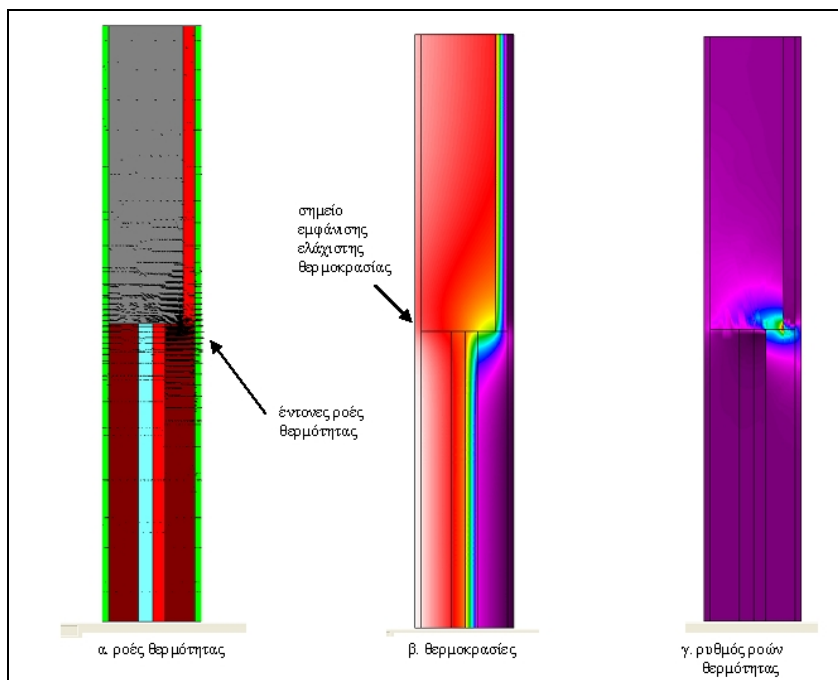
6. ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΕΣ

Θερμογέφυρες ονομάζονται οι θέσεις στο κέλυφος ενός κτηρίου στις οποίες εμφανίζεται σε σχέση με τις γειτονικές τους διαφοροποίηση στη θερμική αντίσταση των δομικών στοιχείων είτε λόγω ασυνέχειας της στρώσης θερμομόνωσης είτε λόγω διαφοροποίησης του υλικού κατά μήκος του δομικού στοιχείου είτε λόγω αλλαγής της γεωμετρίας της διατομής. Σ' αυτές τις θέσεις παρατηρείται μεταβολή στη ροή θερμότητας και στην εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία σε σχέση με τις γειτονικές τους.

Ως προς τις αιτίες δημιουργίας τους οι θερμογέφυρες διακρίνονται σε τρεις τύπους:

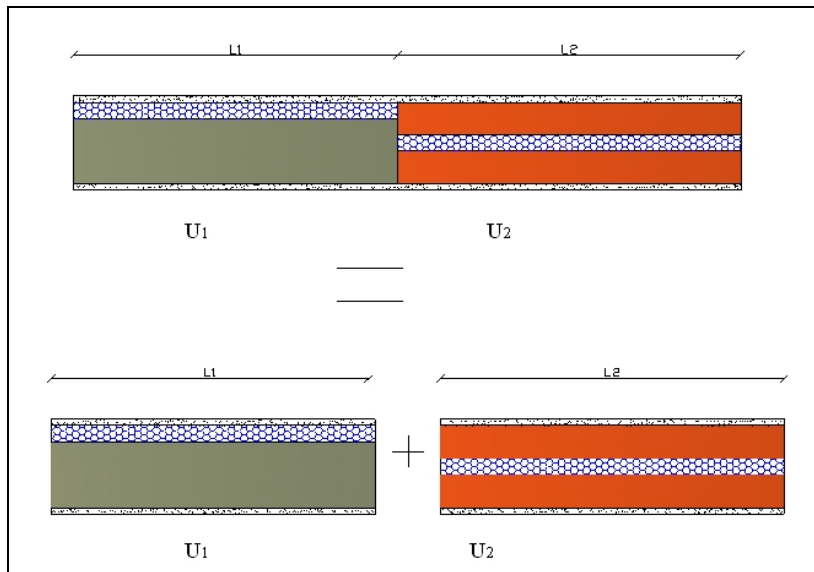
- στις κατασκευαστικές,
- στις γεωμετρικές,
- σε συνδυασμό των δύο παραπάνω τύπων.

Οι κατασκευαστικές θερμογέφυρες δημιουργούνται σε θέσεις στις οποίες υπάρχει ασυνέχεια του θερμομονωτικού υλικού, π.χ. στις θέσεις ένωσης τοιχοποιίας με θερμομόνωση στον πυρήνα και τοιχώματος με θερμομόνωση εξωτερικά. Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα σε αυτήν την περίπτωση η παραδοχή της μονοδιάστατης ροής θερμότητας παύει να ισχύει. Στην περιοχή της ασυνέχειας αναπτύσσεται έντονη δισδιάστατη ροή θερμότητας η οποία οδηγεί σε αυξημένες θερμικές απώλειες και μείωση της εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας. Για τον ορθό υπολογισμό των ροών θερμότητας από τη συγκεκριμένη διατομή απαιτείται πλέον διόρθωση των υπολογισμών που γίνονται θεωρώντας μονοδιάστατη ροή θερμότητας.



Εικόνα 6.1. Ροές θερμότητας και θερμοκρασίες σε ένωση δομικού στοιχείου.

Στην πραγματικότητα ο μελετητής κάνοντας παραδοχή μονοδιάστατης ροής θερμότητας θεωρεί τα δομικά στοιχεία τοιχώματος και οπτοπλινθοδομής ως ανεξάρτητα όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Εάν ορίσουμε ως l το μήκος για το οποίο συμβαίνει η ένωση των δομικών στοιχείων και L^{1D} τη ροή θερμότητας που συμβαίνει κάνοντας παραδοχή μονοδιάσταστης ροής τότε έχουμε:



Εικόνα 6.2. Διακριτοποίηση ένωσης δομικού στοιχείου.

$$L^{1D} = U_1 \cdot L_1 \cdot \ell + U_2 \cdot L_2 \cdot \ell \quad (6.1.)$$

Η πραγματική όμως ροή θερμότητας L^{2D} είναι δισδιάστατη και διαφοροποιείται από τη μονοδιάστατη L^{1D} . Η διαφορά της L^{2D} από την L^{1D} ορίζεται ως η ροή θερμότητας από τη θερμογέφυρα.

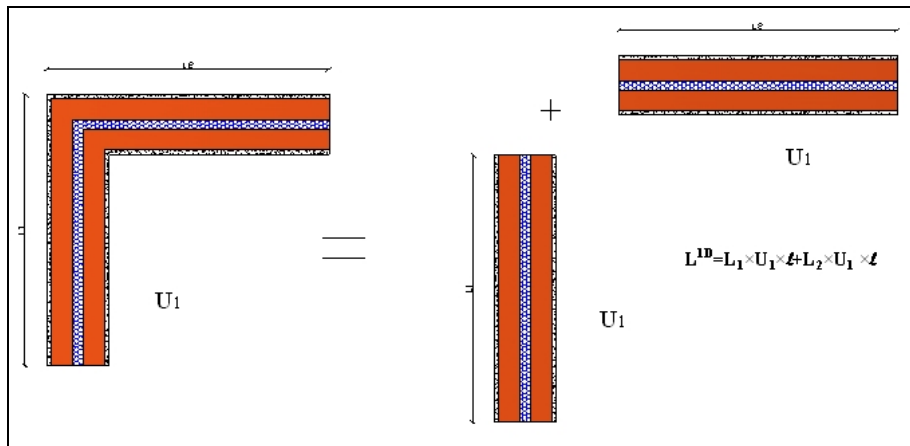
$$L^{2D} - L^{1D} = \Psi \cdot \ell \quad (6.2.)$$

Για να γίνει εφικτή η παραπάνω διόρθωση δημιουργήθηκε ένας κατάλογος με κατασκευαστικές λεπτομέρειες που συναντώνται στα ελληνικά κτήρια. Για κάθε κατασκευαστική λεπτομέρεια δημιουργήθηκε ένα δισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο και υπολογίστηκε η ροή θερμότητας L^{2D} θεωρώντας το ℓ ίσο με 1m. Κατόπιν αφαιρέθηκε η L^{1D} και προέκυψε ο γραμμικός συντελεστής θερμοπερατότητας Ψ . Ο κατάλογος κατασκευαστικών λεπτομερειών, καθώς και οι τιμές Ψ για κάθε μία από αυτές έχουν ενσωματωθεί στον πίνακα 16 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1.

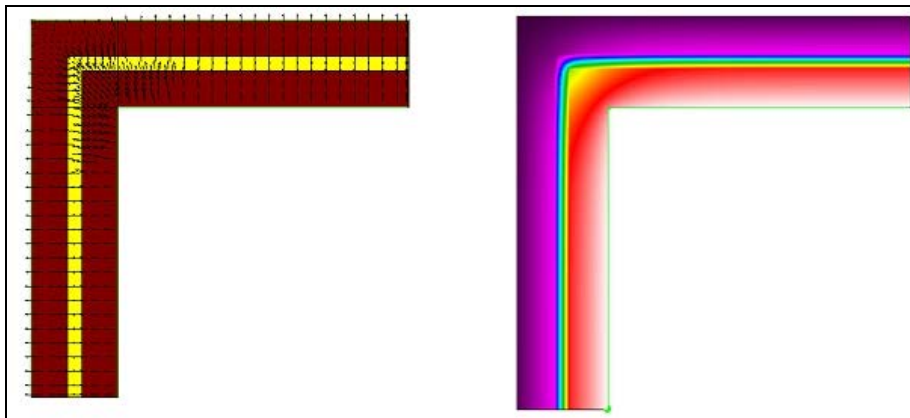
Τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο μελετητής είναι να υπολογίσει τη ροή θερμότητας κάνοντας παραδοχή μονοδιάστατης ροής θερμότητας την οποία στη συνέχεια θα διορθώσει λαμβάνοντας τη κατάλληλη τιμές Ψ από τον πίνακα 16 (εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο πίνακας 15) και το μήκος ℓ που πραγματοποιείται η εν λόγω θερμογέφυρα.

$$L^{2D} = L^{1D} + \Psi \cdot \ell \quad (6.3.)$$

Οι γεωμετρικές θερμογέφυρες δημιουργούνται σε θέσεις, στις οποίες η βασική γεωμετρία του δομικού στοιχείου παύει να είναι γραμμική, π.χ. στη θέση κάθετης τομής δύο εξωτερικών δομικών στοιχείων με τη συνέχεια της θερμομόνωσης να μη διακόπτεται (εικόνα 6.3.). Σ' αυτήν την περίπτωση, επειδή η συνολική εξωτερική επιφάνεια των δομικών στοιχείων διαφέρει από την εσωτερική, αναπτύσσονται έντονα φαινόμενα δισδιάστατης ροής θερμότητας. Ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται εσωτερικές ή εξωτερικές διαστάσεις για τους υπολογισμούς των θερμικών ροών (παραδοχή μονοδιάστατης ροής), η τιμή του γραμμικού συντελεστή της συγκεκριμένης θερμογέφυρας διαφοροποιείται. Στην περίπτωση χρήσης εσωτερικών διαστάσεων παίρνει θετικές τιμές, ενώ στην περίπτωση χρήσης εξωτερικών διαστάσεων παίρνει αρνητικές, λειτουργώντας στην ουσία ως διόρθωση στους υπολογισμούς των ροών θερμότητας με παραδοχή μονοδιάστατης ροής. Για τις ανάγκες των υπολογισμών με βάση τον Κ.Εν.Α.Κ. γίνεται παντού χρήση εξωτερικών διαστάσεων.

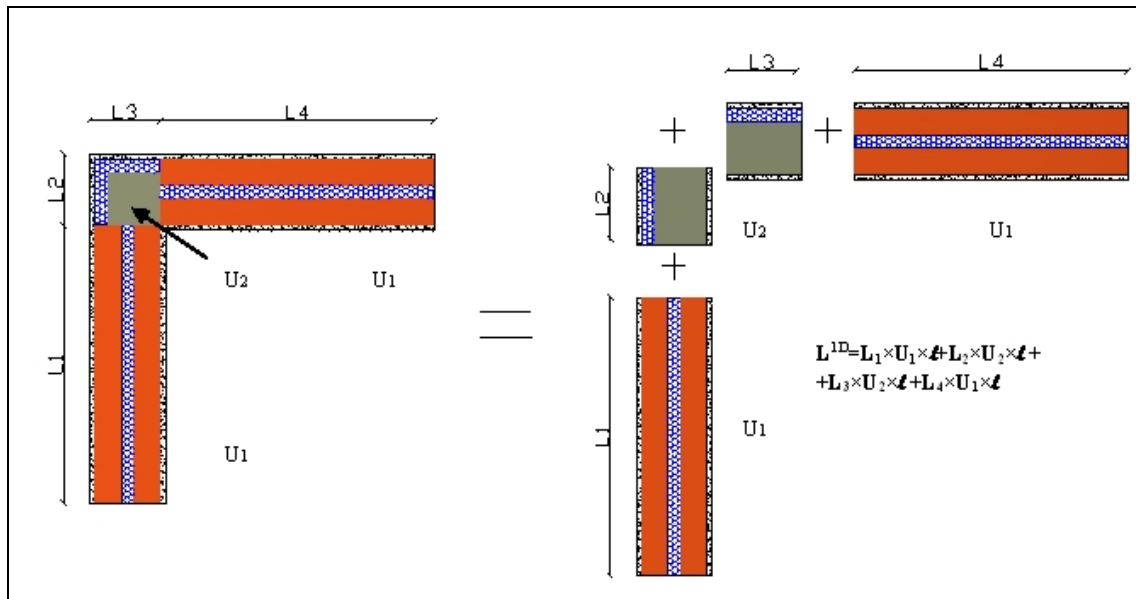


Εικόνα 6.3. Διακριτοποίηση γεωμετρικής θερμογέφυρας.

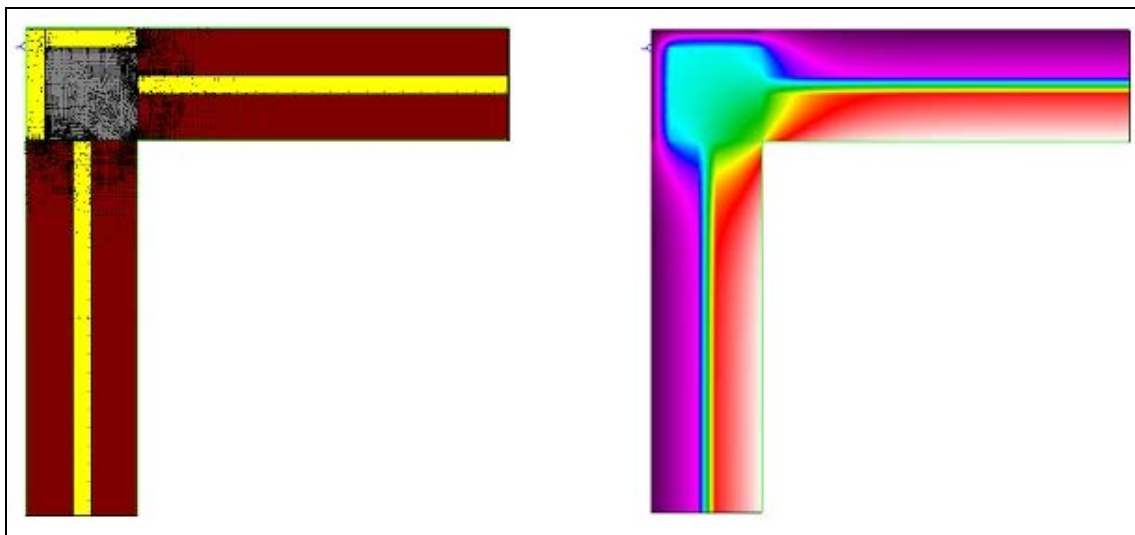


Εικόνα 6.4. Ροές θερμότητας και θερμοκρασίες σε γεωμετρική θερμογέφυρα.

Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει συνδυασμός γεωμετρικής και κατασκευαστικής θερμογέφυρας, π.χ. σε ένα γωνιακό υποστύλωμα θερμομονωμένο εξωτερικά, στο οποίο εφάπτονται δύο κάθετες μεταξύ τους τοιχοποιίες με θερμομόνωση στον πυρήνα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις εμφανίζονται αυξημένες ροές θερμότητας και μειωμένη εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία, ενώ ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας της θερμογέφυρας μπορεί να λάβει, ακόμη και με χρήση εξωτερικών διαστάσεων για τους υπολογισμούς των ροών θερμότητας, τιμή αρνητική, θετική ή μηδενική ανάλογα με την περίπτωση.



Εικόνα 6.5. Διακριτοποίηση συνδυασμού γεωμετρικής και κατασκευαστικής θερμογέφυρας.

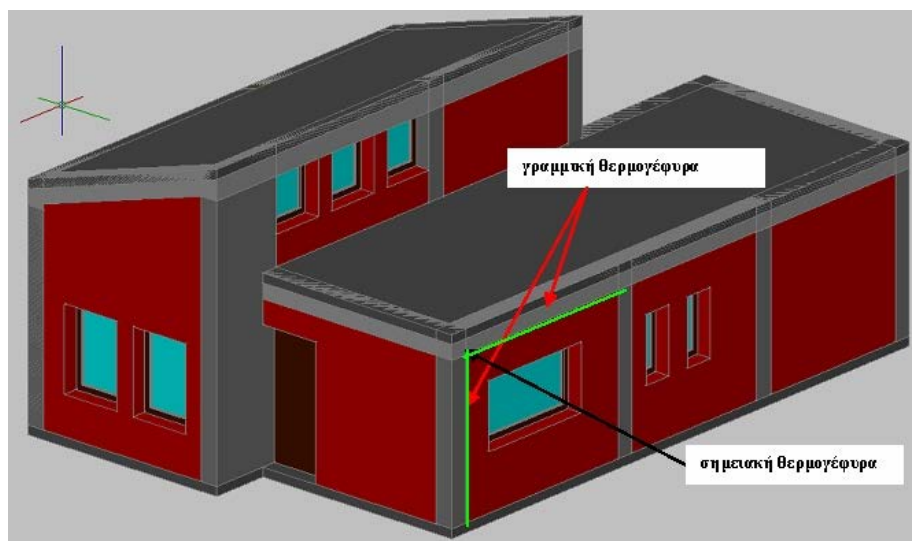


Εικόνα 6.6. Ροές θερμότητας και θερμοκρασία σε συνδυασμένη γεωμετρική και κατασκευαστική θερμογέφυρα.

Ανάλογα με τη μορφή μιας διατομής οι θερμογέφυρες μπορούν να διακριθούν σε δύο τύπους:

- στις γραμμικές και
- στις σημειακές.

Οι γραμμικές θερμογέφυρες έχουν ομοιόμορφη διατομή κατά μία διάσταση και οφείλονται στη δημιουργία θέσεων στις οποίες η ροή θερμότητας παρουσιάζει έντονα δισδιάστατη φύση και η παραδοχή της μονοδιάστατης ροής θερμότητας παύει να ισχύει. Οι σημειακές θερμογέφυρες εμφανίζονται στις ενώσεις των γραμμικών θερμογεφυρών, στις οποίες η ροή θερμότητας έχει τρισδιάστατη φύση. Οι σημειακές θερμογέφυρες δεν έχουν καμία διάσταση, ενώ η επίδρασή τους στις θερμικές ανταλλαγές θεωρείται για τα ελληνικά δεδομένα πρακτικά αμελητέα· γι' αυτό και δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς σύμφωνα με την Τ.ΟΤ.Τ.Ε.Ε. 20701-2.



Εικόνα 6.7. Γραμμικές και σημειακές θερμογέφυρες.

Ανάλογα με τη θέση εμφάνισής τους στο κτήριο, οι θερμογέφυρες απαντώνται:

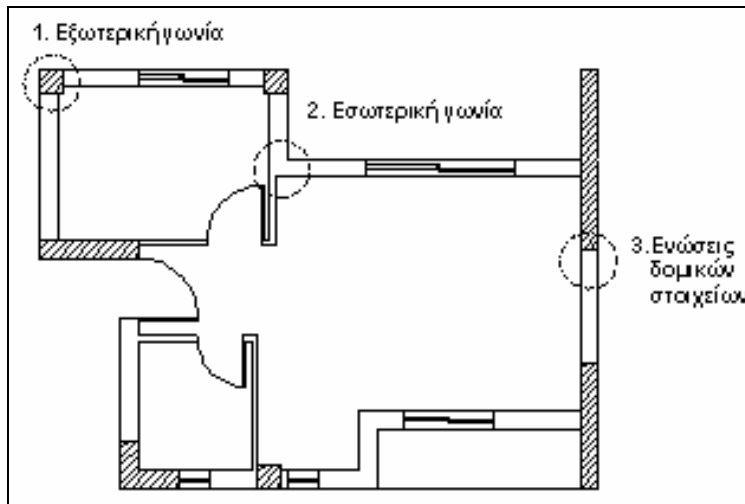
- στη συναρμογή των κατακόρυφων δομικών στοιχείων (**κατακόρυφες θερμογέφυρες**)
- στη συναρμογή των οριζόντιων δομικών στοιχείων με τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία (**οριζόντιες θερμογέφυρες**)
- στη συναρμογή των κουφωμάτων με τα συμπαγή δομικά στοιχεία (**θερμογέφυρες κουφωμάτων**).

Οι κατακόρυφες θερμογέφυρες εντοπίζονται στις κατόψεις του κτηρίου. Δεδομένου ότι η κύρια διάστασή τους αναπτύσσεται καθ' ύψος, το μήκος τους μετράται με βάση τα σχέδια των τομών. Διακρίνονται τρεις υποκατηγορίες (σχήμα 6.1.):

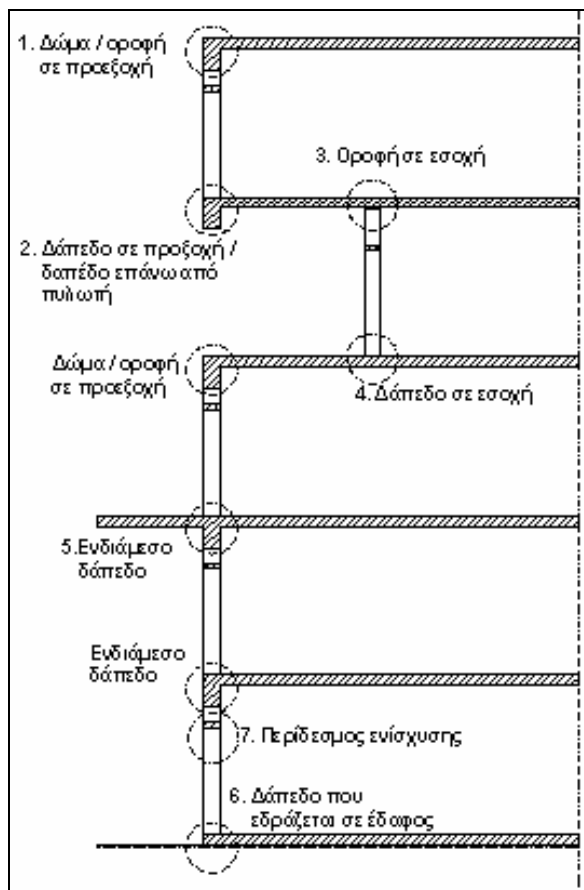
- θερμογέφυρες εξωτερικών γωνιών (ΕΞΓ),
- θερμογέφυρες εσωτερικών γωνιών (ΕΣΓ),
- θερμογέφυρες ένωσης δομικών στοιχείων (ΕΔΣ).

Οι οριζόντιες θερμογέφυρες εντοπίζονται στις τομές του κτηρίου. Δεδομένου ότι η κύρια διάστασή τους αναπτύσσεται κατά μήκος των δομικών στοιχείων, το μήκος τους μετράται με βάση τα σχέδια των κατόψεων. Διακρίνονται επτά υποκατηγορίες (σχήμα 6.2):

- θερμογέφυρες δώματος ή οροφής σε προεξοχή (Δ),
- θερμογέφυρες δαπέδου σε προεξοχή ή δαπέδου επάνω από πυλωτή (ΔΠ),
- θερμογέφυρες οροφής σε εσοχή (ΟΕ),
- θερμογέφυρες δαπέδου σε εσοχή (ΔΕ),
- θερμογέφυρες ενδιάμεσου δαπέδου (ΕΔΠ),
- θερμογέφυρες περίδεσμου ενίσχυσης (ΠΡ),
- θερμογέφυρες δαπέδου που εδράζεται σε έδαφος (ΕΔ).



Σχήμα 6.1. Ενδεικτικές θέσεις εμφάνισης κατακόρυφων θερμογεφυρών.



Σχήμα 6.2. Ενδεικτικές θέσεις εμφάνισης οριζόντιων θερμογεφυρών.

Οι θερμογέφυρες κουφωμάτων εντοπίζονται στις θέσεις συναρμογής των κουφωμάτων με τα συμπαγή δομικά στοιχεία. Το μήκος τους μετράται με βάση τις διαστάσεις των ανοιγμάτων. Διακρίνονται δύο υποκατηγορίες:

- θερμογέφυρες στο λαμπά του κουφώματος (Λ)
- θερμογέφυρες στο ανωκάσι/κατωκάσι του κουφώματος (ΑΚ).

7. Ο ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΕΝΟΣ ΚΤΗΡΙΟΥ

7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τη θερμομονωτική προστασία των κτηρίων επιδιώκεται ο περιορισμός των θερμικών απωλειών από τις επιφάνειες που διαμορφώνουν το εξωτερικό κέλυφος του κτηρίου και επιτυγχάνεται έτσι:

- ο περιορισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας για θέρμανση το χειμώνα και ψύξη το καλοκαίρι,
- η διαμόρφωση κατά το δυνατόν συνθηκών θερμικής άνεσης στον εσωτερικό χώρο,
- η διατήρηση των επιφανειακών θερμοκρασιών των δομικών στοιχείων σε επίπεδα αποτρεπτικά του σχηματισμού επιφανειακής συμπύκνωσης των υδρατμών της ατμόσφαιρας (δρόσου).

Με τον έλεγχο της θερμομονωτικής επάρκειας ελέγχεται η επαρκής θερμομονωτική προστασία του κτηρίου σύμφωνα με όσα προβλέπει ο Κ.Εν.Α.Κ. αλλά και ειδικότερα η Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 και αποτελεί το πρώτο βήμα της ενεργειακής μελέτης.

Ο έλεγχος θερμομονωτικής επάρκειας ουσιαστικά αντικαθιστά την μέχρι την έναρξη ισχύος του Κ.Εν.Α.Κ. μελέτη θερμομόνωσης του κτηρίου. Έτσι, δεν αποτελεί μια αυτοτελή διαδικασία, όπως προέβλεπε ο παλαιός Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτηρίων, αλλά ένα τμήμα μόνο της ενεργειακής μελέτης που προβλέπει ο Κ.Εν.Α.Κ.

Ο έλεγχος θερμομονωτικής επάρκειας είναι προφανώς υποχρεωτικός για κάθε νεοανεγειρόμενο κτήριο και κάθε ριζικώς ανακαινιζόμενο, ως αναπόσπαστο τμήμα της υποχρεωτικής γι' αυτά ενεργειακής μελέτης. Επιπλέον όμως, είναι υποχρεωτικός και για τα κτήρια που δεν υποχρεούνται στη σύνταξη ενεργειακής μελέτης, όπως:

- Για κτήρια, με εμβαδό μικρότερο των 50 m².
- Για υφιστάμενα κτήρια που έχουν χαρακτηριστεί παραδοσιακά ή διατηρητέα και ανακαινίζονται ριζικώς, εκτός αν οι επεμβάσεις για τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς αλλοιώνουν τα μορφολογικά του χαρακτηριστικά και κατ' ουσίαν αίρουν το χαρακτήρα του παραδοσιακού ή/και διατηρητέου. Σε μια τέτοια περίπτωση όμως η αδυναμία εφαρμογής του Κ.Εν.Α.Κ. θα πρέπει να τεκμηριώνεται πλήρως.
- Για χώρους που χρησιμοποιούνται ως χώροι λατρείας.
- Για μόνιμα κτήρια με διάρκεια ζωής που δεν υπερβαίνει τα 2 έτη.
- Για βιομηχανικές εγκαταστάσεις και εργαστήρια με εμβαδό μικρότερο των 50 m.
- Για κτήρια αγροτικών χρήσεων με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, των οποίων το εμβαδό δεν υπερβαίνει τα 50 cm.

Στα ήδη υφιστάμενα κτήρια, στα οποία δεν πρόκειται να γίνουν επεμβάσεις ριζικής ανακαίνισης, δεν υπάρχει η υποχρέωση τήρησης των απαιτήσεων θερμομονωτικής επάρκειας κατά τον Κ.Εν.Α.Κ.

7.2. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ

Λαμβάνοντας υπόψη την κλιματική ποικιλομορφία του ελλαδικού χώρου, ο Κ.Εν.Α.Κ. έχει διαχωρίσει όλη την ελληνική επικράτεια με βάση της βαθμονόμερες θέρμανσης της κάθε περιοχής σε 4 κλιματικές ζώνες, στηριζόμενος ταυτόχρονα και στην παλαιότερη διοικητική διαίρεση της χώρας σε νομούς.

Από τις 4 ζώνες θερμότερη είναι η Α' και ψυχρότερη η Δ'.

Ο αναλυτικός πίνακας στον οποίο καταγράφονται οι νομοί που περιλαμβάνονται στην κάθε ζώνη μαζί με ένα χάρτη της ελληνικής επικράτειας δίνεται στο άρθρο 6 του Κ.Εν.Α.Κ.

7.3. ΣΤΑΔΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ

Ο έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας αποτελεί το πρώτο βήμα της ενεργειακής μελέτης

Για την ορθή θερμομονωτική προστασία του κελύφους απαιτείται η επιλογή αφενός των κατάλληλων θερμομονωτικών υλικών που θα τοποθετηθούν με τη σωστή σειρά στρώσεων στα αδιαφανή δομικά στοιχεία και αφετέρου των κατάλληλου τύπου κουφωμάτων που θα καλύψουν τις θέσεις των ανοιγμάτων. Η καταλληλότητα του θερμομονωτικού υλικού ορίζεται από πλήθος παραμέτρων, ως βασικότερες των οποίων μπορούν να αξιολογηθούν η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ , το πάχος της θερμομονωτικής στρώσης, η συνεργασιμότητα του θερμομονωτικού υλικού με τα υλικά των υπολοίπων στρώσεων κτλ. Ομοίως, η καταλληλότητα του κουφώματος ορίζεται από τις διαστάσεις του κουφώματος, το υλικό και τον τύπο του πλαισίου (της κάσας του κουφώματος), τον τύπο του υαλοπίνακα (διπλός ή τριπλός) και το αέριο πλήρωσης μεταξύ των υαλοπινάκων.

Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. το κάθε δομικό στοιχείο, διαφανές ή αδιαφανές, οφείλει να δίνει τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας U μικρότερη μιας μέγιστης επιτρεπόμενης.

Ο έλεγχος θερμομονωτικής επάρκειας γίνεται σε δύο στάδια (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2, § 1.1.):

- Κατά το πρώτο στάδιο ελέγχεται η θερμική επάρκεια ενός εκάστου των επί μέρους δομικών στοιχείων του κτηρίου. Για να ικανοποιεί ένα δομικό στοιχείο τις απαιτήσεις θερμομονωτικής προστασίας του κανονισμού, θα πρέπει η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας $U_{\text{εξεταζ.}}$ αυτού του δομικού στοιχείου να μην υπερβαίνει την τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή θερμοπερατότητας U_{max} που ορίζει ο κανονισμός, ανά κλιματική ζώνη για κάθε κατηγορία δομικών στοιχείων. Πρέπει, δηλαδή να ισχύει:

$$U_{\text{εξεταζ.}} \leq U_{\text{max}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (7.1.)$$

- Κατά το δεύτερο στάδιο ελέγχεται η θερμική επάρκεια του συνόλου του κτηρίου. Για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του κανονισμού πρέπει η μέση τιμή θερμοπερατότητας του εξεταζόμενου κτηρίου (U_m) να μην υπερβαίνει τα όρια που θέτει ο κανονισμός για κάθε κτήριο ($U_{m, \text{max}}$), αυτού εντασσόμενου σε μια από τις κλιματικές ζώνες του ελλαδικού χώρου. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας ($U_{m, \text{max}}$) υπολογίζεται λαμβανομένου υπόψη του λόγου του συνόλου των εξωτερικών επιφανειών του κτηρίου (κατακόρυφων και οριζόντιων) προς τον όγκο του (A/V). Πρέπει δηλαδή να ισχύει:

$$U_m \leq U_{m, \text{max}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (7.2.)$$

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του U_{max} για κάθε δομικό στοιχείο και του $U_{m, \text{max}}$ για το σύνολο του κτηρίου ορίζονται στο άρθρο 8 του Κ.Εν.Α.Κ. (πίνακες Γ.1. και Γ.2.) και ομοίως στους πίνακες 6 και 7 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2.

Ο έλεγχος του πρώτου σταδίου οφείλει να γίνεται για κάθε επί μέρους δομικό στοιχείο του εξωτερικού κελύφους, διαφανές ή αδιαφανές. Μάλιστα ο κανονισμός προτρέπει (υποδεικνύει χωρίς να επιβάλλει) τη θερμομονωτική προστασία και των ενδιάμεσων διαχωριστικών δομικών στοιχείων, οριζόντιων και κατακόρυφων, μεταξύ διαμερισμάτων.

7.4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ U ΑΔΙΑΦΑΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για τον υπολογισμό της προβαλλόμενης αντίστασης στη ροή θερμότητας μέσω ενός δομικού στοιχείου ο Κ.Εν.Α.Κ. κάνει ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές σύμφωνα με τις οποίες:

- Η ροή θερμότητας είναι μονοδιάστατο μέγεθος και κάθετο στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου.
- Η ροή θερμότητας είναι ανεπηρέαστη από άλλες πηγές θερμότητας στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου και στο γειτονικό του περιβάλλον.
- Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι ανεπηρέαστες από τη θερμοκρασία.
- Τα δομικά υλικά είναι ομογενή και μισότροπα και βρίσκονται μεταξύ του σε τέλεια θερμική επαφή.

Βάσει των παραπάνω απλοποιητικών παραδοχών η αντίσταση που προβάλλει ένα μονοστρωματικό δομικό στοιχείο στη ροή θερμότητας είναι ίση με:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (7.3.)$$

όπου: R $[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$ η αντίσταση που προβάλλει στη ροή θερμότητας η συγκεκριμένη στρώση,
 d $[\text{m}]$ το πάχος της στρώσης,
 λ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της στρώσης,

Το σύνολο των θερμικών αντιστάσεων όλων των στρώσεων ενός πολυστρωματικού δομικού στοιχείου, που αποτελείται από ομογενείς στρώσεις υλικών, ορίζει την αντίσταση θερμοδιαφυγής (R_{ss}) και προκύπτει από το άθροισμα των επί μέρους αντιστάσεων της κάθε στρώσης κατά τη γενικευμένη σχέση:

$$R_{\Lambda} = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} = \sum_j R_j \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (7.4.)$$

Η σειρά των στρώσεων ενός δομικού στοιχείου πρακτικά δεν επηρεάζει τη ροή θερμότητας μέσω αυτού, επηρεάζει όμως την αξιοποίηση της θερμοχωρητικότητάς τους.

- Η τοποθέτηση της θερμομονωτικής στρώσης σε θέση πλησιέστερη προς την εσωτερική επιφάνεια περιορίζει τη θερμοχωρητικότητα του δομικού στοιχείου, δηλαδή την ικανότητά του να αποθηκεύει θερμότητα στη μάζα του.
- Αντίθετα, η τοποθέτηση της θερμομονωτικής στρώσης σε θέση πλησιέστερη προς την εξωτερική επιφάνεια επαυξάνει τη θερμοχωρητικότητά του.

Ωστόσο, η θερμοχωρητικότητα του δομικού στοιχείου επηρεάζεται καθοριστικά από τη μάζα του. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας. Στόχος είναι η αποθηκευόμενη ποσότητα θερμότητας να μπορεί να επαναποδοθεί στο εσωτερικό περιβάλλον του κτηρίου, όταν η θερμοκρασία του χώρου πέφτει σε χαμηλότερα επίπεδα από τη θερμοκρασία της μάζας του.

Η συνολική θερμική αντίσταση που προβάλλει ένα πολυστρωματικό δομικό στοιχείο, που αποτελείται από ομογενείς στρώσεις υλικών, ορίζεται από το άθροισμα των αντιστάσεων των επί μέρους στρώσεων και των αντιστάσεων του στρώματος αέρα εκατέρωθεν των όψεών του κατά την εξίσωση:

$$R_{o\Lambda} = R_i + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_a \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (7.5.)$$

όπου: $R_{o\Lambda}$ $[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$ η συνολική αντίσταση που προβάλλει στη ροή θερμότητας το δομικό στοιχείο,

n	$[-]$	το πλήθος των στρώσεων του δομικού στοιχείου,
R_i	$[m^2 \cdot K/W]$	η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο,
R_a	$[m^2 \cdot K/W]$	η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από το δομικό στοιχείο προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Οι θερμικές απώλειες μέσω ενός δομικού στοιχείου ορίζονται από το συντελεστή θερμοπερατότητας (U), που δίνει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται στη μονάδα του χρόνου σε σταθερό θερμοκρασιακό πεδίο μέσω της μοναδιαίας επιφάνειας ενός δομικού στοιχείου, όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα στις δύο όψεις του δομικού στοιχείου ισούται με τη μονάδα.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός δομικού στοιχείου ορίζεται από τη σχέση:

$$U = \frac{1}{R_{ολ.}} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (7.6.)$$

ή, σύμφωνα και με τη σχέση 7.5., στη γενική της έκφραση θα είναι:

$$\frac{1}{U} = R_i + \sum_{j=1}^n R_j + R_a \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (7.7.)$$

όπου:	U	$[W/(m^2 \cdot K)]$	ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου,
	n	$[-]$	το πλήθος των στρώσεων του δομικού στοιχείου,
	R_i	$[m^2 \cdot K/W]$	η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο,
	R_a	$[m^2 \cdot K/W]$	η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από το δομικό στοιχείο προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Καθώς ο συντελεστής θερμοπερατότητας εξαρτάται από τα πάχη των στρώσεων του δομικού στοιχείου και από τη συναγωγή που παρουσιάζει με τα στρώματα αέρα εκατέρωθεν των όψεών του, αύξηση ή μείωση του πάχους μιας στρώσης του υλικού επηρεάζει το συντελεστή θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου.

Ο κανονισμός εξειδικεύει την παραπάνω σχέση 7.7. λαμβάνοντας υπόψη και την ύπαρξη στρώματος αέρα μεταξύ των λοιπών στρώσεων του δομικού στοιχείου. Τότε, ορίζοντας ως R_δ την προβαλλόμενη αντίσταση αυτού του στρώματος αέρα, η σχέση 7.7. γίνεται:

$$U = \frac{1}{R_i + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + R_\delta + R_a} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (7.8.)$$

όπου:	U	$[W/(m^2 \cdot K)]$	ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου,
	n	$[-]$	το πλήθος των στρώσεων του δομικού στοιχείου,
	d	$[m]$	το πάχος της κάθε στρώσης του δομικού στοιχείου,
	λ	$[W/(m \cdot K)]$	ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της κάθε στρώσης,
	R_δ	$[m^2 \cdot K/W]$	η θερμική αντίσταση στρώματος αέρα σε τυχόν υφιστάμενο διάκενο ανάμεσα στις στρώσεις του δομικού στοιχείου, με την προϋπόθεση ότι ο αέρας του διακένου δεν επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον και θεωρείται πρακτικά ακίνητος,

- R_i [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$] η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο,
- R_a [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$] η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από το δομικό στοιχείο προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Οι τιμές των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας λ δίνονται στον πίνακα 2 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 και είναι ενδεικτικές. Επομένως κατά τη σύνταξη μιας ενεργειακής μελέτης η Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. ορίζει ότι:

- Για δομικά υλικά με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda \leq 0,18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,
 - εφόσον υπόκεινται σε υποχρέωση σήμανσης CE, θα γίνεται χρήση της τιμής του λ που αναγράφεται στην ετικέτα CE του προϊόντος βάσει του προτύπου προδιαγραφής τους ή βάσει ευρωπαϊκής τεχνικής έγκρισης,
 - εφόσον δεν υπόκεινται σε υποχρέωση σήμανσης CE, θα γίνεται χρήση της τιμής λ του υλικού από πιστοποιητικό διαπιστευμένου φορέα / εργαστηρίου.
- Για στρώση υλικού πάχους μικρότερου των 2 cm και $\lambda > 0,06 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, της οποίας η βασική λειτουργία δεν προορίζεται να παράσχει θερμομονωτική προστασία στο δομικό στοιχείο, μπορεί να γίνει χρήση των ενδεικτικών τιμών του πίνακα.

Στην ενότητα 2.1. ο κανονισμός ορίζει τις τιμές της θερμικής αντίστασης R_d και τον τρόπο υπολογισμού της θερμικής αντίστασης ολοκλήρου του δομικού στοιχείου,

- όταν η στρώση αέρα δεν έρχεται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (πρακτικά ακίνητο στρώμα αέρα) και
- όταν η στρώση έρχεται σε επαφή με τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος ή με του εσωτερικού χώρου.

Ομοίως, στην ίδια ενότητα καθορίζεται ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή θερμοπερατότητας U διαφόρων δομικών στοιχείων:

- Δομικού στοιχείου ερχόμενου σε επαφή με κλειστό θερμικό μη προστατευόμενο χώρο (μη θερμαινόμενο χώρο),
- δομικού στοιχείου ερχόμενου σε επαφή με το έδαφος (οριζόντιου και κατακόρυφου),
- οριζόντιας οροφής κάτω από μη θερμομονωμένη στέγη,
- σύνθετου δομικού στοιχείου,
- δομικού στοιχείου αποτελούμενου από ανομοιογενείς στρώσεις.

Σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 όλα τα δομικά στοιχεία των παθητικών ηλιακών συστημάτων –εκτός του άμεσου ηλιακού κέρδους– δεν ελέγχονται ως προς τη θερμομονωτική τους επάρκεια και δεν υποχρεώνονται να πληρούν τα όρια των μέγιστων επιτρεπόμενων τιμών U του κανονισμού.

Ειδικότερα, δεν ελέγχονται ως προς τη θερμομονωτική τους επάρκεια:

- ο τοίχος Trombe, ο τοίχος θερμικής μάζας και γενικώς οποιοσδήποτε τοίχος ή άλλο στοιχείο θερμικής συσσώρευσης,
- το διαχωριστικό δομικό στοιχείο μεταξύ του κυρίως χώρου του κτηρίου και του προσαρτημένου θερμοκηπίου, που θα θεωρείται ως εξωτερική επιφάνεια του κελύφους προς μη θερμαινόμενο χώρο, καθώς το προσαρτημένο θερμοκήπιο λογίζεται ως χώρος που δεν θερμαίνεται.

Σε κάθε περίπτωση η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας U του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου οφείλει να είναι μικρότερη της μέγιστης τιμής U_{max} .

Αν κάτι τέτοιο δεν ισχύει θα πρέπει να βελτιωθεί η συμπεριφορά του είτε με αύξηση του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης του δομικού στοιχείου είτε με αντικατάσταση του θερμομονωτικού υλικού με άλλο με καλύτερη τιμή λ.

Διευκρινίζεται ότι κατά τον έλεγχο της θερμομονωτικής επάρκειας το κτήριο θεωρείται πανταχόθεν ελεύθερο, αδιαφόρως της πραγματικής κατάστασης και της γειννιάσής του με άλλα κτήρια του αυτού ή του όμορου οικοπέδου. Ωστόσο, κατά την ενεργειακή επιθεώρηση λαμβάνεται υπόψη η πραγματική κατάσταση και οι επιφάνειες οι ερχόμενες σε επαφή με όμορο κτίσμα λαμβάνονται ως αδιαβατικές εφόσον είναι γνωστό ότι η τιμή θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου του όμορου κτίσματος είναι η ίδια με την τιμή θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου του εξεταζόμενου κτηρίου ή ότι την προσεγγίζει. Διαφορετικά οι επιφάνειες προς το όμορο κτίσμα μπορεί να ληφθούν ερχόμενες σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο.

7.5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ U ΔΙΑΦΑΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στα διαφανή δομικά στοιχεία, δηλαδή στα κουφώματα, η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας του κουφώματος (U_w) μπορεί:

- είτε να υπολογισθεί αναλυτικά
- είτε να θεωρηθεί δεδομένη με αποδοχή της πιστοποιημένης τιμής που διαθέτει ο κατασκευαστής.

Στην περίπτωση του αναλυτικού υπολογισμού η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας του κουφώματος προκύπτει από τους συντελεστές θερμοπερατότητας του πλαισίου του κουφώματος και του υαλοπίνακα κατά την ποσοστιαία αναλογία των εμβαδών των δύο υλικών στην επιφάνεια του κουφώματος, λαμβανομένης υπόψη και της γραμμικής θερμογέφυρας που αναπτύσσεται μεταξύ πλαισίου και υαλοπίνακα, όπως περιγράφεται παρακάτω για μονό και για διπλό κούφωμα. Όταν στο κούφωμα περιλαμβάνονται και αδιαφανή μέρη, πέραν του πλαισίου, λαμβάνονται και αυτά στον υπολογισμό.

Στην περίπτωση που ο μελετητής επιλέξει να χρησιμοποιήσει την τιμή θερμοπερατότητας του κουφώματος που δίνει ο κατασκευαστής του, θα πρέπει στη μελέτη να συνυποβάλει και το σχετικό πιστοποιητικό ελέγχου από διαπιστευμένο εργαστήριο βάσει του προτύπου προδιαγραφών του υλικού για σήμανση CE.

Ο αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή U_w ενός κουφώματος όπως ορίζεται στην ενότητα 2.2. της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 δίνεται από τον τύπο:

$$U_w = \frac{A_f \cdot U_f + A_g \cdot U_g + l_g \cdot \Psi_g}{A_f + A_g} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (7.9.)$$

όπου	U_w	$[W/(m^2 \cdot K)]$	ο συντελεστής θερμοπερατότητας όλου του κουφώματος,
	U_f	$[W/(m^2 \cdot K)]$	ο συντελεστής θερμοπερατότητας πλαισίου του κουφώματος,
	U_g	$[W/(m^2 \cdot K)]$	ο συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα του κουφώματος (μονού, διπλού ή περισσότερων φύλλων),
	A_f	$[m^2]$	το εμβαδό επιφάνειας του πλαισίου του κουφώματος,
	A_g	$[m^2]$	το εμβαδό επιφάνειας του υαλοπίνακα του κουφώματος,
	l_g	$[m]$	το μήκος της θερμογέφυρας του υαλοπίνακα του κουφώματος (το μήκος συναρμογής πλαισίου - υαλοπίνακα, δηλαδή η περίμετρος του υαλοπίνακα),

Ψ_g [W/(m·K)] ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα του κουφώματος.

Στην ίδια ενότητα παρουσιάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας:

- ενός μονού κουφώματος που περιλαμβάνει και πέταμα,
- ενός διπλού κουφώματος.

7.6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ U ΤΟΙΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ

Ειδική αναφορά γίνεται στον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός τοιχοπετάσματος και υαλοπετάσματος. Ο υπολογισμός γίνεται σε ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα του τοιχοπετάσματος, το οποίο επαναλαμβάνεται περισσότερες της μιας φορές στην όψη. Εάν σε ένα τοιχοπέτασμα εμφανίζονται περισσότερα του ενός αντιπροσωπευτικά τμήματα, τότε υπολογίζεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας κάθε διαφορετικού αντιπροσωπευτικού τμήματος και ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$U_{cw} = \frac{\sum_{j=1}^n (U_{cw,j} \cdot A_j)}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (7.10.)$$

όπου U_{cw} [W/(m²·K)] ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του τοιχοπετάσματος,
 $U_{cw,j}$ [W/(m²·K)] ο συντελεστής θερμοπερατότητας του τοιχοπετάσματος j ,
 A_j [m²] το εμβαδό του αντιπροσωπευτικού τμήματος.

7.7. Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ

Η έννοια των θερμογεφυρών εισήχθη για πρώτη φορά στον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης ενός δομικού στοιχείου και γι' αυτό το λόγο στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. γίνεται εκτενής αναφορά τόσο στη φύση της θερμογέφυρας και στον τρόπο επηρεασμού των θερμικών ροών μέσω ενός δομικού στοιχείου, όσο και στον τρόπο συνυπολογισμού τους.

Ο κανονισμός διαχωρίζει τις θερμογέφυρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στις σημειακές και στις γραμμικές. Τις σημειακές, επειδή εμφανίζονται σε σημεία μόνο του κτηρίου και επειδή η επίδρασή τους στις ανταλλαγές θερμότητας δεν είναι μεγάλη, ο κανονισμός δεν τις λαμβάνει υπόψη του στους υπολογισμούς. Αντιθέτως, οι γραμμικές θερμογέφυρες εκτείνονται κατά το μήκος νοητών ή πραγματικών ακμών, που διαμορφώνονται επάνω στην επιφάνεια του κελύφους και επηρεάζουν ουσιαστικά τη θερμική συμπεριφορά του, αίροντας την απλοποιητική παραδοχή περί μονοδιάστατης ροής της θερμότητας. Οι γραμμικές θερμογέφυρες έχουν σημαντικά μεγαλύτερη επίδραση στη θερμική συμπεριφορά του κελύφους και γι' αυτό λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό κατά τη μαθηματική σχέση:

$$\Psi \cdot \ell \quad [W/K] \quad (7.11.)$$

όπου Ψ [W/(m·K)] ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας και
 ℓ [m] το συνολικό μήκος της θερμογέφυρας, που αναπτύσσεται στο περίβλημα του κτηρίου.

Για την αποφυγή λαθών στην εύρεση και στον υπολογισμό των θερμογεφυρών (π.χ. διπλή καταγραφή τους) είναι σκόπιμο να καταγράφονται και να υπολογίζονται ανάλογα με τη θέση εμφάνισής τους στο κτήριο:

- **κατακόρυφες θερμογέφυρες**, που εμφανίζονται στη συναρμογή των κατακόρυφων δομικών στοιχείων μεταξύ τους,
- **οριζόντιες θερμογέφυρες**, που εμφανίζονται στη συναρμογή των οριζόντιων δομικών στοιχείων με τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία και
- **θερμογέφυρες κουφωμάτων**, που εμφανίζονται στη συναρμογή των κουφωμάτων με τα συμπαγή δομικά στοιχεία.

Η αναλυτική περιγραφή των θερμογεφυρών και ο τρόπος προσδιορισμού τους γίνεται στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2 στην ενότητα 2.4., ενώ στο παράρτημα της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. στη σειρά πινάκων 16α έως 16ιβ δίνονται για διαφορετικές περιπτώσεις θερμογεφυρών (που καταγράφονται με τα σκαριφήματά τους) οι τιμές του αντίστοιχου συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ .

Σε περίπτωση που ο τύπος μιας θερμογέφυρας δεν συναντάται στους παραπάνω πίνακες, ο μελετητής μπορεί στους υπολογισμούς να λάβει κατά προσέγγιση την τιμή της πλησιέστερης ως προς τη γεωμετρία της περίπτωση θερμογέφυρας.

7.8. Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Για την εύρεση του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας όλου του κτηρίου (U_m) και τον έλεγχο της θερμικής του επάρκειας είναι απαραίτητος ο υπολογισμός ορισμένων γεωμετρικών μεγεθών του κτηρίου και συγκεκριμένα:

- Ο υπολογισμός των εμβαδών όλων των επί μέρους δομικών στοιχείων.
- Ο υπολογισμός των μηκών των γραμμικών θερμογεφυρών.
- Ο όγκος του κτηρίου.

Από τη μαθηματική σχέση A/V , που ορίζει το λόγο του εμβαδού των επιφανειών όλου του εξωτερικού κελύφους του κτηρίου (A) προς τον όγκο που αυτό περικλείει (V), προκύπτει ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας $U_{m, \max}$, από την τιμή του οποίου ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας U_m του κτηρίου δεν επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερος.

- Για την εύρεση του εμβαδού A υπεισέρχονται στον υπολογισμό οι εξωτερικές επιφάνειες του κελύφους στο σύνολό τους και με τις εξωτερικές τους διαστάσεις, παρακολουθώντας απόλυτα τη γεωμετρία του κτηρίου.
- Αντίστοιχα, ο όγκος V είναι ο όγκος του κτηρίου που περικλείεται από όλες αυτές τις επιφάνειες.

Ο κανονισμός ορίζει αναλυτικά τις επιφάνειες και τον όγκο του κτηρίου που υπεισέρχονται ή δεν υπεισέρχονται στον υπολογισμό του λόγου A/V . Η σχετική αναφορά γίνεται στην ενότητα 2.5. της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2.

7.9. Ο ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΟΛΟΥ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ (U_m)

Ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας όλου του κτηρίου (U_m) προκύπτει από το συνυπολογισμό των συντελεστών όλων των επί μέρους δομικών στοιχείων του περιβλήματος του

θερμαινόμενου χώρου του κτηρίου κατά την ποσοστιαία αναλογία των αντίστοιχων εμβαδών τους. Στον υπολογισμό του U_m θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι γραμμικές θερμογέφυρες που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία, ιδίως στα όρια της περιμέτρου των δομικών στοιχείων.

Στη γενική του έκφραση ο υπολογισμός του U_m προκύπτει από τον τύπο:

$$U_m = \frac{\sum_{j=1}^n A_j \cdot U_j \cdot b + \sum_{i=1}^v l_i \cdot \Psi_i \cdot b}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (7.12.)$$

όπου	U_m	$[W/(m^2 \cdot K)]$	ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κελύφους όλου του κτηρίου,
	n	$[-]$	το πλήθος των επί μέρους δομικών στοιχείων στο κέλυφος του κτηρίου,
	v	$[-]$	το πλήθος των θερμογεφυρών που αναπτύσσονται στα εξωτερικά ή εσωτερικά όρια κάθε επιφάνειας A_j του κελύφους,
	A_j	$[m^2]$	το εμβαδό επιφάνειας που καταλαμβάνει το κάθε δομικό στοιχείο στη συνολική επιφάνεια του κελύφους του κτηρίου,
	U_m	$[W/(m^2 \cdot K)]$	ο συντελεστής θερμοπερατότητας του κάθε δομικού στοιχείου j του κελύφους του κτηρίου,
	l_j	$[m]$	το συνολικό μήκος του κάθε τύπου θερμογέφυρας που αναπτύσσεται στο περίβλημα του κτηρίου,
	Ψ_j	$[W/(m \cdot K)]$	ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του κάθε τύπου θερμογέφυρας που αναπτύσσεται στο περίβλημα του κτηρίου,
	b	$[-]$	μειωτικός συντελεστής (όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα για κάθε τύπο δομικού στοιχείου).

Το ευρισκόμενο πηλίκο U_m συγκρίνεται με αυτό που ορίζεται ως μέγιστο επιτρεπόμενο $U_{m,max}$ από το λόγο A/V του πίνακα 7 για κάθε κλιματική ζώνη.

Πρέπει πάντα να ισχύει:

$$U_m \leq U_{m,max} \quad (7.13.)$$

Αν δεν ικανοποιείται αυτή η συνθήκη, ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται από την αρχή, έχοντας προηγουμένως βελτιώσει τα θερμοτεχνικά χαρακτηριστικά των επί μέρους δομικών στοιχείων (π.χ. αύξηση του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης των αδιαφανών στοιχείων, βελτίωση της ποιότητας των κουφωμάτων, μείωση του μεγέθους των ανοιγμάτων, περιορισμό των θερμογεφυρών κ.ά.).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην τιμή που λαμβάνει ο μειωτικός συντελεστής b για κάθε διαφορετική μορφή δομικού στοιχείου: ερχόμενου σε επαφή με τον αέρα, σε επαφή με το έδαφος, σε επαφή με χώρο χαμηλότερης θερμοκρασίας (μη θερμαινόμενο χώρο) ή με θερμαινόμενο χώρο του ίδιου κτηρίου που δεν συμπεριλαμβάνεται στο χώρο θερμικής προστασίας κτλ.

Αναλυτικά, ο τρόπος υπολογισμού του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας U_m του κτηρίου παρουσιάζεται στην ενότητα 2.6. της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2.

Ο έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας του κτιριακού κελύφους είναι απαραίτητο να προηγηθεί της επεξεργασίας των στοιχείων στο λογισμικό πρόγραμμα που θα δώσει τις ενεργειακές καταναλώσεις, καθώς πολλά στοιχεία του υπολογισμού (εμβαδά, τιμές του U κ.τ.λ.), ζητούνται να εισαχθούν ως δεδομένα για τη ροή του λογισμικού προγράμματος.

8. ΘΕΜΑΤΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΟΦΕΙΛΟΜΕΝΑ ΣΕ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΥΔΡΑΤΜΩΝ

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ελλιπής θερμομονωτική προστασία σε μια κτηριακή κατασκευή, πέραν του αισθήματος μειωμένης θερμικής άνεσης που μπορεί να παρέχει, ενδέχεται να αποδειχθεί και το βασικό αίτιο για την εμφάνιση προβλημάτων υγρασίας στον εσωτερικό χώρο. Η υγρασία αυτής της μορφής οφείλεται στη συμπύκνωση των υδρατμών του αέρα, όταν αυτός έρχεται σε επαφή με τις ψυχρές επιφάνειες των δομικών στοιχείων και να φτάσει σε κατάσταση κορεσμού.

Εκδηλώνεται είτε ως επιφανειακή συμπύκνωση των υδρατμών είτε ως συμπύκνωση των υδρατμών στο εσωτερικό ενός υδρατμοδιαπερατού δομικού στοιχείου κατά τη διάχυσή τους μέσω αυτού.

Αν και η δράση της υγρασίας αυτών των μορφών είναι σχετικά περιορισμένη, μπορεί να προκαλέσει ποικίλες φυσικές, χημικές και μηχανικές αλλοιώσεις στα υλικά, όπως αποχρωματισμούς, αποφλοιώσεις, αποκολλήσεις ή διαβρώσεις, μπορεί να μειώσει ή και να εξαλείψει τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες, να συμβάλει στην ανάπτυξη μικροοργανισμών, αλλά και να προκαλέσει βλάβες στην υγεία των ενοίκων λόγω ανθυγιεινότητας του χώρου. Σε ορισμένες, μάλιστα, περιπτώσεις (π.χ. τοιχογραφιών και ζωγραφικού διακόσμου επί των επιφανειών των δομικών στοιχείων) μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα επιζήμια λόγω της φθοροποιού της δράσης.

Ειδικά για τα θερμομονωτικά υλικά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η προσβολή τους από υγρασία μπορεί ουσιαστικά να ακυρώσει το ρόλο τους στα δομικά στοιχεία. Τα θερμομονωτικά υλικά οφείλουν τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες στον εγκλωβισμό μικρών ποσοτήτων αέρα μέσα στους πόρους τους. Όταν το υλικό διαβρέχεται ο αέρας εκτοπίζεται από το νερό που καταλαμβάνει τη θέση του. Τότε η θερμομονωτική ικανότητα του υλικού περιορίζεται ή χάνεται, αναλόγως του βαθμού προσβολής, δεδομένου ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νερού (λ) είναι περίπου 24 φορές μεγαλύτερος του αέρα και άρα η προβαλλόμενη αντίσταση στη ροή θερμότητας στην περίπτωση ενός πλήρως από νερό εμποτισθέντος υλικού μπορεί να μειωθεί μέχρι και στο $1/24$.

Η έγκαιρη επισήμανση του κινδύνου και η λήψη των απαραίτητων μέτρων προστατεύει τα δομικά υλικά και συμβάλλει στην ορθή λειτουργία τους στο δομικό σύστημα. Σε υφιστάμενες κατασκευές το φαινόμενο μπορεί κατά κανόνα να αντιμετωπισθεί απλά, με εύκολες λύσεις και χωρίς ιδιαίτερα υψηλή δαπάνη. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις, στις οποίες η κατάσταση είναι μη αναστρέψιμη, το πρόβλημα δεν είναι πλήρως αντιμετωπίσιμο και οι όποιες προτεινόμενες λύσεις αποδεικνύονται αποσπασματικές και αναποτελεσματικές.

8.2. Η ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει την ικανότητα να συγκρατεί υδρατμούς, που δεν είναι ορατοί και γι' αυτό δεν γίνονται αντιληπτοί. Αυτή η ικανότητα του αέρα, δηλαδή να συγκρατεί στη μάζα του υδρατμούς, εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση και από τη θερμοκρασία του.

Από τους δύο αυτούς παράγοντες η επίδραση της ατμοσφαιρικής πίεσης, καθώς απειροελάχιστα μεταβάλλεται σε μια περιοχή, θεωρείται πρακτικά ασήμαντη και γι' αυτό το λόγο δεν λαμβάνεται υπόψη. Αντιθέτως, η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις τόσο μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, όσο και μεταξύ των διαφορετικών χώρων του εσωτερικού περιβάλλοντος και γι' αυτό η επίδραση της θεωρείται ουσιαστική και είναι αυτή που

καθορίζει την ικανότητα του αέρα να συγκρατεί τους υδρατμούς. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες ο αέρας μπορεί να συγκρατήσει μεγαλύτερη ποσότητα υδρατμών, ενώ σε χαμηλότερες συγκρατεί μικρότερη.

Η ποσότητα των υδρατμών του αέρα που περιέχονται στη μονάδα του όγκου του ορίζει την **απόλυτη υγρασία** του αέρα και εκφράζεται σε kg/m³.

Η μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας στη μονάδα του όγκου του για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, καλείται **ποσότητα κορεσμού** και η θερμοκρασία αυτή **θερμοκρασία (σημείο) δρόσου ή θερμοκρασία κορεσμού (θ_s)**.

Όταν η θερμοκρασία του αέρα υπερβεί τη θερμοκρασία δρόσου, αυτός παύει να είναι κορεσμένος. Τότε ο αέρας περιέχει ποσότητα υδρατμών μικρότερη από αυτή του σημείου κορεσμού. Σ' αυτή την περίπτωση η κατάσταση του αέρα χαρακτηρίζεται από τη **σχετική υγρασία**, που ορίζεται ως το πηλίκο της συγκέντρωσης των μορίων υδρατμού (C) που υπάρχουν σε κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία προς τη συγκέντρωση των μορίων σε κατάσταση κορεσμού (C_s) στον ίδιο όγκο αέρα και στην ίδια θερμοκρασία, εκφρασμένο επί τοις εκατό:

$$\varphi = \frac{C}{C_s} \times 100 \quad [\%] \quad (8.1.)$$

Αντιθέτως, πτώση της θερμοκρασίας κάτω από τη θερμοκρασία δρόσου (θ < θ_s) επιφέρει μείωση της ικανότητας συγκράτησης του αέρα και άρα πλεόνασμα μιας ποσότητας υδρατμών, που, επειδή δεν μπορούν να συγκρατηθούν, υδροποιούνται και εναποτίθενται υπό μορφή μικρών σταγόνων επάνω στις περιβάλλουσες επιφάνειες. Αυτό είναι το **φαινόμενο της δρόσου**.

8.3. Η ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ (ΔΡΟΣΟΣ)

8.3.1. Η εκδήλωση του φαινομένου

Όπως προαναφέρθηκε, όταν η περιεχόμενη ποσότητα υδρατμών φθάσει στη μέγιστη δυνάμενη να συγκρατηθεί, τότε ο αέρας βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού (φ=100%). Περαιτέρω αύξηση της απόλυτης υγρασίας του αέρα ή περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας του δημιουργεί πλεονάζοντες υδρατμούς, που, επειδή δεν μπορούν απ' αυτόν να συγκρατηθούν, υδροποιούνται και επικάθονται στις περιβάλλουσες ψυχρές επιφάνειες υπό μορφή σταγονιδίων.

Το φαινόμενο εμφανίζεται κυρίως το χειμώνα, για παράδειγμα, με το θάμπωμα των υαλοπινάκων των εξωτερικών κουφωμάτων. Ο υαλοπίνακας έχοντας μεγάλη θερμική αγωγιμότητα ψύχεται εύκολα με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας του να παρακολουθεί και ο αέρας του εσωτερικού χώρου που έρχεται σ' επαφή μ' αυτόν λόγω μετάδοσης της θερμότητας. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα πέφτει κάτω από τη θερμοκρασία δρόσου και η ποσότητα των περιεχόμενων υδρατμών, μη δυνάμενη πλέον να συγκρατηθεί, συμπυκνώνεται και επικάθεται υπό μορφή σταγονιδίων επάνω στον υαλοπίνακα.

Με δύο τρόπους μπορεί επομένως να προκληθεί επιφανειακή συμπύκνωση:

- Με πτώση της θερμοκρασίας του αέρα και άρα μείωση της ποσότητας υδρατμών που μπορεί να συγκρατηθεί.
- Με αύξηση της περιεχόμενης ποσότητας υδρατμών στην ίδια θερμοκρασία αέρα.

Παράγοντες που ευνοούν την εκδήλωση του φαινομένου κυρίως είναι:

- **Η ανεπαρκής θερμομονωτική προστασία των δομικών στοιχείων των κατασκευών.** Η εσωτερική του επιφάνεια παρουσιάζει τότε θερμοκρασία αρκετά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του χώρου. Αν η επιφανειακή του θερμοκρασία υπολείπεται της θερμοκρασίας

δρόσου για τα δεδομένα υγρασίας του χώρου, στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου θα σχηματισθεί συμπύκνωση.

- **Η θερμική αδράνεια των δομικών υλικών.** Κατά τη θέρμανση ενός ψυχρού χώρου τα δομικά υλικά των περιμετρικών δομικών στοιχείων δεν παρακολουθούν με τον ίδιο ρυθμό τη θέρμανση του αέρα του χώρου. Κυρίως τα βαριά υλικά παρουσιάζουν υψηλή θερμική αδράνεια και καθυστερούν να θερμανθούν. Αν σ' αυτό το διάστημα της χρονικής υστέρησης η επιφανειακή τους θερμοκρασία παραμένει χαμηλότερη της θερμοκρασίας δρόσου, θα σχηματισθεί επιφανειακή συμπύκνωση.
- **Η παραγόμενη υγρασία σ' ένα χώρο.** Σε χώρους με έντονη παραγωγή υδρατμών αυξάνεται η σχετική υγρασία και, αν ο αέρας του χώρου με την υψηλή συγκέντρωση υδρατμών έρθει σε επαφή με μια χαμηλής θερμοκρασίας επιφάνεια, θα φθάσει εύκολα τη θερμοκρασία κορεσμού και να εναποθέσει την περίσσεια υδρατμών που δεν θα μπορεί να συγκρατήσει.
- **Η διακοπή της θέρμανσης του χώρου.** Παρατηρείται συνήθως σε υπνοδωμάτια κατά τη διάρκεια της νύκτας, όταν διακόπτεται η θέρμανση και αυξάνεται η ποσότητα των υδρατμών του αέρα λόγω της αναπνοής των ατόμων που βρίσκονται σ' αυτά. Και πάλι λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας και της αύξησης των παραγόμενων υδρατμών μέσω της αναπνοής η σχετική υγρασία φθάνει σε κατάσταση κορεσμού και εναποθέτει την περίσσεια των υδρατμών υπό μορφή σταγονιδίων επάνω στις ψυχρότερες επιφάνειες.

Στις παλαιές κατασκευές δυνητικά ευνοείται περισσότερο η ανάπτυξη του φαινομένου της δρόσου, επειδή αυτές στερούνται θερμομονωτικής προστασίας στα επί μέρους δομικά τους στοιχεία (τοίχους, δάπεδα, οροφές κ.ά.) και παρέχουν έτσι ανεπαρκή θερμική προστασία· αλλά και επειδή ενδεχομένως έχουν –οι ακόμη παλαιότερες κατασκευές– μεγάλο πάχος τοίχους από βαριά υλικά που παρουσιάζουν υψηλή θερμική αδράνεια. Ωστόσο, σ' όλα αυτά τα κτήρια την εμφάνιση του φαινομένου περιορίζει πολλές φορές σημαντικά η κακή αεροστεγανότητά τους, επειδή παρουσιάζουν αυξημένο αριθμό εναλλαγών αέρα ανά ώρα, που επιτρέπει την εκτόνωση των συγκεντρούμενων υδρατμών στο εξωτερικό περιβάλλον. Αντίθετα, σε ένα αεροστεγώς προστατευμένο κτήριο, που όμως παραμένει ανεπαρκώς θερμομονωμένο, το φαινόμενο μπορεί πολύ ευκολότερα να εμφανιστεί· π.χ. σε ένα παλαιό κτήριο, στο οποίο αντικαταστάθηκαν τα παλαιά κουφώματα με σύγχρονα αεροστεγή με διπλούς υαλοπίνακες, αλλά δεν πραγματοποιήθηκε καμία άλλη επέμβαση στα αδιαφανή δομικά στοιχεία (τοίχους, δάπεδο, οροφή) και παρέμειναν χωρίς θερμομόνωση, ο κίνδυνος συμπύκνωσης των υδρατμών του αέρα του εσωτερικού χώρου στις επιφάνειες των χαμηλής θερμοκρασίας δομικών στοιχείων προβάλλει ιδιαίτερα αυξημένος.

8.3.2. Κύρια χαρακτηριστικά

Η υγρασία συμπύκνωσης εμφανίζεται είτε υπό μορφή σταγονιδίων επάνω στις αδιάβροχες επιφάνειες (μέταλλα, υαλοπίνακες, μάρμαρα, υαλωμένα πλακίδια) είτε υπό μορφή εμποτισμού των υλικών, καθιστώντας συχνά πιο έντονο το χρώμα τους (γύψινες επιφάνειες, επιχρίσματα, διακοσμητικές πλίνθοι κ.τ.λ.). Μάλιστα η ανάπτυξη μυκήτων και η προσκόλληση της σκόνης της ατμόσφαιρας στις υγρές επιφάνειες δίνουν την εικόνα μικρών γκρίζων κηλίδων, που με την πάροδο του χρόνου απλώνονται σε όλο και μεγαλύτερη έκταση.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της υγρασίας συμπύκνωσης, που βοηθούν στη διάκριση από άλλες μορφές υγρασίας, συνήθως είναι:

- **Ο παροδικός της χαρακτήρας.** Εκδηλώνεται κατά την ψυχρή περίοδο και κυρίως κατά τη διάρκεια των χαμηλών εξωτερικών θερμοκρασιών. Αντιθέτως, από την άνοιξη αρχίζει το φαινόμενο να υποχωρεί και σύντομα, όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία, εξαφανίζεται. Αφήνει όμως συχνά το στίγμα της, που είναι οι μικρές μαύρες κηλίδες (από τους ρύπους) και οι αναπτυσσόμενοι μύκητες.
- **Ο περιορισμός της δράσης της στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων.** Η συμπύκνωση δεν προχωρεί σε βάθος στη μάζα των δομικών στοιχείων και επηρεάζει κατά κανόνα την επιφανειακή στρώση (επιχρίσματα, σπατουλαρίσματα, βαφές).
- **Η επιλογή των ψυχρών επιφανειών.** Σε ένα δομικό στοιχείο κατασκευασμένο από διαφορετικά δομικά υλικά εκδηλώνεται πρώτα σ' αυτά που παρουσιάζουν μεγάλη μάζα (δηλαδή σ' αυτά που είναι βαρύτερα) και άρα παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμική αδράνεια. Π.χ. σε έναν τοίχο κατασκευασμένο από πλίνθους και πέτρες η συμπύκνωση θα εκδηλωθεί πρωτίστως στις θέσεις που βρίσκονται οι πέτρες. Σε μια πλάκα με διαδοκιδώσεις (πλάκα Zöllner) θα εμφανιστεί στη θέση των δοκίδων, περιγράφοντας με έναν ελαφρό εμποτισμό και επισκότιση του χρώματος τη θέση τους στην πλάκα, πίσω από το οροφокονίαμα. Ομοίως, πιο εύκολα εκδηλώνεται σε μια εξωτερική δίεδρη ή τρίεδρη γωνία, διότι εκεί παρουσιάζονται μεγαλύτερες θερμικές απώλειες.

Ωστόσο, θα πρέπει κανείς με μεγάλη προσοχή να αποφαινεται για την εκδήλωση του φαινομένου, αφενός διότι ορισμένα χαρακτηριστικά της υγρασίας συμπύκνωσης μπορεί να αποτελούν ίδιο και άλλων μορφών υγρασίας και αφετέρου διότι μπορεί να υπάρχει συνδυασμός αιτίων και τα χαρακτηριστικά της άλλης μορφής υγρασίας να είναι ισχυρότερα και να επικριάζουν αυτά της υγρασίας συμπύκνωσης (π.χ. υγρασία εδάφους και υγρασία συμπύκνωσης με επικρατέστερα τα χαρακτηριστικά της υγρασίας εδάφους). Έτσι, η εσφαλμένη διάγνωση μπορεί να οδηγήσει και σε εσφαλμένα μέτρα αντιμετώπισης, που στην καλύτερη περίπτωση μπορεί να αποδειχθούν αναποτελεσματικά, ενώ στη χειρότερη μπορεί να λειτουργήσουν επιβαρυντικά για την κατασκευή. Τέτοια λανθασμένα μέτρα μπορεί να είναι, για παράδειγμα, η στεγανοποίηση του δομικού στοιχείου, η επάλειψη της επιφάνειάς του με μια αδιαπέρατη από τους υδρατμούς βαφή κ.ά.

8.3.3. Η αντιμετώπιση

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος προϋπόθεση αποτελεί η διάγνωση του αιτίου που προκαλεί την εκδήλωση του φαινομένου και η εξάλειψή του. Κατά κανόνα τα μέτρα οφείλουν να αποσκοπούν προς μία από τις εξής δύο κατευθύνσεις ή συνδυασμό τους, ανάλογα με την περίπτωση:

- Άνοδο της θερμοκρασίας της ψυχρής επιφάνειας, επί της οποίας εκδηλώνεται το φαινόμενο.
- Μείωση της ποσότητας των υδρατμών του αέρα του χώρου.

Στην πρώτη περίπτωση ως πλέον πρόσφορη λύση αποδεικνύεται η καλή θερμομονωτική προστασία, καθώς περιορίζει τις θερμικές απώλειες και άρα βοηθάει τα δομικά στοιχεία να αναπτύξουν υψηλότερες θερμοκρασίες. Εναλλακτικά, βοηθάει προς την ίδια κατεύθυνση και η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, καθώς αυξάνεται τότε και ικανότητά του να συγκρατεί υδρατμούς και άρα μειώνεται η σχετική του υγρασία.

Στη δεύτερη περίπτωση ως πλέον πρόσφορο μέτρο αποδεικνύεται ο καλός αερισμός του χώρου. Ιδίως σε χώρους με έντονη παραγωγή υδρατμών (π.χ. μπάνια, κουζίνες κ.τ.λ.) η εκτόνωση των παραγόμενων υδρατμών στο εξωτερικό περιβάλλον και όχι ο εμπλουτισμός του εσωτερικού αέρα του

χώρου με αυτούς αποτελεί την ιδανική λύση. Έτσι, οι παραγόμενοι υδρατμοί σε ένα χώρο θα πρέπει κατά τη χρήση του χώρου (π.χ. κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος) ή μετά τη χρήση του (π.χ. μετά το μπάνιο) να οδηγούνται προς τα έξω και όχι στους υπόλοιπους χώρους του διαμερίσματος.

Και στις δύο περιπτώσεις πάντως κοινό παρονομαστή των ενδεικνυόμενων ενεργειών αποτελεί η μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα που έρχεται σε επαφή με τις επιφάνειες, δηλαδή η ταπείνωση της θερμοκρασίας κορεσμού (θερμοκρασίας δρόσου). Έτσι, για παράδειγμα, ακόμη και στην περίπτωση ενός απλού αερισμού απαιτείται προσοχή, διότι ο νέος «καθαρός» αέρας που θα αντικαταστήσει τον κορεσμένο με υδρατμούς του εσωτερικού χώρου δεν πρέπει να παρουσιάζει υψηλότερη θερμοκρασία από αυτόν του εσωτερικού περιβάλλοντος, καθώς τότε υπάρχει ο κίνδυνος ο νέος θερμός αέρας, ερχόμενος σε επαφή με τις ψυχρές επιφάνειες του εσωτερικού χώρου, να χάσει μέρος της θερμότητάς του και αντί να μειώσει, να αυξήσει τη σχετική του υγρασία και να επιδεινώσει την κατάσταση.

Το φαινόμενο είναι σύνηθες σε υπόγειους μη θερμαινόμενους χώρους, που λόγω θερμικής αδράνειας των υλικών κατασκευής των δομικών τους στοιχείων διατηρούν χαμηλή τη θερμοκρασία τους ακόμη και κατά την έναρξη της θερινής περιόδου, με αποτέλεσμα ο θερμός αέρας που εισέρχεται σ' αυτούς να ψύχεται και να ανεβάζει τη σχετική υγρασία του, φθάνοντας ενίοτε σε κατάσταση κορεσμού.

Το ίδιο μπορεί να συμβεί και σε υπόσκαφα κτήρια, στα οποία ρυθμιστικός παράγοντας της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου και του αισθήματος δροσιάς σ' αυτά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού αποτελεί το έδαφος που τα περιβάλλει. Φαινόμενα συμπύκνωσης των υδρατμών μπορούν να εκδηλωθούν στις θερμότερες ημέρες του καλοκαιριού, όταν ο θερμός αέρας που εισέρχεται στους δροσερούς χώρους χάνει μέρος της θερμότητάς του, μειώνεται η θερμοκρασία του και ανεβαίνει η σχετική υγρασία του, ενδεχομένως μέχρι κατάσταση κορεσμού.

8.3.4. Έλεγχος για το σχηματισμό επιφανειακής συμπύκνωσης

Ο αέρας που έρχεται σε επαφή με μια ψυχρή επιφάνεια χάνει μέρος της θερμότητάς του και ψύχεται. Με την πτώση της θερμοκρασίας του μειώνεται και η δυνατότητά του να συγκρατεί υδρατμούς (C_s). Και καθώς η απόλυτη τιμή της υγρασίας του (C) δεν διαφοροποιείται, αυξάνεται η τιμή της σχετικής του υγρασίας (ϕ). Αν ο αέρας ψυχθεί τόσο, ώστε η θερμοκρασία του να πέσει κάτω από το σημείο δρόσου, τότε δημιουργείται επιφανειακή συμπύκνωση.

Επομένως, για να μην προκληθεί συμπύκνωση, θα πρέπει η επιφανειακή θερμοκρασία (θ_{ei}) να παραμείνει μεγαλύτερη της θερμοκρασίας δρόσου (θ_s). Δηλαδή:

$$\theta_{ie} > \theta_s \quad \text{δεν δημιουργείται συμπύκνωση,} \quad (8.2.)$$

$$\theta_{ie} < \theta_s \quad \text{δημιουργείται συμπύκνωση.} \quad (8.3.)$$

- Η θερμοκρασία δρόσου μπορεί είτε να υπολογισθεί βάσει μαθηματικών σχέσεων, όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα (ή η θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου) και εξ αυτών η ασκούμενη πίεση των υδρατμών σε κατάσταση κορεσμού και η ατμοσφαιρική πίεση, είτε να ληφθεί απευθείας από πίνακα (πίνακας 8.1.).
- Η επιφανειακή θερμοκρασία του δομικού στοιχείου μπορεί να βρεθεί είτε με απευθείας μέτρηση είτε με υπολογισμό, λαμβάνοντας υπόψη την αντίσταση που προβάλλουν στη ροή θερμότητας οι στρώσεις του δομικού στοιχείου.

Κατά την υπολογιστική διαδικασία γίνεται αποδεκτό κατά απλοποιητική παραδοχή ότι:

- τα υλικά είναι ομογενή και ισότροπα και βρίσκονται μεταξύ τους σε τέλεια θερμική επαφή,

- η θερμική ροή είναι μονοδιάστατη και η μετάδοση της θερμότητας γίνεται κατά διεύθυνση κάθετη προς την εξεταζόμενη επιφάνεια,
- το δομικό στοιχείο εξετάζεται σε στάσιμη θερμοκρασιακή κατάσταση.
- η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ παραμένει σταθερή.
- η θερμική ροή δεν επηρεάζεται από στιγμιαίες επιδράσεις του περιβάλλοντος (άνεμο, βροχή, ηλιασμό κ.τ.λ.).

Πίνακας 8.1. Η επιφανειακή θερμοκρασία των δομικών στοιχείων, κάτω από την τιμή της οποίας σχηματίζεται συμπύκνωση των υδρατμών (δρόσος) στις περιβάλλουσες επιφάνειες ενός χώρου για δεδομένη τιμή θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (πηγή: [13]).

Θερμ. αέρα	Σχετική υγρασία του αέρα														
	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
10	-6.0	-4.2	-2.6	-1.2	0.1	1.4	2.6	3.7	4.8	5.8	6.7	7.6	8.4	9.2	10.0
11	-5.2	-3.4	-1.8	-0.4	1.0	2.3	3.5	4.7	5.8	6.7	7.7	8.6	9.4	10.2	11.0
12	-4.5	-2.6	-1.0	0.4	1.9	3.2	4.5	5.7	6.7	7.7	8.7	9.6	10.4	11.2	12.0
13	-3.7	-1.9	-0.1	1.3	2.8	4.2	5.5	6.6	7.7	8.7	9.6	10.5	11.4	12.2	13.0
14	-2.9	-1.0	0.6	2.3	3.7	5.1	6.4	7.5	8.6	9.6	10.6	11.5	12.4	13.2	14.0
15	-2.2	-0.3	1.5	3.2	4.7	6.1	7.3	8.5	9.6	10.6	11.6	12.5	13.4	14.2	15.0
16	-1.4	0.5	2.4	4.1	5.6	7.0	8.2	9.4	10.5	11.6	12.6	13.5	14.4	15.2	16.0
17	-0.6	1.4	3.3	5.0	6.5	7.9	9.2	10.4	11.5	12.5	13.5	14.5	15.3	16.2	17.0
18	0.2	2.3	4.2	5.9	7.4	8.8	10.1	11.3	12.5	13.5	14.5	15.4	16.3	17.2	18.0
19	1.0	3.2	5.1	6.8	8.3	9.8	11.1	12.3	13.4	14.5	15.5	16.4	17.3	18.2	19.0
20	1.9	4.1	6.0	7.7	9.3	10.7	12.0	13.2	14.4	15.4	16.4	17.4	18.3	19.2	20.0
21	2.8	5.0	6.9	8.6	10.2	11.6	12.9	14.2	15.3	16.4	17.4	18.4	19.3	20.2	21.0
22	3.6	5.9	7.8	9.5	11.1	12.5	13.9	15.1	16.3	17.4	18.4	19.4	20.3	21.2	22.0
23	4.5	6.7	8.7	10.4	12.0	13.5	14.8	16.1	17.2	18.3	19.4	20.3	21.3	22.2	23.0
24	5.4	7.6	9.6	11.3	12.9	14.4	15.8	17.0	18.2	19.3	20.3	21.3	22.3	23.1	24.0
25	6.2	8.5	10.5	12.2	13.9	15.3	16.7	18.0	19.1	20.3	21.3	22.3	23.2	24.1	25.0
26	7.1	9.4	11.4	13.2	14.8	16.3	17.6	18.9	20.1	21.2	22.3	23.3	24.2	25.1	26.0
27	8.0	10.2	12.2	14.1	15.7	17.2	18.6	19.9	21.1	22.2	23.2	24.3	25.2	26.1	27.0
28	8.8	11.1	13.1	15.0	16.6	18.1	19.5	20.8	22.0	23.2	24.2	25.2	26.2	27.1	28.0
29	9.7	12.0	14.0	15.9	17.5	19.0	20.4	21.7	23.0	24.1	25.2	26.2	27.2	28.1	29.0
30	10.5	12.9	14.9	16.8	18.4	20.0	21.4	22.7	23.9	25.1	26.2	27.2	28.2	29.1	30.0

Τότε η ροή θερμότητας μέσω ενός δομικού στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta\theta \cdot t \quad [W] \quad (8.4.)$$

όπου: Q [W] θερμικές απώλειες από το δομικό στοιχείο σε χρόνο t ,
 A [m²] η επιφάνεια ροής της θερμότητας,
 U [W/(m²·K)] ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου,
 $\Delta\theta$ [K] η διαφορά θερμοκρασίας του χώρου εκατέρωθεν των δύο όψεων του δομικού στοιχείου,
 t [s] ή [h] ο χρόνος υπολογισμού της ροής θερμότητας.

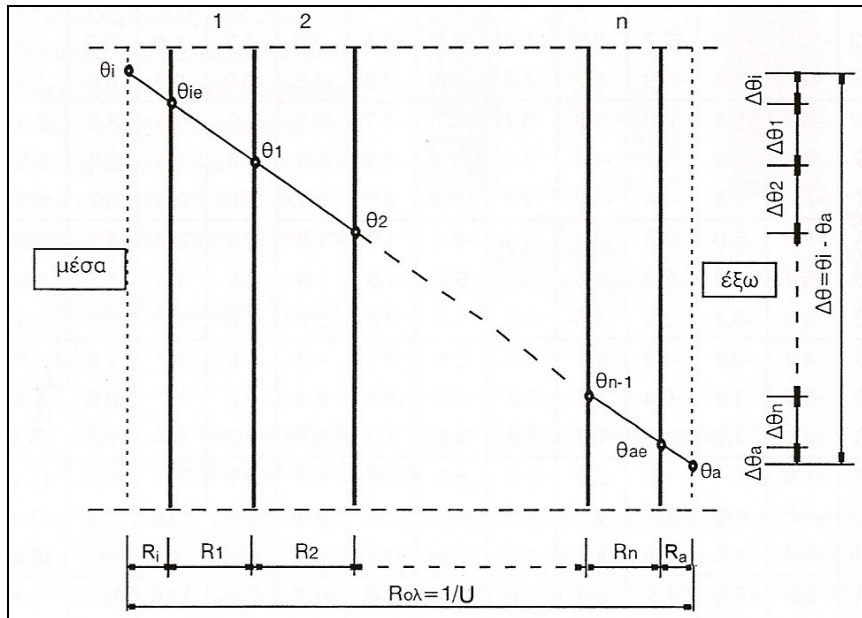
Η παραπάνω σχέση εκφρασμένη ανά μονάδα επιφανείας και ανά μονάδα χρόνου λαμβάνει τη μορφή:

$$q = Q/(A \cdot t) = U \cdot \Delta\theta \quad [W/m^2] \quad (8.5.)$$

Αν η σχέση εκφραστεί ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας, γράφεται:

$$\theta_i - \theta_a = \frac{1}{U} \cdot q \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8.6.)$$

Θεωρουμένης της θερμικής ροής κατά παραδοχή σταθερής, προκύπτει μια γραμμική εξίσωση, που στη γεωμετρική της έκφραση παριστάνει ευθεία κλίσης q σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με άξονα τετμημένων (x) τις θερμικές αντιστάσεις των στρώσεων του δομικού στοιχείου και άξονα τεταγμένων (y) τις θερμοκρασίες (σχήμα 8.1.).



Σχήμα 8.1. Η κατανομή των θερμοκρασιών στις διαδοχικές στρώσεις ενός δομικού στοιχείου, όταν στον άξονα των τετμημένων καταγράφονται οι θερμικές τους αντιστάσεις (πηγή: [13]).

Τότε, αν θ_{ie} είναι η εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία, κατ' αναλογία προκύπτει:

$$\theta_i - \theta_{ie} = R_i \cdot q \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8.7.)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (8.6.) και (8.7.) και επιλύοντας ως προς θ_{ie} προκύπτει:

$$\theta_{ie} = \theta_i - R_i \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_a) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8.8.)$$

όπου: θ_i [$^{\circ}\text{C}$] η θερμοκρασία του αέρα του εσωτερικού χώρου
 θ_a [$^{\circ}\text{C}$] η θερμοκρασία του αέρα του εξωτερικού χώρου
 θ_{ie} [$^{\circ}\text{C}$] η επιφανειακή θερμοκρασία του δομικού στοιχείου
 R_i [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$] η αντίσταση θερμικής μετάβασης εσωτερικά
 U [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$] ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου.

Από τη σύγκριση των δύο μεγεθών, θ_{ie} και θ_s , ελέγχεται το ενδεχόμενο σχηματισμού επιφανειακής συμπύκνωσης στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου.

Με αυτή την υπολογιστική διαδικασία μπορεί να ελεγχθεί το ενδεχόμενο συμπύκνωσης στην επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα, κυρίως θερμομονωτικής προστασίας, προκειμένου να αποτραπεί η εκδήλωση του φαινομένου.

8.4. Η ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΑΤΜΩΝ

8.4.1. Περιγραφή του φαινομένου

Όταν δύο χώροι, με διαφορετική συγκέντρωση υδρατμών ο καθένας, διαχωρίζονται μεταξύ τους με ένα υδρατμοδιαπερατό δομικό στοιχείο, τότε οι υδρατμοί από το χώρο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση τείνουν να μετακινηθούν μέσω των πόρων των υλικών του υδρατμοδιαπερατού δομικού στοιχείου προς το χώρο με τη μικρότερη συγκέντρωση υδρατμών, προκειμένου οι συγκεντρώσεις στους δύο χώρους να εξισωθούν. Αυτή η μετακίνηση οφείλεται στη διαφορετική πίεση που ασκούν οι υδρατμοί στις δύο όψεις του δομικού στοιχείου. Γι' αυτό και όταν εξισωθούν οι συγκεντρώσεις των υδρατμών στους δύο χώρους, επέρχεται και εξίσωση των πιέσεων και η εκδήλωση του φαινομένου σταματά. Ταυτόχρονα, προς την αντίθετη κατεύθυνση διαχέονται μόρια του αέρα, ούτως ώστε η συνολική πίεση που ασκείται στις δύο όψεις του δομικού στοιχείου να παραμένει σταθερή.

Αν μεταξύ των δύο όψεων του δομικού στοιχείου επικρατεί διαφορετική θερμοκρασία, τότε στις διαδοχικές του στρώσεις (π.χ. επίχρισμα, οπτόπλινθους, θερμομονωτικό υλικό κτλ.) η θερμοκρασία βαίνει μειούμενη από τη θερμή προς την ψυχρή όψη. Όμως αυτή η πτώση της θερμοκρασίας επηρεάζει και τη δυνάμενη να συγκρατηθεί ποσότητα των υδρατμών στον αέρα των πόρων των υλικών.

Έτσι, οι διαχεόμενοι υδρατμοί, αν συναντήσουν στην πορεία τους κάποια στρώση, στην οποία ο αέρας των πόρων έχει τόσο χαμηλή θερμοκρασία που να αδυνατεί να συγκρατήσει το σύνολο των διαχεόμενων υδρατμών, ένα μέρος τους θα συμπυκνωθεί και θα εκτοπίσει τον ευρισκόμενο στους πόρους αέρα, καταλαμβάνοντας τη θέση τους.

Προφανώς, το εμποτισμένο με υγρασία δομικό στοιχείο μειώνει τη θερμομονωτική του ικανότητα, δεδομένου ότι η θερμική αγωγιμότητα του νερού είναι περίπου 24 φορές μεγαλύτερη αυτής του αέρα. Επιπροσθέτως όμως αποσαθρώνει σταδιακά το υλικό, ιδίως όταν το εμπεριεχόμενο νερό μετατρέπεται σε πάγο (σε θερμοκρασία χαμηλότερη του 0°C), καθώς με την αύξηση του όγκου του κατά το 1/10 διαρρηγνύεται ο συνδετικός ιστός του υλικού.

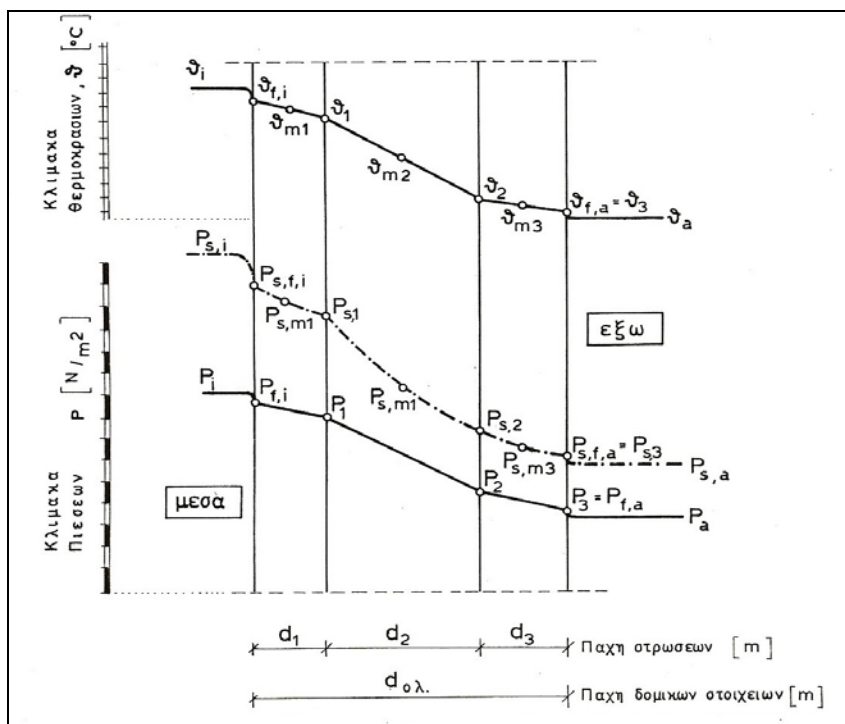
Η υγρασία συμπύκνωσης δεν γίνεται εύκολα αντιληπτή, διότι βρίσκεται στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου και δεν φθάνει στις εξωτερικές του επιφάνειες.

Είναι παροδικό φαινόμενο και παύει να εμφανίζεται όταν εκλείψουν οι λόγοι που το προκάλεσαν. Όταν η θερμοκρασία ανέλθει σε υψηλότερα επίπεδα, τότε η δημιουργηθείσα υγρασία μετατρέπεται εκ νέου σε υδρατμούς και απομακρύνονται και πάλι μέσω της διάχυσης προς τις δύο όψεις του δομικού στοιχείου, επειδή η συγκέντρωση υδρατμών στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου είναι υψηλότερη από τη συγκέντρωση στο εξωτερικό περιβάλλον και οι συγκεντρώσεις τείνουν και πάλι να εξισωθούν.

8.4.2. Έλεγχος και υπολογισμός του φαινομένου

Το ενδεχόμενο συμπύκνωσης των υδρατμών στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου είναι δυνατόν να ελεγχθεί με κατάλληλες υπολογιστικές μεθόδους, όπως και η συμπυκνούμενη και η δυνάμενη κατόπιν να εξατμισθεί ποσότητα υδρατμών, αν είναι γνωστές οι εσωτερικές και εξωτερικές τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα, καθώς και τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των υλικών των διαδοχικών στρώσεων του δομικού στοιχείου.

Με την υπολογιστική διαδικασία αναζητούνται οι τιμές της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια των διαδοχικών στρώσεων του δομικού στοιχείου ή σε άλλες ενδιάμεσες θέσεις και εξ αυτών υπολογίζεται η διαγραμματική πορεία των καμπυλών των μερικών πιέσεων και των πιέσεων κορεσμού σε όλο το πάχος του δομικού στοιχείου. Για να αποφευχθεί η συμπύκνωση, θα πρέπει οι δύο καμπύλες στην πορεία τους σ' όλο το πάχος του δομικού στοιχείου να παραμείνουν ασύμπτωτες (σχήμα 8.2.).



Σχήμα 8.2. Κατανομή των μερικών πιέσεων και των πιέσεων κορεσμού στις διαδοχικές στρώσεις ενός δομικού στοιχείου βάσει της κατανομής των θερμοκρασιών (πηγή: [13]).

Διαφορετικά, στην περιοχή στην οποία οι δύο καμπύλες συναντώνται, σχηματίζεται συμπύκνωση που εκτείνεται είτε σε ένα περιορισμένο επίπεδο –όταν η θέση εκείνη αποτελεί διεπιφάνεια δύο διαδοχικών στρώσεων και παρουσιάζει απότομη πτώση της θερμοκρασίας– είτε σε μια ευρύτερη ζώνη.

Η μεθοδολογία βασίζεται στην τεχνική που εφάρμοσε ο H. Glaser, στηριζόμενος στους νόμους του A. Fick και στις εξισωτικές σχέσεις του J. S. Cammerer. Τη μεθοδολογία αργότερα συμπλήρωσαν ή τροποποίησαν άλλοι ερευνητές, δίνοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ανάλογα βεβαίως με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα της έρευνάς τους. Βασική προϋπόθεση της μεθόδου αποτελεί η απλοποιητική παραδοχή ότι η ροή των υδρατμών –φαινόμενο αντίστοιχο αυτού της ροής θερμότητας– είναι μονοδιάστατη και κάθετη προς την επιφάνεια του δομικού στοιχείου, παραμένει ανεπηρέαστη από εξωγενείς παράγοντες και δεν επηρεάζει τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών.

Έτσι, η πυκνότητα ροής των διαχεόμενων υδρατμών μέσω των διαδοχικών στρώσεων ενός δομικού στοιχείου η στρώσεων υπολογίζεται αριθμητικά από τη σχέση:

$$g = \sum_{j=1}^n \frac{D_j}{R_D \cdot T_j \cdot \mu_j \cdot d_j} \cdot (P_i - P_a) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (8.9.)$$

όπου:	g	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$	η πυκνότητα ροής των διαχεόμενων υδρατμών,
	D	$[\text{m}^2/\text{h}]$	ο συντελεστής διάχυσης,
	R_D	$[(\text{N} \cdot \text{m})/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	η σταθερά των τελείων αερίων για υδρατμούς, ($R_D = 462 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)
	T	$[\text{K}]$	η θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν (Kelvin),
	μ	$[-]$	ο συντελεστής αντίστασης στη διάχυση των υδρατμών,
	d	$[\text{m}]$	το πάχος της κάθε στρώσης του δομικού στοιχείου,
	P_i	$[\text{N}/\text{m}^2]$ ή $[\text{Pa}]$	η μερική πίεση των υδρατμών του εσωτερικού χώρου,
	P_a	$[\text{N}/\text{m}^2]$ ή $[\text{Pa}]$	η μερική πίεση των υδρατμών του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Ο συντελεστής διάχυσης μεταβάλλει την τιμή του βάσει της θερμοκρασίας και της πίεσης της ατμόσφαιρας. Ωστόσο, συνήθως για πρακτικούς λόγους δίνεται σ' αυτόν μία σταθερή τιμή που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία των 10°C και ισούται με 0,086 m²/h.

Τότε η ποσότητα $\frac{R_D \cdot T_j}{D_j}$ λαμβάνει την τιμή:

$$\frac{R_D \cdot T_j}{D_j} = \frac{462 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (273 + 10) \text{K}}{0,086 \frac{\text{m}^2}{\text{h}}} = 152 \cdot 10^6 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{h}}{\text{kg}} \quad (8.10.)$$

Αν η ροή των διαχεόμενων υδρατμών βάσει των παραπάνω θεωρηθεί σταθερή, τότε η ασκούμενη πίεση από τους υδρατμούς (διαφορά πίεσης) μεταξύ των δύο όψεων ενός δομικού στοιχείου προκύπτει ανάλογη μιας ποσότητας που εξαρτάται από τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των στρώσεων του δομικού στοιχείου και καλείται **ειδικός συντελεστής αντίστασης στη διάχυση των υδρατμών**, ρ , και ισούται με:

$$\rho_j = \frac{R_D \cdot T_j \cdot \mu_j \cdot d_j}{D_j} \quad [(\text{N} \cdot \text{h})/\text{kg}] \quad (8.11.)$$

Τότε η σχέση 8.9. που ορίζει τη ροή των υδρατμών μέσω των στρώσεων του δομικού στοιχείου γράφεται:

$$g = \frac{(P_i - P_a)}{\sum_{j=1}^n \rho_j} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (8.12.)$$

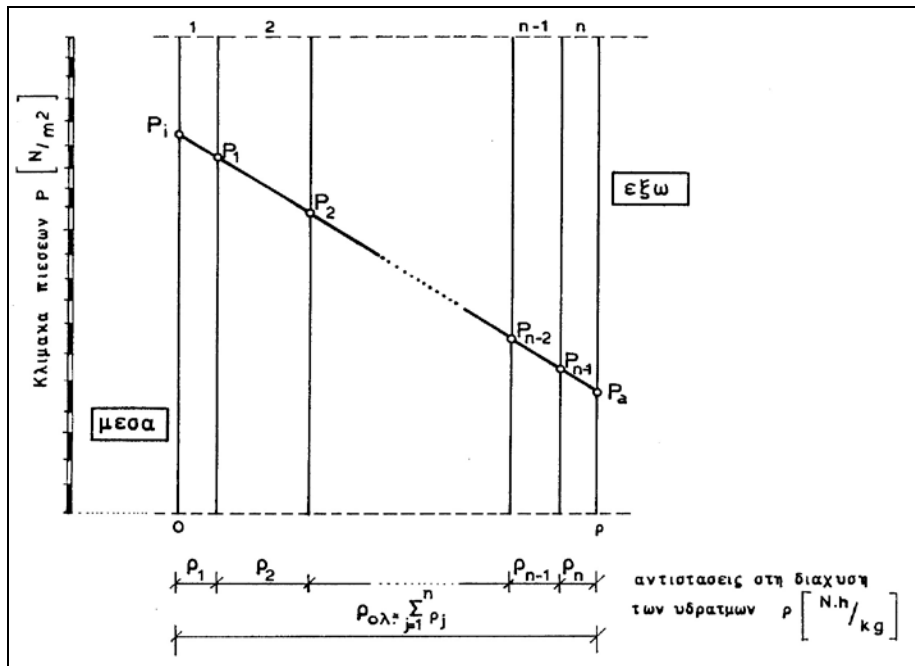
Η γραμμικότητα της σχέσης 8.12. μπορεί να ορίσει σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων την πίεση που ασκούν οι διαχεόμενοι υδρατμοί στη διεπιφάνεια δύο διαδοχικών στρώσεων ενός δομικού στοιχείου, αν στον άξονα των τετμημένων ορισθούν οι ειδικές αντιστάσεις των διαδοχικών στρώσεων και στον άξονα των τεταγμένων η μερική πίεση των υδρατμών (σχήμα 8.3.).

Επομένως, για να εξετασθεί αν δημιουργείται συμπύκνωση λόγω διάχυσης των υδρατμών, αρκεί να ελεγχθεί αν η ευθεία των μερικών πιέσεων (P) συναντά την καμπύλη των πιέσεων κορεσμού (P_s), οι τιμές της οποίας προσδιορίζονται από πίνακα (πίνακας 8.2.) συναρτήσει της θερμοκρασίας ή μπορούν να υπολογισθούν σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο ISO 13788 βάσει των σχέσεων:

$$P_s = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad [\text{Pa}] \quad \text{για } \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (8.13.)$$

$$P_s = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \quad [\text{Pa}] \quad \text{για } \theta < 0^\circ\text{C} \quad (8.14.)$$

Προφανώς, σε περίπτωση κατά την οποία σχηματίζεται συμπύκνωση στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου η πυκνότητα ροής των υδρατμών δεν θα είναι σταθερή σε όλο το πάχος του δομικού στοιχείου και η καμπύλη των μερικών πιέσεων στη θέση της συμπύκνωσης θα παρακολουθεί (θα ταυτίζεται με) την καμπύλη των πιέσεων κορεσμού.



Σχήμα 8.3. Κατανομή των μερικών πιέσεων και των πιέσεων κορεσμού στις διαδοχικές στρώσεις ενός δομικού στοιχείου βάσει της κατανομής των θερμοκρασιών (πηγή: [13]).

Πίνακας 8.2. Η πίεση κορεσμού για κλίμακα θερμοκρασιών από -20 έως 39°C (πηγή: [6]).

Θερμοκρασία αέρα °C	Πίεση κορεσμού Pa	Θερμοκρασία αέρα °C	Πίεση κορεσμού Pa	Θερμοκρασία αέρα °C	Πίεση κορεσμού Pa
-20	103	0	611	20	2337
-19	113	1	656	21	2486
-18	124	2	705	22	2642
-17	137	3	757	23	2808
-16	150	4	813	24	2982
-15	165	5	872	25	3166
-14	181	6	935	26	3359
-13	198	7	1001	27	3563
-12	217	8	1072	28	3778
-11	237	9	1147	29	4003
-10	259	10	1227	30	4241
-9	283	11	1312	31	4490
-8	309	12	1402	32	4752
-7	338	13	1497	33	5027
-6	368	14	1598	34	5316
-5	401	15	1704	35	5619
-4	437	16	1817	36	5937
-3	475	17	1937	37	6271
-2	517	18	2063	38	6621
-1	562	19	2196	39	6987

Εφόσον προκύπτει μια ευρύτερη περιοχή στην οποία εκδηλώνεται η συμπύκνωση των υδρατμών (ζώνη συμπύκνωσης), η πυκνότητα ροής g_i ως τη ζώνη συμπύκνωσης (σχήμα 8.4.) θα ισούται με:

$$g_i = \frac{(P_i - P_{k'})}{\rho_i} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (8.15.)$$

όπου ρ_i [(N·h)/kg] η ειδική αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών από τον εσωτερικό χώρο μέχρι τη ζώνη συμπύκνωσης

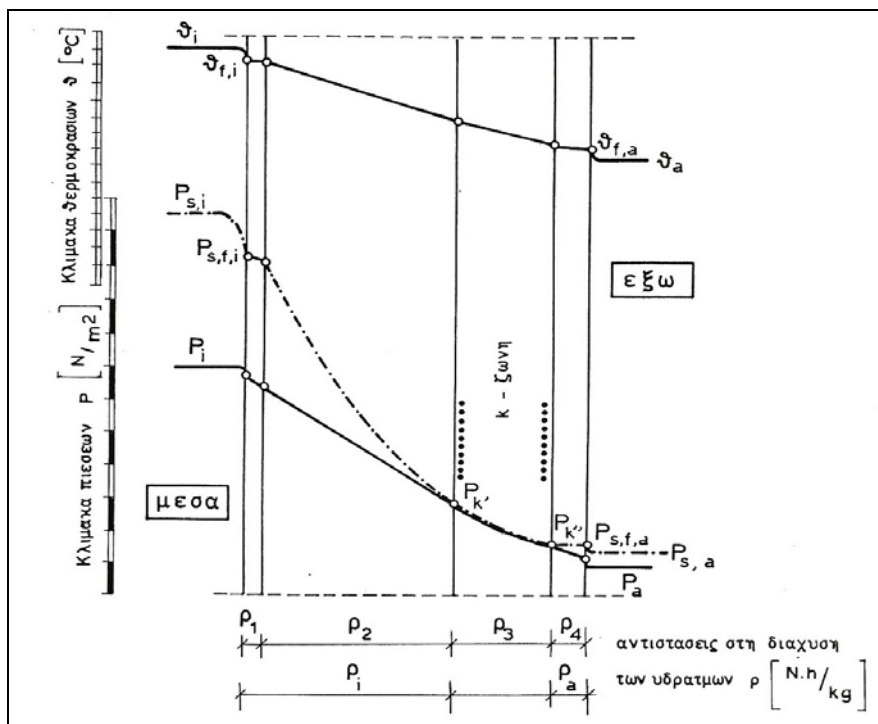
και η πυκνότητα ροής g_a μετά τη ζώνη συμπύκνωσης ισούται με:

$$g_a = \frac{(P_{k''} - P_a)}{\rho_a} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (8.16.)$$

όπου ρ_a [(N·h)/kg] η ειδική αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών από τη ζώνη συμπύκνωσης μέχρι το εξωτερικό περιβάλλον,

ενώ η διαφορά των δύο ποσοτήτων θα δίνει τη συμπυκνούμενη ποσότητα g_z στο δομικό στοιχείο ανά ώρα και ανά μονάδα επιφανείας του:

$$g_z = g_i - g_a = \frac{(P_i - P_{k'})}{\rho_i} - \frac{(P_{k''} - P_a)}{\rho_a} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (8.17.)$$



Σχήμα 8.4. Σχηματισμός ζώνης συμπύκνωσης σε ένα πολυστρωματικό δομικό στοιχείο, όταν η πορεία των μερικών πιέσεων και η πορεία των πιέσεων κορεσμού συναντώνται (πηγή: [13]).

Όταν η ζώνη συμπύκνωσης περιορίζεται σε επίπεδο (σχήμα 8.5.), τα σημεία Κ' και Κ'' ταυτίζονται και η σχέση 8.17. γράφεται:

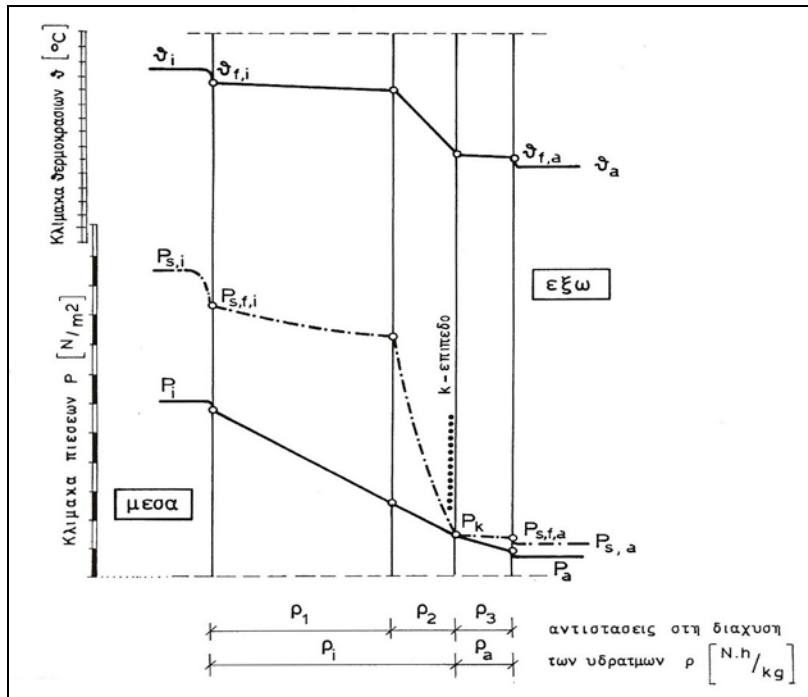
$$g_z = g_i - g_a = \frac{(P_i - P_k)}{\rho_i} - \frac{(P_k - P_a)}{\rho_a} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (8.18.)$$

Κατά την περίοδο εξάτμισης η συμπυκνωθείσα ποσότητα υδρατμών μεταπίπτει και πάλι στην αέρια φάση και εκδηλώνεται ροή υδρατμών προς τις δύο επιφάνειες του δομικού στοιχείου. Τότε για την περίοδο εξάτμισης η δυνάμενη να εξατμισθεί ποσότητα g_e για ζώνη συμπύκνωσης θα είναι:

$$g_e = \frac{(P_{k'} - P_i)}{\rho_i} + \frac{(P_{k''} - P_a)}{\rho_a} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (8.19.)$$

Ομοίως, όταν η ζώνη συμπύκνωσης περιορίζεται σε επίπεδο, τα σημεία Κ' και Κ'' ταυτίζονται και η σχέση 8.19. γράφεται:

$$g_l = \frac{(P_k - P_i)}{\rho_i} + \frac{(P_k - P_a)}{\rho_a} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (8.20.)$$



Σχήμα 8.5. Σχηματισμός επιπέδου συμπύκνωσης σε ένα πολυστρωματικό δομικό στοιχείο, όταν η πορεία των μερικών πιέσεων και η πορεία των πιέσεων κορεσμού συναντώνται (πηγή: [13]).

Αν t_z είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία δημιουργείται συμπύκνωση και t_e η περίοδος κατά την οποία παρέχεται η δυνατότητα εξάτμισης της συμπυκνωθείσας ποσότητας υδρατμών, τότε αντίστοιχα η κατ' έτος συμπυκνούμενη ποσότητα G_z και η κατ' έτος δυνάμενη να εξατμισθεί G_e προκύπτουν από τις σχέσεις:

Για την περίοδο συμπύκνωσης:

$$G_z = g_z \cdot t_z \quad [\text{kg}/\text{m}^2] \quad (8.21.)$$

Για την περίοδο εξάτμισης:

$$G_e = g_e \cdot t_e \quad [\text{kg}/\text{m}^2] \quad (8.22.)$$

Βασική επιδίωξη αποτελεί η αποφυγή εκδήλωσης του φαινομένου. Δηλαδή οι υπολογισμοί να δίνουν πάντοτε τιμή $G_z = 0$. Όταν όμως αυτό δεν είναι εφικτό, επιδίωξη αποτελεί το ετήσιο ισοζύγιο της συμπυκνούμενης και της δυνάμενης να εξατμισθεί ποσότητας υδρατμών να γέρνει πάντα υπέρ της δυνάμενης να εξατμισθεί, δηλαδή να ισχύει η σχέση:

$$G_z - G_e < 0 \quad [\text{kg}/\text{m}^2] \quad (8.23.)$$

Σε διαφορετική περίπτωση (αν δηλαδή η διαφορά προκύπτει θετική), θεωρητικά θα προστίθεται κατ' έτος μια ποσότητα μόνιμα συμπυκνούμενων υδρατμών στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου, διατηρώντας μια διαρκώς αυξανόμενη ποσότητα υγρασίας στη μάζα του.

Ζώνη συμπίκνωσης σχηματίζεται συνήθως σε δομικά στοιχεία, στων οποίων τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των υλικών των διαδοχικών τους στρώσεων (δηλαδή κυρίως οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας λ και αντίστασης στη διάχυση των υδρατμών μ) παρουσιάζουν παρεμφερείς τιμές, ενώ επίπεδο συμπίκνωσης δημιουργείται σε αντίθετη περίπτωση.

Για παράδειγμα σε μια μη θερμομονωμένη οπτοπλινθοδομή, εκατέρωθεν επιχρισμένη, εφόσον δημιουργηθεί συμπίκνωση των υδρατμών, αυτή θα έχει τη μορφή ζώνης συμπίκνωσης. Αντιθέτως, σε ένα τοιχίο σκυροδέματος θερμομονωμένο από την εσωτερική πλευρά και, ομοίως, εκατέρωθεν επιχρισμένο, η συμπίκνωση των υδρατμών, εφόσον εκδηλωθεί, θα έχει τη μορφή επιπέδου συμπίκνωσης και θα εκτείνεται στη διεπιφάνεια μεταξύ θερμομονωτικής στρώσης και στρώσης οπλισμένου σκυροδέματος.

Γενικώς, σε στοιχεία που στερούνται θερμομονωτικής προστασίας η συμπίκνωση των υδρατμών, εάν εκδηλωθεί, έχει ως επί το πλείστον τη μορφή ζώνης συμπίκνωσης, ενώ στα θερμομονωμένα δομικά στοιχεία έχει τη μορφή επιπέδου συμπίκνωσης και η θέση εκδήλωσής της είναι η εξωτερική (ψυχρή) όψη του θερμομονωτικού υλικού. Τότε, αν το θερμομονωτικό υλικό είναι ευπρόσβλητο από την υγρασία, την απορροφά και μειώνει ή –σε περίπτωση πλήρη εμποτισμού του– χάνει τη θερμομονωτική του ικανότητα. Στα θερμομονωμένα δομικά στοιχεία η συμπίκνωση δημιουργείται πιο εύκολα, αν η θερμομόνωση βρίσκεται από την εσωτερική πλευρά του δομικού στοιχείου, ενώ είναι δύσκολο να δημιουργηθεί, αν βρίσκεται από την εξωτερική πλευρά.

Υπό τις ελληνικές κλιματικές συνθήκες δεν προκύπτει εύκολα συμπίκνωση των υδρατμών λόγω διάχυσης σε ένα δομικό στοιχείο. Συνήθως το φαινόμενο εμφανίζεται στις ψυχρότερες κλιματικές ζώνες Γ και Δ και κάτω από αρκετά χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες. Όμως και σ' αυτές τις περιπτώσεις η δυνάμενη να εξατμισθεί ποσότητα των υδρατμών είναι κατά κανόνα πολλαπλασίως μεγαλύτερη της συμπυκνούμενης. Στις συνθήκες κατασκευές η αναλογία μεταξύ των δύο ποσοτήτων G_z προς G_e είναι της τάξης του 1:20 έως 1:100. Επομένως, το ετήσιο ισοζύγιο υγρασίας κατά κανόνα δεν προκύπτει θετικό και κίνδυνος μόνιμης παραμονής υγρασίας δεν υφίσταται. Τα μέτρα προστασίας αποβλέπουν κυρίως στην αποτροπή εκδήλωσης του φαινομένου, δηλαδή στο μηδενισμό της ποσότητας G_z και στην αποφυγή της φθοράς των δομικών υλικών με τον παροδικό εμποτισμό του υλικού με υγρασία και με τις διαδοχικές και επαναλαμβανόμενες καταστάσεις ύγρυνσης και στεγνώματος του δομικού στοιχείου.

8.4.3. Το φράγμα υδρατμών

8.4.3.1. Η λειτουργία του

Καθοριστική παράμετρο στη συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου στη διάχυση των υδρατμών και στην ενδεχόμενη συμπίκνωσή τους στο εσωτερικό του αποτελεί η ύπαρξη ενός φράγματος υδρατμών μεταξύ των στρώσεών του. Ως φράγμα υδρατμών νοείται κάθε στρώση μεταξύ των λοιπών στρώσεων του δομικού στοιχείου, που προβάλλει πολύ υψηλότερη αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών από αυτήν που προβάλλουν οι υπόλοιπες στρώσεις.

Την προβαλλόμενη αντίσταση στη διάχυση υδρατμών ενός υλικού καθορίζει ο **συντελεστής αντίστασης στη διάχυση των υδρατμών μ** . Ο συντελεστής μ είναι αδιάστατο μέγεθος και ορίζει πόσες φορές μεγαλύτερη αντίσταση προβάλλει αυτό το υλικό στη διάχυση των υδρατμών από ένα στρώμα αέρα ίσου πάχους και ίδιας θερμοκρασίας, όταν βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας.

Η τιμή του συντελεστή μ κάθε υλικού επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Όμως για το εύρος των τιμών θερμοκρασίας χειμερινής και θερινής περιόδου αυτή η επίδραση είναι πολύ μικρή και γι' αυτό η τιμή του συντελεστή μ θεωρείται πρακτικά σταθερή και ιδιαίτερη για κάθε υλικό. Στη δεύτερη τεχνική οδηγία (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-2/2010) με τις «*θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών*

και τον έλεγχο της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων» στον πίνακα 2 δίνονται οι τιμές του συντελεστή αντίστασης στη διάχυση των υδρατμών μ για κάθε δομικό υλικό σε υγρή και ξηρή κατάσταση.

Κατά τους υπολογισμούς η τιμή του μ υπεισέρχεται στην παραπάνω σχέση 8.9. για να προσδιοριστεί η προβαλλόμενη αντίσταση κάθε στρώσης του δομικού στοιχείου.

Από τον πίνακα προκύπτει ότι τα υλικά που παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές του μ είναι τα ασφαλτόπανα, τα πλαστικά φύλλα, το γυαλί, το αφρώδες γυαλί, το φύλλο αλουμινίου κ.ά., που πρακτικά θεωρείται ότι ανακόπτουν την πορεία των υδρατμών και παρεμποδίζουν τη διέλευσή τους μέσω της μάζας τους. Άλλα υλικά, όπως κεραμικά πλακίδια, πλακίδια υαλοψηφίδων, ορθομαρμαρώσεις παρουσιάζουν μικρότερες τιμές του συντελεστή μ , προβάλλουν όμως και αυτά υψηλή αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών και λειτουργούν επίσης ως φράγματα υδρατμών. Αντιθέτως, υλικά όπως ο υαλοβάμβακας, ο πετροβάμβακας κ.ά. δεν προβάλλουν σχεδόν καμιά αντίσταση και επιτρέπουν ανεμπόδιστα τη διάχυση των υδρατμών μέσω αυτών.

Είναι σαφές ότι η τοποθέτηση ενός υλικού που λειτουργεί ως φράγμα υδρατμών στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου ανακόπτει ή δυσχεραίνει την πορεία των διαχεόμενων υδρατμών, ανάλογα με την τιμή του συντελεστή αντίστασης στη διάχυση των υδρατμών μ αυτού του υλικού. Σ' εκείνη τη θέση παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση υδρατμών και, αν ο αέρας που βρίσκεται στους πόρους του έχει χαμηλή θερμοκρασία, φθάνει εύκολα σε κατάσταση κορεσμού και αδυνατεί να συγκρατήσει τους υδρατμούς. Τότε η περίσσεια των υδρατμών υγροποιείται και κατακάθεται υπό μορφή σταγόνων στα τοιχώματα των πόρων του δομικού στοιχείου. Επομένως ένα υλικό με υψηλό συντελεστή αντίστασης στη διάχυση των υδρατμών, τοποθετημένο στην ψυχρή πλευρά του δομικού στοιχείου, πολύ εύκολα θα ευνοήσει τη συμπύκνωση των διαχεόμενων υδρατμών. Στεγανοποιητικές στρώσεις, υαλοποιημένα πλακίδια, ορθομαρμαρώσεις κ.τ.λ. στις εξωτερικές επιφάνειες των δομικών στοιχείων ανακόπτουν την πορεία των διαχεόμενων υδρατμών και δημιουργούν συμπυκνώσεις πίσω από αυτά. Η σχηματιζόμενη υγρασία μπορεί κατόπιν να συμβάλει στην αποσάθρωση και αποκόλληση αυτών των υλικών. Στη φθορά του δομικού στοιχείου συμβάλλει και η αλληλοδιάδοχη κατάσταση διύγρυνσης και στεγνώματος των υλικών, δεδομένου ότι κατά τη μετάπτωσή τους από την υγρή στην αέρια φάση οι υδρατμοί αυξάνουν τον όγκο τους περίπου κατά 1500 φορές, αναπτύσσοντας πίσω από τα αδιαπέρατα από αυτούς υλικά υψηλές τάσεις.

8.4.3.2. Ο ρόλος του φράγματος υδρατμών

Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα, όταν η παρουσία ενός αδιαπέρατου υλικού είναι απαραίτητη στην εξωτερική επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου, επιδιώκεται η τοποθέτηση ενός άλλου υλικού, ίσης ή υψηλότερης τιμής του συντελεστή αντίστασης στη διάχυση των υδρατμών σε προηγούμενη θέση στη διαδοχή των στρώσεων ενός δομικού στοιχείου, στη θερμή του περιοχή, δηλαδή πριν από τη θερμομονωτική στρώση. Αυτή η στρώση λειτουργεί επίσης ως φράγμα υδρατμών και ανακόπτει την πορεία τους. Όμως σ' αυτή την περίπτωση η υψηλή συγκέντρωση των υδρατμών δεν οδηγεί σε συμπύκνωση, δεδομένου ότι βρίσκεται στη θερμή περιοχή του δομικού στοιχείου και ο αέρας των πόρων, διατηρώντας ακόμη σχετικά υψηλή θερμοκρασία, δεν φθάνει σε κατάσταση κορεσμού και μπορεί να συγκρατήσει τους συγκεντρωμένους υδρατμούς.

Έτσι για παράδειγμα, σε μια δикέλυφη τοιχοποιία με θερμομόνωση στον πυρήνα, η οποία εξωτερικά φέρει κάποια στεγανοποιητική στρώση που λειτουργεί ως φράγμα υδρατμών, θα πρέπει να προστατευθεί με την τοποθέτηση ενός δεύτερου φράγματος υδρατμών σε προηγούμενη θέση στη θερμή περιοχή.

- Αν π.χ. η θερμομόνωση είναι από υαλοβάμβακα, είναι προτιμότερο να επιλεγεί πάπλωμα υαλοβάμβακα με επικαλυμμένη τη μία όψη με φύλλο αλουμινίου. Ο υαλοβάμβακας πρέπει να

τοποθετηθεί κατά τέτοιο τρόπο που το φύλλο αλουμινίου να «βλέπει» προς τον εσωτερικό χώρο του κτηρίου.

- Αν τοποθετηθεί ανάποδα, αν δηλαδή το φύλλο αλουμινίου «βλέπει» προς το εξωτερικό περιβάλλον, θα λειτουργήσει επιβαρυντικά για την κατασκευή και θα επιφέρει τα αντίθετα από τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα, καθώς θα ανακόπτει την πορεία των διαχεόμενων υδρατμών στην εξωτερική πλευρά του υαλοβάμβακα, που, ευρισκόμενη σε χαμηλή θερμοκρασία, θα ευνοεί τη συμπύκνωσή τους. Η σχηματιζόμενη υγρασία θα εμποτίζει τον υαλοβάμβακα και θα απομειώνει τη θερμομονωτική του ικανότητα.

Για τον ίδιο λόγο **δεν** θα πρέπει να επικαλύπτεται με πλαστικό φύλλο η θερμομονωτική στρώση που τοποθετείται επάνω από οριζόντια οροφή, κάτω από μια μη θερμομονωμένη κεκλιμένη στέγη. Το πλαστικό φύλλο παρεμποδίζει τους διαχεόμενους υδρατμούς να εκτονωθούν στο χώρο μεταξύ οριζόντιας οροφής και κεκλιμένης στέγης. και, καθώς είναι αυξημένη η συγκέντρωσή τους κάτω από αυτό, δηλαδή στην ψυχρή πλευρά της θερμομονωτικής στρώσης, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται και εμποτίζουν το θερμομονωτικό υλικό με νερό.

Ομοίως, σε μια δικέλυφη, αεριζόμενη τοιχοποιία δεν πρέπει να τοποθετείται επάνω στη θερμομονωτική στρώση πλαστικό φύλλο ή φύλλο αλουμινίου από την πλευρά που «βλέπει» προς το διάκενο αερισμού, διότι αφενός παρεμποδίζει την εκτόνωσή τους σ' αυτό και κατόπιν τη μεταφορά τους στο εξωτερικό περιβάλλον και αφετέρου συμβάλλει στη συμπύκνωσή τους, καθώς η συγκέντρωση των υδρατμών γίνεται από την πλευρά της θερμομονωτικής στρώσης στην οποία ο αέρας των πόρων βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία και δεν μπορεί να συγκρατήσει μεγάλη ποσότητα υδρατμών.

Για τα ελληνικά κλιματικά δεδομένα όλων των κλιματικών ζωνών κατά γενικό κανόνα ένα δομικό στοιχείο πρέπει να αφήνεται ελεύθερο να «αναπνέει», δηλαδή να μην παρεμποδίζεται η διέλευση των υδρατμών μέσω των πόρων της μάζας του, αντιθέτως αυτή πρέπει να διευκολύνεται. Φράγμα υδρατμών θα πρέπει να τοποθετείται μόνον όταν συντρέχουν λόγοι που το επιβάλλουν. Και ο συνηθέστερος λόγος είναι η ύπαρξη ενός άλλου υλικού που λόγω της φύσης του παρεμποδίζει τη διάχυση των υδρατμών και βρίσκεται τοποθετημένο σε τέτοια θέση στη διαδοχή των στρώσεων του δομικού στοιχείου που ευνοεί τη συμπύκνωση. Τότε το φράγμα υδρατμών τοποθετείται σε θέση που να παρεμποδίζει μεν τη διέλευση των υδρατμών (και άρα να τους εμποδίζει να φθάσουν μέχρι την αδιαπέραστη στρώση), να μην ευνοεί όμως τη συμπύκνωσή τους λόγω της υψηλής συγκέντρωσής τους, δηλαδή να βρίσκεται στη θερμή περιοχή του δομικού στοιχείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Φ.Ε.Κ. 89, νόμος 3661/19-05-2008. «Μέτρα για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτηρίων και άλλες διατάξεις».
2. Φ.Ε.Κ. Β' 407 / 9-4-2010, απόφαση Δ6/Β/οικ.5825 «Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων».
3. Φ.Ε.Κ. 362 Δ'. «Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτηρίων - Κ.Θ.Κ.», Π.Δ. της 1.6/4.7.1979.
4. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, «Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων και την Έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης». Τεχνική Οδηγία ΤΕΕ, Ιούλιος 2010.
5. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων». Τεχνική Οδηγία ΤΕΕ, Ιούλιος 2010.
6. ΕΛ.Ο.Τ. EN ISO 13788 «Υδροθερμικές επιδόσεις δομικών υλικών και στοιχείων. - Εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία για την αποφυγή επιφανειακής ύγρανσης και συμπύκνωσης στη μάζα. - Μέθοδοι υπολογισμού».
7. Οδηγία 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 16^{ης} Δεκεμβρίου 2002 για την «Ενεργειακή απόδοση των κτηρίων». ΕΕΕΚ L.1, 4.1.2003, (2003).
8. Οδηγία 2010/31/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Μαΐου 2010 για την «Ενεργειακή απόδοση των κτηρίων» (Αναδιατύπωση). ΕΕΕΚ L.153, 18.6.2010, (2010).
9. ASHRAE Handbook «Fundamentals», American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, Edition 2009.
10. Αραβαντινός Δ., «Ελαφροτσιμεντόλιθοι: Παραγωγή, ιδιότητες, χρήση και εφαρμογές», περιοδικό «Κτίριο», Μάιος 2009, τεύχος 208 (4/2009). σελ. 53-60.
11. Αραβαντινός Δ., «Θερμογέφυρες στα κτήρια. Τα αδύναμα σημεία του εξωτερικού κελύφους», περιοδικό «Κτίριο», Νοέμβριος 2009, τεύχος 214 (10/2009), σελ. 117-141.
12. Αραβαντινός Δ., «Η θερμομόνωση των κτηρίων και τα θερμομονωτικά υλικά», διδακτικό εγχειρίδιο για τις απαιτήσεις του μαθήματος «Οικοδομική II», Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτηρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2009.
13. Αραβαντινός Δ., «Υγροπροστασία κτηρίων», διδακτικό εγχειρίδιο για τις απαιτήσεις του μαθήματος «Οικοδομική II», Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτηρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2005.
14. Αραβαντινός Δ., Τσακίρης Ν., Γιαρμά Χρ.: «Μετρητικοί έλεγχοι της θερμικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σε θέσεις θερμογεφυρών και προτάσεις βελτιωτικών επεμβάσεων», 1ο πανελλήνιο συνέδριο «δομικών υλικών και στοιχείων», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας., Αθήνα, 21 - 23 Μαΐου 2008, πρακτικά συνεδρίου, σελίδες 735-746, τόμος Β'.
15. Cziiesielsk E:, «Bauphysik Kalender», Ernst & Sohn, 2004.
16. Holman J. P., «Heat Transfer», McGraw-Hill, 1989.
17. Κακάτσιος. Ξ., «Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης», Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα 2006.
18. Mikheev M., «Μετάδοση Θερμότητας», εκδόσεις Γ. Φούντας, Αθήνα 1982.
19. Schild E., Oswald R., Rogier D., Schweikert H., Schnapauff V., «Ευπαθή σημεία. Πρόληψη και αντιμετώπιση κατασκευαστικών λαθών», 5 τόμοι, ελληνική μετάφραση από τη γερμανική έκδοση, 2η έκδοση, εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα, 1982.
20. Schmitt H., «Κτηριακές κατασκευές», ελληνική μετάφραση από τη γερμανική έκδοση, εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα, 1980, 7η έκδοση.
21. VDI-WARMEATLAS, Κ.Ν. Πάττας, καθ. Α.Π.Θ., επιμέλεια ελληνικής έκδοσης, «Μετάδοσις θερμότητος – Εφαρμογαί εις βιομηχανικάς κατασκευάς», Θεσσαλονίκη, 1978.

22. Wendehorst R., «Δομικά υλικά», ελληνική μετάφραση από τη γερμανική έκδοση, εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα, 1981, 21η έκδοση.