

Ιδιότητες και συμπεριφορά δαπέδων σε σχέση με τη θερμότητα

Γεώργιος Ι. Πουλάκος,
Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Αρχιτεκτόνων Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή, διερευνάται η επίδραση των υποστρωμάτων στη θερμική συμπεριφορά των δαπέδων σε εσωτερικούς χώρους και στη θερμική αίσθηση που προκαλούν τα δάπεδα στους ενοίκους. Εξετάζονται οι θερμικές ιδιότητες υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δαπέδων, όπως σκυρόδεμα, μάρμαρο, μωσαϊκό, κεραμικά πλακάκια, γαρμπιλόδεμα, περλιτόδεμα, κονίαμα. Τα δάπεδα κατατάσσονται, σε σχέση με την αίσθηση θερμότητας, σε μια κλίμακα από το «πολύ ψυχρό» μέχρι το «πολύ θερμό», με κριτήριο τη θερμική επίχυση του υλικού. Ακολουθώς, μελετάται η θερμική συμπεριφορά 6 τύπων δαπέδων με υποστρώματα σε αντιστοιχία με την αίσθηση θερμότητας. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της εργασίας προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη χρήση των υλικών στην κατασκευή δαπέδων εσωτερικού χώρου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όταν ο αέρας είναι στάσιμος, γεγονός το οποίο σπάνια συμβαίνει στην πράξη, η επιφανειακή θερμοκρασία του δαπέδου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και του εδάφους ή του χώρου κάτω από το πάτωμα, καθώς και από τη θερμική αγωγιμότητα του δαπέδου και των υποστρωμάτων του. Στη μη σταθερή κατάσταση, η στιγμιαία επιφανειακή θερμοκρασία του δαπέδου καθορίζεται από το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται, τη θερμική αγωγιμότητα και την ειδική θερμότητα όγκου του δαπέδου [1,2,3].

Η επαφή του ποδιού με δάπεδα με επιφανειακή θερμοκρασία μεγαλύτερη από 28 °C, για μεγάλο χρονικό διάστημα, προκαλεί δυσάρεστη αίσθηση θερμότητας, ενώ, για θερμοκρασία μικρότερη από 15 °C, προκαλείται αίσθηση ψύχους [4]. Η μεταφορά θερμότητας από το πόδι στο δάπεδο είναι ουσιαστικά πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας από στερεό σε στερεό. Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα μεταφοράς της θερμότητας, από το θερμότερο στο ψυχρότερο στερεό, καθορίζεται από τη θερμική επίχυση, b , του ψυχρότερου, η οποία καθορίζεται από τη σχ. (1.1).

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad 1.1$$

Η ταχύτητα, με την οποία αποκαθίσταται θερμική ισοροπία στο ψυχρότερο στερεό, εξαρτάται από τη θερμική διάχυση του, a [5] (σχ. (1.2)), ενώ η στιγμιαία επιφανειακή

θερμοκρασία, t_s , στην επιφάνεια επαφής, προσδιορίζεται από τη σχ. (1.3). [6,7]

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad 1.2$$

$$t_s = \frac{b_1 t_1 + b_2 t_2}{b_1 + b_2} \quad 1.3$$

Για δάπεδα, τα οποία αποτελούνται από μία μόνο στρώση, η πτώση της θερμοκρασίας του ποδιού κατά την επαφή του με το δάπεδο, είναι τόσο γρηγορότερη όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή b . Σε εσωτερικούς χώρους το δάπεδο αποτελείται, σχεδόν πάντοτε, από περισσότερες από μια στρώσεις, και η επίδραση των υποστρωμάτων στη θερμική συμπεριφορά του είναι σημαντική. Συνεπώς, η αίσθηση θερμότητας κατά την επαφή του ποδιού με το δάπεδο θα καθορίζεται από τη νέα τιμή θερμικής επίχυσης, b , όπως αυτή διαμορφώνεται από την επίδραση των υποστρωμάτων.

Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί, τις τελευταίες δεκαετίες, με τη μελέτη της συμπεριφοράς των θερμών και ψυχρών δαπέδων. [8,9,10] Σε μερικές από αυτές αναφέρονται αποτελέσματα από πειραματικές μετρήσεις οι οποίες διεξήχθησαν, με τη χρήση τεχνητού ποδιού [11,12]. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιούνται εργαστηριακές μετρήσεις, και μελετάται η θερμική συμπεριφορά των δαπέδων εσωτερικού χώρου, υπό την επίδραση υποστρωμάτων διάφορων υλικών. Η πειραματική μέθοδος βασίζεται στη θεωρία της θερμικής αγωγιμότητας πολύστρωτων στερεών υλικών.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [W/m.K]

ρ η φαινόμενη πυκνότητα σε Kg/m³

c η ειδική θερμότητα σε W.h/Kg.K

b η θερμική επίχυση σε W.s^{1/2}/m²K

a η θερμική διάχυση σε m²/s

t η θερμοκρασία σε °C

Δ τα υλικά δαπέδων

Y τα υλικά υποστρωμάτων

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις κατασκευές, για την κατασκευή των δαπέδων (Δ) και των υποστρωμάτων (Y), και περιγράφονται παρακάτω.

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικών Υλικών του Ε.Μ.Π. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προσδιορίστηκαν χαρακτηριστικές φυσικές και θερμικές ιδιότητες των εξετασθέντων υλικών, σύμφωνα με τους αντίστοιχους κανονισμούς. Τα δοκίμια, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν σε ξηρά κατάσταση.

Πίνακας 1: Περιγραφή υλικών δαπέδων (Δ).

- Δ_1 . Σκυρόδεμα (πάχος 15,0 cm): Μίγμα αδρανών με διαβάθμιση 0/30 mm, κοκκομετρική καμπύλη στην «εξαιρετική περιοχή» του διαγράμματος των κανονισμών και τσιμέντου καλής ποιότητας με συντελεστή νερού-τσιμέντου 0,60.
- Δ_2 . Μωσαϊκό (πάχος 4,0 cm): Σχηματίζεται από κοινό τσιμέντο και μεγάλες ψηφίδες και είναι λείο.
- Δ_3 . Μάρμαρο (πάχος 2,0 cm): Τυποποιημένες πλάκες (30,0 × 60,0 cm) μαρμάρου Πεντέλης λευκού χρώματος, με λεία επιφάνεια.
- Δ_4 . Κεραμικό (πάχος 9,0 cm): Πλακίδια (30,0×30,0 cm) με επιφανειακό υάλωμα.
- Δ_5 . Πλαστικό (πάχος 2,0 cm): Πλακίδια P.V.C. (30,0×30,0 cm), που επικολλώνται σε υπόστρωμα.
- Δ_6 . Δρυς (πάχος 2,0 cm): Ξύλινες σανίδες που επικολλώνται με βοηθητικό χαρτί σε υπόστρωμα.
- Δ_7 . Οξυά (πάχος 2,0 cm): Φυσικό ξύλο Σλοβενίας, με κόκκινο χρώμα, σε λωρίδες.
- Δ_8 . Λίμπα (πάχος 2,0 cm): Φυσικό ξύλο Αφρικής, σε λωρίδες.
- Δ_9 . Τάπητες (ολικό ύψος 12,0 mm): Τάπητες με σύνθεση ακρυλική 100% και επιφανειακή πυκνότητα 3,0 Kg/m².
- Δ_{10} . Φελλός (πάχος 4,0 cm): Πλάκες φελλού (30,0×30,0 cm), που επικολλώνται σε υπόστρωμα.

Πίνακας 2: Περιγραφή υλικών υποστρωμάτων (Y).

- Y_1 . Σκυρόδεμα: Όπως το υλικό δαπέδου, Δ_1 .
- Y_2 . Γαρμπιλόδεμα (πάχος 4,0 ÷ 8,0 cm): Μίγμα από άμμο σκυροδέματος, γαρμπίλι 7/15 mm, κοινό τσιμέντο (συντελεστής νερού-τσιμέντου, $w = 0,70$).
- Y_3 . Περγολιτόδεμα (πάχος 8,0 cm): Κατασκευάζεται από κοινό τσιμέντο, χονδρόκοκκο περγολίτη με διαβάθμιση 0,5/4 mm σε αναλογία όγκου τσιμέντο, περγολίτη 1,0 : 4,0.

- Y_4 . Κονίαμα (πάχος 2,0 cm): Υπόστρωμα κατά την τοποθέτηση πλακών από μάρμαρο. Κατασκευάζεται από ασβέστη, τσιμέντο και άμμο σε αναλογία όγκου 1,5 : 1,0 : 8,0.
- Y_5 . Πεύκο (πάχος με ψευδοπάτωμα 2,0 cm, πάχος χωρίς ψευδοπάτωμα 5,0 cm): Φυσικό ξύλο Σουηδίας, το οποίο χρησιμοποιείται στην κατασκευή καρφωτού ξύλινου δαπέδου.
- Y_6 . Μοριοσανίδα (πάχος 6,0 ή 9,0 mm): Είναι προϊόν ξύλου (εμπορική ονομασία: νοβοπάν) στο οποίο επικολλάται δάπεδο φελλού.
- Y_7 . Ινοσανίδα μέσης πυκνότητας (πάχος 6,0 ή 9,0 mm): Προϊόν ξύλου (εμπορική ονομασία M.D.F.), το οποίο χρησιμοποιείται στην κατασκευή δαπέδου φελλού, όπως το Y_6 .
- Y_8 . Εξηλασμένη Πολυστερίνη (πάχος 4,0÷5,0 cm): Πλάκες με διαστάσεις 60,0 × 120,0 cm.
- Y_9 . Ασφαλτική μεμβράνη (πάχος 4,0 mm): Στεγανωτικό υπόστρωμα από μάλλινη, πίσσα και υπόλειμμα πίσσας με επιφανειακή πυκνότητα 3,5 Kg/m².
- Y_{10} . Φελλός: Όπως το υλικό δαπέδου Δ_{10} .
- Y_{11} . Συμπιεσμένος φελλός: Δοκίμια με πάχος 6,0 mm, με πυρήνα κατασκευής δαπέδου από φελλό με πάχος 3,0 mm ή δαπέδου ξύλου ίδιου πάχους.
- Y_{12} . Φελλός-καουτσούκ (πάχος 2,0 ÷ 3,0 mm): Μίγμα φελλού-καουτσούκ σε ρολό (πλάτος 1,0 cm, μήκος έως 20,0 m). Πυρήνας στην κατασκευή δαπέδου φελλού ή ξύλου με μεγάλη ηχομονωτική ικανότητα ($\rho=550 \text{ Kg/m}^3$, $\lambda=0,10 \text{ W/m.K}$).

Για τεχνητούς λίθους, σκυρόδεμα (Δ_1 ή Y_1), μωσαϊκό (Δ_2), γαρμπιλόδεμα (Y_2), περγολιτόδεμα (Y_3) και κονίαμα (Y_4) οι μετρήσεις έγιναν σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, η θερμική διάχυση, η θερμική επίχυση και η αδράνεια των φυσικών ξύλων Δ_6 , Δ_7 , Δ_8 και Y_5 προσδιορίστηκαν σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες τους. Ο προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας των υλικών έγινε μετά από ακριβή μέτρηση του όγκου και του βάρους πρισματικών δοκιμίων. (πίνακες 3,4 και σχήματα 1,2)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (πίνακες 3,4 και σχήματα 3,4) και η ειδική θερμότητα όγκου προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια της ειδικής φορητής συσκευής “CT METRE”. Η μέθοδος, η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι δυναμική, μικρής χρονικής διάρκειας και ακριβής. Ο χρόνος κάθε μέτρησης δεν ξεπερνά τα 500 s και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, μετά από επανάληψη, είναι της τάξης του ± 2%. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στη διοχέτευση θερμότητας στο δοκίμιο με τη βοήθεια καταλλήλων «αισθητήρων», οι οποίοι συνδέονται με τη συσκευή, και τη μέτρηση του ρυθμού ανόδου και πτώσης της θερμοκρασίας του δοκιμίου. Οι «αισθητήρες» συνοδεύονται από θερμοστοιχεία, με τη βοήθεια των οποίων αναγράφεται διαρκώς στην οθόνη της συσκευής η θερμοκρασία του δοκιμίου. Έχουν σχήμα ράβδου, δακτυλίου ή πλαισίου και είτε εισάγονται στο δοκίμιο (περί-

πτωση ράβδου), είτε τοποθετούνται σε στενή επαφή μεταξύ δύο τμημάτων του δοκιμίου. Για κάθε μέτρηση απαιτείται η επιλογή ορισμένου «προγράμματος» και η είσοδος ικανού

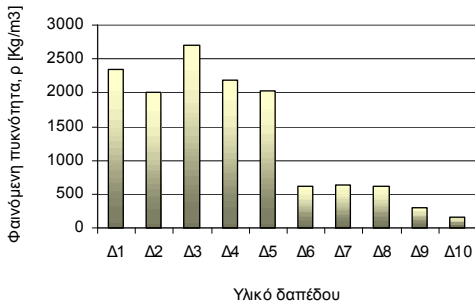
αριθμού παραμέτρων, ανάλογα με τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού και το είδος του «αισθητήρα». Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται στην οθόνη της συσκευής.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών δαπέδων.

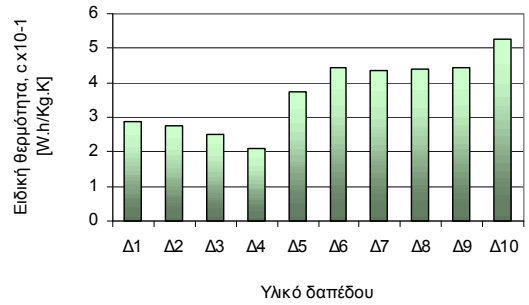
Συμβ.	Υλικό στρώσης	ρ (Kg/m ³)	λ (W/m.K)	c ($\times 10^{-1}$ Wh/Kg.K)	b (W.s ^{1/2} /m ² .K)	a ($\times 10^{-6}$ m ² /s)
Δ_1	Σκυρόδεμα	2350	1.67	2.86	2011	0.69
Δ_2	Μωσαϊκό	2000	1.30	2.77	1612	0.65
Δ_3	Μάρμαρο Πεντέλης	2700	2.90	2.50	2655	1.19
Δ_4	Κεραμικό	2180	1.10	2.08	1340	0.67
Δ_5	Πλαστικό (PVC)	2020	0.25	3.75	826	0.10
Δ_6	Δρυς	610	0.16	4.44	395	0.16
Δ_7	Οξύα	640	0.18	4.36	425	0.18
Δ_8	Λίμπα	620	0.17	4.39	408	0.17
Δ_9	Τάπητας ακρ. (χαλί)	290	0.08	4.44	193	0.17
Δ_{10}	Φελλός	150	0.05	5.28	120	0.18

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών υποστρωμάτων.

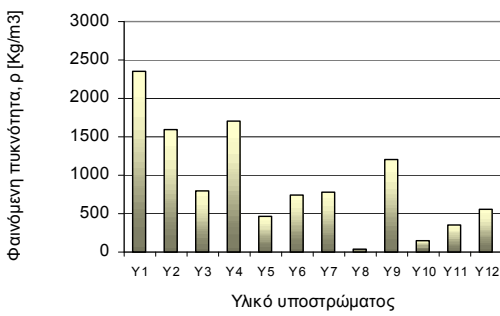
Συμβ.	Υλικό στρώσης	ρ (Kg/m ³)	λ (W/m.K)	c ($\times 10^{-1}$ Wh/Kg.K)	b (W.s ^{1/2} /m ² .K)	a ($\times 10^{-6}$ m ² /s)
Y_1	Σκυρόδεμα	2350	1.67	2.86	2011	0.69
Y_2	Γαρμπιλόδεμα	1600	0.80	3.06	1187	0.45
Y_3	Περλιτόδεμα	800	0.20	5.69	573	0.12
Y_4	Κονίαμα	1700	0.87	2.89	1240	0.49
Y_5	Πεύκο	470	0.12	4.94	317	0.14
Y_6	Μοριοσανίδα	740	0.23	4.11	502	0.21
Y_7	Ινοσανίδα (MDF)	770	0.25	4.03	528	0.22
Y_8	Εξηλ. Πολυστερίνη	34	0.03	3.89	38	0.63
Y_9	Ασφαλτ. Μεμβράνη	1200	0.27	3.19	610	0.2
Y_{10}	Φελλός	150	0.05	5.28	120	0.18
Y_{11}	Συμπιεσμένος φελλός	350	0.07	5.22	215	0.11
Y_{12}	Φελλός-καουτσούκ	550	0.10	4.72	306	0.11



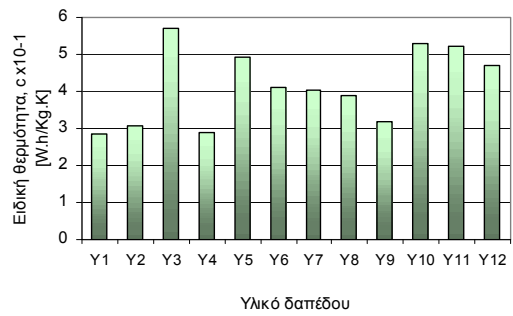
Σχήμα 1. Τιμές της φαινόμενης πυκνότητας υλικών δαπέδου.



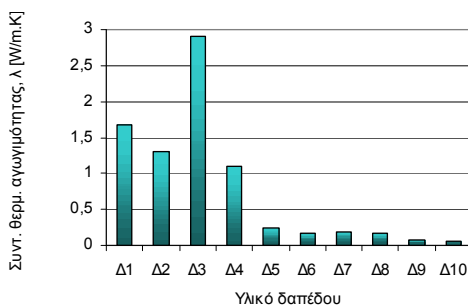
Σχήμα 5. Τιμές της ειδικής θερμότητας υλικών δαπέδου.



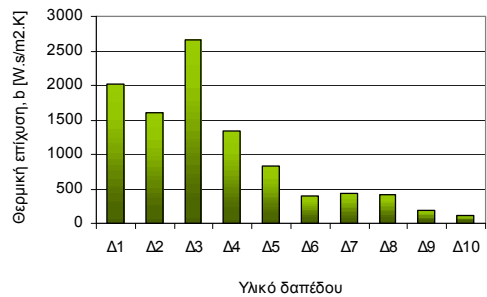
Σχήμα 2. Τιμές της φαινόμενης πυκνότητας υλικών υποστρώματος.



Σχήμα 6. Τιμές της ειδικής θερμότητας υλικών υποστρώματος.



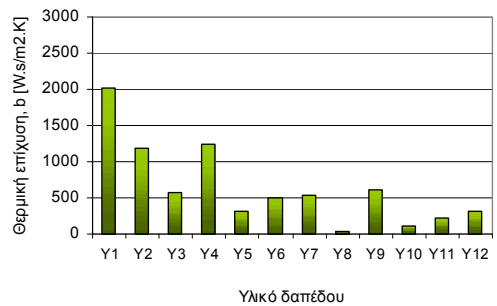
Σχήμα 3. Τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας υλικών δαπέδου.



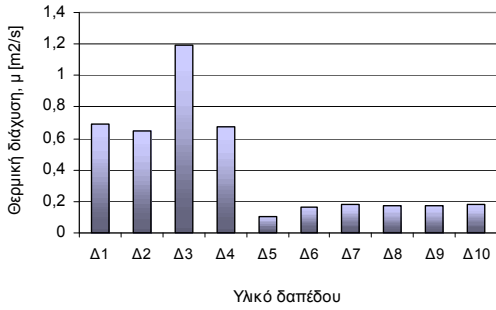
Σχήμα 7. Τιμές της θερμικής επίχυσης υλικών δαπέδου.



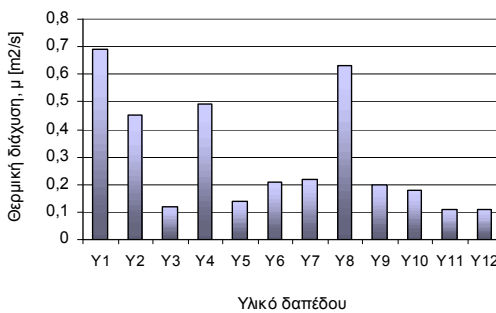
Σχήμα 4. Τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας υλικών υποστρώματος.



Σχήμα 8. Τιμές της θερμικής επίχυσης υλικών υποστρώματος.



Σχήμα 9. Τιμές της θερμικής διάχυσης υλικών δαπέδου.



Σχήμα 10. Τιμές της θερμικής διάχυσης υλικών υποστρώματος.

Από τις τιμές της πυκνότητας, της ειδικής θερμότητας όγκου και του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, προσδιορίστηκαν η ειδική θερμότητα (σχ. 3.1), η επίχυση (σχ. 1.1) και η θερμική διάχυση (σχ. 1.2).

$$c = \frac{c'}{\rho} \quad 3.1$$

Οι τιμές των αποτελεσμάτων αναγράφονται στους πίνακες 3 και 4 και απεικονίζονται με τη μορφή ιστογραμμάτων στα σχήματα 5, 7, 9 και 6, 8, 10 για τα υλικά δαπέδου και υποστρώματος, αντιστοίχως.

Ακολούθως, προσδιορίζεται και η θερμική επίχυση των εξετασθέντων δαπέδων με την παρακάτω μέθοδο :

Αρχικά, προσδιορίζεται ο αριθμός των υποστρωμάτων της κατασκευής δάπεδο-πάτωμα, n+1, όπου είναι n = 1, 2, ... Για το δάπεδο ο δείκτης θεωρείται 1. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται η θερμική επίχυση κάθε στρώματος n σχ. (3.2). Ακολούθως, προσδιορίζεται η θερμική επίχυση κάθε υποστρώματος, n, κάτω από την επίδραση του επόμενου, n+1, (ροή θερμότητας από το n στο n+1), από τη σχ. (3.3), η οποία οδηγεί επαγωγικά στον προσδιορισμό της θερμικής επίχυσης B₁ ή B της ανώτατης στρώσης (δάπεδο).

$$b_n = \sqrt{\lambda_n \rho_n c_n} \quad 3.2$$

$$B_{n,n+1} = b_n + K_{n,n+1} \cdot b_n \quad 3.3$$

Ο συντελεστής K_{n,n+1} εκφράζει την επίδραση του στρώματος n+1 στο n και εξαρτάται από το λόγο b_{n+1}/b_n και από το χρονικό μέτρο Fourier, N_{Fo,n}, του στρώματος n. Είναι :

$$N_{Fo,n} = \frac{\alpha_n \cdot \tau}{d_n^2} \quad 3.4$$

όπου είναι :

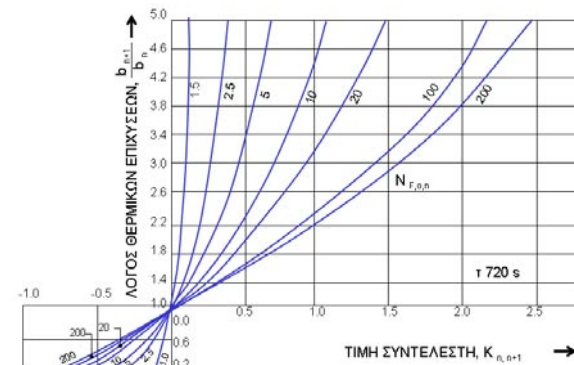
α_n : η θερμική διάχυση του στρώματος, n σε m²/s

d_n : το πάχος του στρώματος, n σε m

τ : ο χρόνος θερμικής επίχυσης ή χρόνος επαφής σε s

N_{Fo,n} : το χρονικό μέτρο Fourier του στρώματος, n.

Η τιμή του συντελεστή K_{n,n+1} είναι θετική, αρνητική ή μηδέν ανάλογα με την τιμή του λόγου b_{n+1}/b_n. Για απλοποίηση των υπολογισμών η τιμή του K_{n,n+1} προσδιορίστηκε από το διάγραμμα (b_{n+1}/b_n, K_{n,n+1}) για διάφορες τιμές του χρονικού μέτρου Fourier. Το διάγραμμα είναι αντιστοίχιση του διαγράμματος της απεικόνισης της θερμοκρασιακής κατανομής, που δίνει η θεωρία θερμικής αγωγιμότητας κατά την επαφή δυο στερεών υλικών με διαφορετική θερμοκρασία για χρόνο t.



Σχήμα 11 Μεταβολή του συντελεστή θερμικής επίδρασης υποστρώματος n+1 επί στρώματος n, με το λόγο θερμικών επίχυσεων, για διάφορες τιμές του χρονικού μέτρου Fourier.

Στο σχήμα 11 απεικονίζεται το διάγραμμα (b_{n+1}/b_n, K_{n,n+1}), για διάφορες τιμές του χρονικού μέτρου Fourier και για χρόνο επαφής 720 s. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, κριτήριο της επίδρασης του υποστρώματος n+1 επί του n, αποτελεί το χρονικό μέτρο Fourier, N_{Fo,n}.

- Για 1 / N_{Fo,n} > 3 η τιμή του συντελεστή K_{n,n+1} είναι αμελητέα, ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου b_{n+1}/b_n.
- Για 1 / N_{Fo,n} < 3 εξετάζεται το άθροισμα (1 / N_{Fo,n}) + (1 / N_{Fo,n+1}) σε σχέση με την τιμή 3 και
- Αν (1 / N_{Fo,n}) + (1 / N_{Fo,n+1}) > 3 η τιμή του K_{n,n+1} λαμβάνεται από το διάγραμμα του σχήματος 11 από της τιμές b_{n+1}/b_n και N_{Fo,n}.
- Αν (1 / N_{Fo,n}) + (1 / N_{Fo,n+1}) < 3 εξετάζεται η επίδραση του υποστρώματος n+2 επί του n+1 κ.ο.κ.

Ακολούθως μελετάται η θερμική συμπεριφορά 6 τύπων δαπέδων - υποστρωμάτων T₁, T₂, T₃, T₄, T₅ και T₆, τα οποία αντιστοιχούν στις έξι περιοχές της κλίμακας που εκτείνεται από «πολύ ψυχρό» μέχρι «πολύ θερμό» (πίνακας 4). Οι τομές των παραπάνω τύπων δαπέδων-υποστρωμάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 12.

Αρχικά, προσδιορίστηκε η θερμική επίχυση της ανώτατης στρώσης (δάπεδο), κάτω από την επίδραση των υποστρωμάτων. Ο προσδιορισμός έγινε με τη βοήθεια του προηγούμενου κριτηρίου, των σχ. (3.2) και (3.4) και του διαγράμματος του σχήματος 11. Η θερμική αδράνεια των δαπέδων προσδιορίστηκε από τις παρακάτω σχέσεις :

$$D = R \cdot b \quad 3.5$$

$$D_1 = R_1 \cdot b_1 \quad 3.6$$

$$D_1 = R_1 \cdot B \quad 3.7$$

όπου είναι :

D, D_1 : η θερμική αδράνεια [$s^{1/2}$] στρώσης υλικού και δαπέδου χωρίς υποστρώματα, αντίστοιχα.

R, R_1 : η θερμική αντίσταση [$m^2 \cdot K / W$] της στρώσης και του δαπέδου, αντίστοιχα.

B, b_1 : η θερμική επίχυση [$W \cdot s^{1/2} / m^2 \cdot K$] της στρώσης και του δαπέδου χωρίς υποστρώματα, αντίστοιχα.

B : η θερμική επίχυση [$W \cdot s^{1/2} / m^2 \cdot K$] του δαπέδου με υποστρώματα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών αναγράφονται στον πίνακα 4.

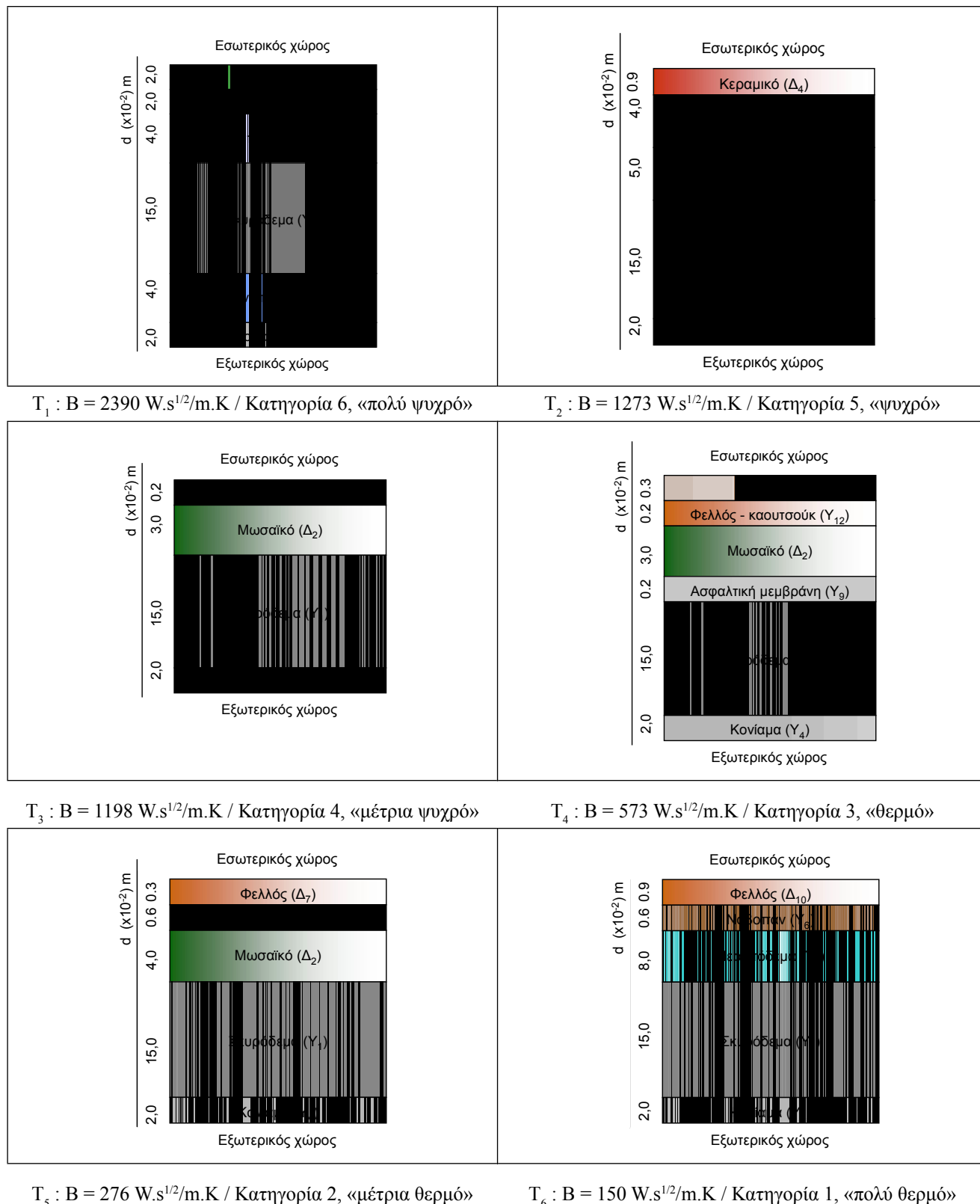
Τέλος, προσδιορίστηκε η στιγμιαία πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας κατά την επαφή «τεχνητού ποδιού» με τα δάπεδα του Πίνακα 3 και τους τύπους δαπέδων με υποστρώματα $T_1 \div T_6$ του σχήματος 12. Ο προσδιορισμός έγινε με τη βοήθεια της σχ. (1.3) και τα στοιχεία του «τεχνητού ποδιού» και τα αποτελέσματα για διάφορες θερμοκρασίες δαπέδου αναγράφονται στους Πίνακες 7 και 8.

Πίνακας 5. Κατηγορίες δαπέδων σε σχέση με το αίσθημα θερμότητας ή ψύχους.

<i>B</i> δαπέδου $W \cdot s^{1/2} / m^2 \cdot K$	Αριθμός συμβόλου	Κατηγορία δαπέδου
≤ 150	1	«πολύ θερμό»
$150 < \leq 350$	2	«μέτρια θερμό»
$350 < \leq 700$	3	«θερμό»
$700 < \leq 1200$	4	«μέτρια ψυχρό»
$1200 < \leq 1800$	5	«ψυχρό»
$1800 <$	6	«πολύ ψυχρό»

Πίνακας 6. Τιμές της θερμικής αδράνειας των εξετασθέντων δαπέδων χωρίς υποστρώματα και με υποστρώματα.

Συμβ.	Υλικό δαπέδου	Πάχος m	R ($m^2 \cdot K / W$)	Θερμική αδράνεια υλικού δαπέδου $s^{1/2}$	Τύπος δαπέδου	Θερμική αδράνεια τύπου δαπέδου $s^{1/2}$
Δ_3	Μάρμαρο	0.02	0.7	18.3	T_1	16.5
Δ_4	Κεραμικό	0.009	0.8	11.0	T_2	10.4
Δ_5	Πλαστικό	0.002	0.8	6.6	T_3	9.6
Δ_6	Δρυς	0.020	12.5	49.4	T_4	48.4
Δ_{10}	Φελλός	0.004	8.0	9.6	T_5	19.2
Δ_{10}	Φελλός	0.009	18.0	21.6	T_6	27.0



Σχήμα 12. Τομές τυπικών δαπέδων που αντιστοιχούν στις έξι θερμικές κατηγορίες δαπέδων της κλίμακας «πολύ ψυχρό» ÷ «πολύ θερμό».

Πίνακας 7. Θερμικές ιδιότητες και θερμοκρασίες «τεχνητού ποδιού» και των εξετασθέντων τύπων δαπέδου.

«Τεχνητό πόδι» : Χαλκός, $t_1 = 36,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 8890 \text{ Kg/m}^3$, $\lambda = 381 \text{ W/m.K}$, $c = 377 \text{ W.h/Kg.K}$, $b_1 = 35734 \text{ W.s}^{1/2}/\text{m}^2.\text{K}$

Συμβ.	Υλικό επιφανειακής στρώσης	b δαπέδου ($\text{W.s}^{1/2} / \text{m}^2.\text{K}$)	Αρχική επιφανειακή θερμοκρασία υλικού δαπέδου ($^\circ\text{C}$)	Στιγμιαία πτώση θερμοκρασίας «τεχνητού ποδιού» ($^\circ\text{C}$)
T_1	Μάρμαρο (Δ_3)	2390	5	2.0
			10	1.7
			15	1.3
			20	1.0
			25	0.7
T_2	Κεραμικό (Δ_4)	1273	5	1.1
			10	0.9
			15	0.7
			20	0.6
			25	0.4
T_3	Κεραμικό (Δ_5)	1198	5	1.0
			10	0.9
			15	0.7
			20	0.5
			25	0.4
T_4	Δρυς (Δ_6)	573	5	0.5
			10	0.4
			15	0.3
			20	0.3
			25	0.2
T_5	Οξύα (Δ_7)	276	5	0.2
			10	0.2
			15	0.2
			20	0.1
			25	0.09
T_6	Φελλός (Δ_{10})	150	5	0.1
			10	0.1
			15	0.1
			20	0.1
			25	0.05

Πίνακας 8. Θερμικές ιδιότητες και θερμοκρασίες «τεχνητού ποδιού» και υλικών δαπέδου.

«Τεχνητό πόδι»: Χαλκός, $t_1 = 36,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 8890 \text{ Kg/m}^3$, $\lambda = 381 \text{ W/m.K}$, $c = 377 \text{ W.h/Kg.K}$, $b_1 = 35734 \text{ W.s}^{1/2}/\text{m}^2.\text{K}$				
Συμβ.	Υλικό δαπέδου	b δαπέδου ($\text{W.s}^{1/2}/\text{m}^2.\text{K}$)	Αρχική επιφανειακή θερμοκρασία υλικού δαπέδου ($^\circ\text{C}$)	Στιγμαία πτώση θερμοκρασίας «τεχνη- τού ποδιού» ($^\circ\text{C}$)
Δ_1	Σκυρόδεμα	2011	5	1.7
			10	1.4
			15	1.1
			20	0.9
			25	0.6
Δ_2	Μωσαϊκό	1612	5	1.4
			10	1.1
			15	0.9
			20	0.7
			25	0.5
Δ_3	Μάρμαρο Πεντέλης	2655	5	2.2
			10	1.8
			15	1.5
			20	1.1
			25	0.8
Δ_4	Κεραμικό	1340	5	1.1
			10	1.0
			15	0.8
			20	0.6
			25	0.4
Δ_5	Πλαστικό (PVC)	826	5	0.7
			10	0.6
			15	0.5
			20	0.4
			25	0.3
Δ_6	Δρυς	395	5	0.3
			10	0.3
			15	0.2
			20	0.2
			25	0.1
Δ_7	Οξυά	425	5	0.4
			10	0.3
			15	0.3
			20	0.2
			25	0.1
Δ_8	Λίμπα	408	5	0.4
			10	0.3
			15	0.2
			20	0.2
			25	0.1
Δ_9	Τάπητας ακρυλ. (χαλί)	193	5	0.2
			10	0.1
			15	0.1
			20	0.1
			25	0.1
Δ_{10}	Φελλός	120	5	0.1
			10	0.1
			15	0.1
			20	0.1
			25	0.04

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας των εξετασθέντων υλικών δαπέδου και υποστρωμάτων ποικίλουν σε ευρεία κλίμακα (πίνακες 3,4 και σχήματα 1,2).

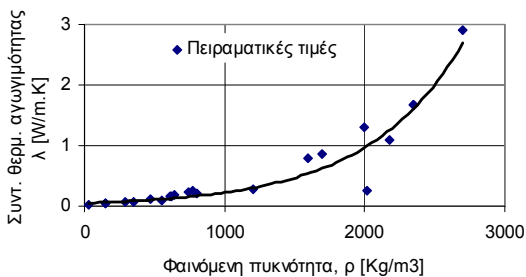
Οι διαφορές είναι σημαντικές και οι τιμές κυμαίνονται από 34 Kg/m^3 (εξηλασμένη πολυστερίνη) μέχρι 2700 Kg/m^3 (λευκό μάρμαρο).

Οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, μικρότερες από $1,0 \text{ W/m.K}$ με εξαίρεση το σκυρόδεμα, το μωσαϊκό και τα κεραμικά πλακάκια, στα οποία οι τιμές κυμαίνονται από $1,0 \div 2,0 \text{ W/m.K}$, και το μάρμαρο που πλησιάζει την τιμή $3,0 \text{ W/m.K}$. Τα περισσότερα μπορούν να θεωρηθούν ως θερμομονωτικά με μέση τιμή κάτω από $0,2 \text{ W/m.K}$ (πίνακες 3,4 και σχήματα 3,4).

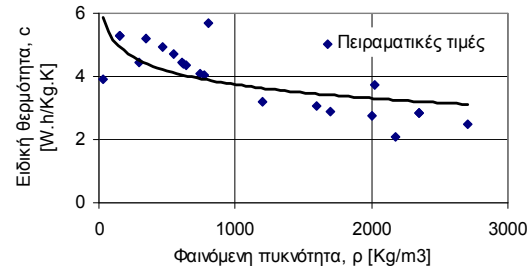
Στο σχήμα 13 αποδίδεται γραφικά ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των εξετασθέντων υλικών σε σχέση με τη φαινόμενη πυκνότητά τους. Από τη μορφή της καμπύλης διαπιστώνεται η μεγάλη επίδραση της φαινόμενης πυκνότητας στη θερμική αγωγιμότητα των υλικών.

Από τους πίνακες 3 και 4 και τα σχήματα 5 και 6 διαπιστώνεται ότι η ειδική θερμότητα όλων σχεδόν των εξετασθέντων υλικών, κυμαίνεται από $2,00 \times 10^{-1} \div 5,30 \times 10^{-1} \text{ W.h/Kg.K}$, με εξαίρεση το περλιτόδεμα που ξεπερνά την τιμή των $5,30 \times 10^{-1} \text{ W.h/Kg.K}$.

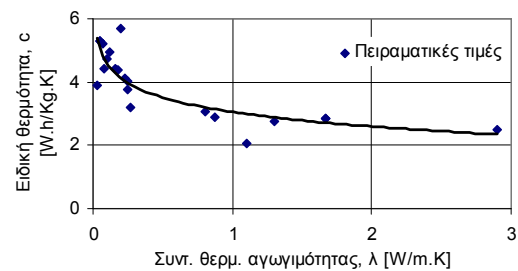
Στα διαγράμματα των σχημάτων 14 και 15 αποδίδεται η μεταβολή της ειδικής θερμότητας με τη φαινόμενη πυκνότητα και το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, αντιστοίχως. Από την καμπύλη του σχήματος 14 προκύπτει, ότι η ειδική θερμότητα μειώνεται πολύ με την αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας. Από την καμπύλη του σχήματος 15 προκύπτει, ότι ανάλογη και σε εντονότερο βαθμό είναι η επίδραση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στην ειδική θερμότητα των υλικών. Γενικά η ειδική θερμότητα μειώνεται με την αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



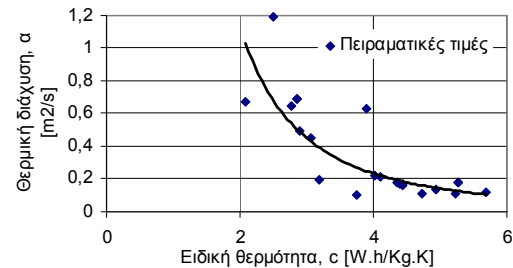
Σχήμα 13. Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τη φαινόμενη πυκνότητα.



Σχήμα 14. Μεταβολή της ειδικής θερμότητας των εξετασθέντων υλικών με τη φαινόμενη πυκνότητα..



Σχήμα 15 Μεταβολή της ειδικής θερμότητας σε σχέση με το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



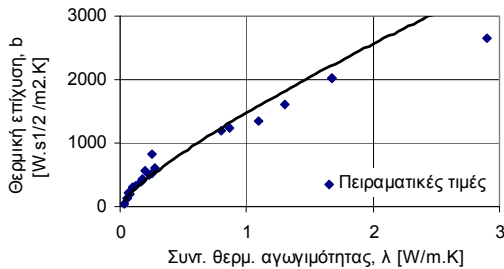
Σχήμα 16. Σχέση μεταξύ ειδικής θερμότητας και θερμικής διάχυσης των εξετασθέντων υλικών.

Οι τιμές της θερμικής διάχυσης των εξετασθέντων υλικών κυμαίνονται από $0,10 \div 1,19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Τη μικρότερη θερμική διάχυση έχει το πλαστικό δάπεδο με τιμή $0,10 \times 10^{-6} \text{ W/m.K}$ και τη μεγαλύτερη το μάρμαρο με $1,19 \times 10^{-6} \text{ W/m.K}$. (πίνακες 3 και 4 και σχήματα 7 και 8).

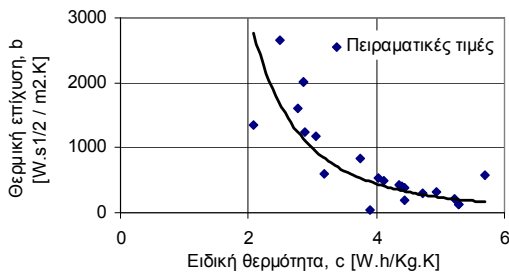
Η μεταβολή της θερμικής διάχυσης σε σχέση με την ειδική θερμότητα απεικονίζεται στο Σχήμα 16. Από αυτό προκύπτει ότι η θερμική διάχυση μειώνεται με την αύξηση της ειδικής θερμότητας. Μάλιστα, διαπιστώνεται μεγάλη μείωση της θερμικής διάχυσης των εξετασθέντων υλικών με την αύξηση της ειδικής θερμότητας.

Στα περισσότερα εξετασθέντα υλικά η τιμή της θερμικής επίχυσης είναι μικρότερη από $900 \text{ W.s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$. Συμβατικά υλικά, όπως σκυρόδεμα, μωσαϊκό, μάρμαρο, κεραμικά πλακάκια κ.ά., έχουν μεγάλη θερμική επίχυση. Στο φυσικό ξύλο οι τιμές είναι μικρές και κυμαίνονται γύρω στα $400 \text{ W.s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$, με μικρότερη τιμή τα $317 \text{ W.s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ για το πεύκο.

Χαρακτηριστική είναι η πολύ μικρή τιμή της εξηλασμένης πολυστερίνης, η οποία είναι $38 \text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$. Σημαντικά μικρές είναι και οι τιμές των υπόλοιπων εξετασθέντων υλικών. (πίνακες 3 και 4 και σχήματα 7 και 8).



Σχήμα 17. Μεταβολή της θερμικής επίχυσης των εξετασθέντων υλικών με τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 18 Μεταβολή της θερμικής επίχυσης των εξετασθέντων υλικών με την ειδική θερμότητα.

Η μεταβολή της θερμικής επίχυσης σε σχέση με το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και την ειδική θερμότητα απεικονίζεται στα διαγράμματα των σχημάτων 17 και 18, αντιστοίχως. Από την καμπύλη του σχήματος 17 προκύπτει ότι η θερμική επίχυση αυξάνεται με την αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Η μεταβολή είναι μεγαλύτερη στα υλικά στα οποία η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας είναι μικρότερη από $0,3 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$, κατηγορία στην οποία ανήκουν τα περισσότερα από τα εξετασθέντα υλικά δαπέδου και υποστρώματων (δρυς, οξυά, λίμπα, πεύκο, νοβοπάν, MDF, πλαστικό δάπεδο, περλιτόδεμα, εξηλασμένη πολυστερίνη, ασφατική μεμβράνη, φελλός, συμπιεσμένος φελλός, φελλός – καουτσούκ και ακρυλικός τάπητας).

Τα πειραματικά αποτελέσματα που απεικονίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 18 δείχνουν ότι η θερμική επίχυση μειώνεται γενικά με την αύξηση της ειδικής θερμότητας. Στα υλικά με ειδική θερμότητα μικρότερη από $0,306 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{Kg}\cdot\text{K}$ η μεταβολή της θερμικής επίχυσης είναι τετραπλάσια από τη μεταβολή της ειδικής θερμότητας. Πολύ μικρότερη είναι η μεταβολή στα υλικά με ειδική θερμότητα μεγαλύτερη από $0,306 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{Kg}\cdot\text{K}$.

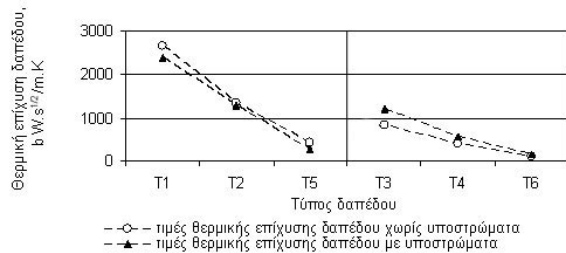
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμικής επίχυσης των υλικών δαπέδου κάτω από την επίδραση υποκείμενων στρώσεων φαίνονται στα έξι τυπικά δάπεδα του

σχήματος 19. Στο σχήμα αυτό, στον τύπο T_1 το δάπεδο είναι λευκό μάρμαρο. Η τιμή της θερμικής επίχυσης του δαπέδου, που προσδιορίστηκε με την αναπτυχθείσα μέθοδο, βρέθηκε ίση με $2390 \text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$. Η νέα τιμή εκφράζει τη θερμική συμπεριφορά του συγκεκριμένου τύπου T_1 , για χρόνο θερμικής επαφής 720 s . Το ίδιο ισχύει και για τους τύπους T_2, T_3, T_4, T_5 και T_6 ($1273, 1198, 573, 276$ και $150 \text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$, αντιστοίχως).

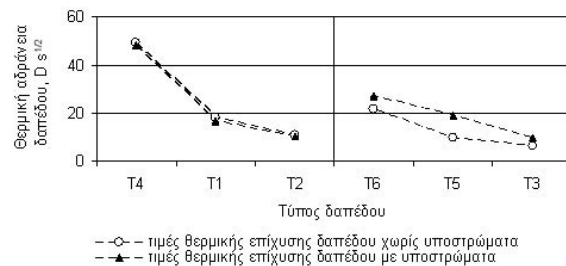
Οι τιμές των συντελεστών επίχυσης των έξι τύπων δαπέδων σε συνδυασμό με τις κατηγορίες του Πίνακα 5 χαρακτηρίζουν τα δάπεδα από πλευράς θερμικής συμπεριφοράς (σχήμα 12).

Οι τιμές της θερμικής αδράνειας μεταξύ των δαπέδων του σχήματος 20 διαφέρουν σημαντικά. Κυμαίνονται από $9,6 \text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ στον τύπο T_3 με πλαστικό δάπεδο μέχρι $48,4 \text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ στον Τύπο T_4 με δρύινο δάπεδο.

Μεγάλες είναι και οι διαφορές της θερμικής αδράνειας στα αντίστοιχα υλικά (Πίνακας 6). Από τα στοιχεία του πίνακα 6 και τα διαγράμματα του σχήματος 20 προκύπτει διαφορά στη θερμική αδράνεια μεταξύ των τύπων των δαπέδων T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 και T_6 και των υλικών των δαπέδων, η οποία είναι αποτέλεσμα της επίδρασης των υποστρώματων στην ανώτατη στρώση.



Σχήμα 19. Επίδραση των υποστρώματων επί της θερμικής επίχυσης δαπέδου για έξι τύπους δαπέδων.



Σχήμα 20 Επίδραση των υποστρώματων επί της θερμικής αδράνειας δαπέδου, για έξι τύπους δαπέδων.

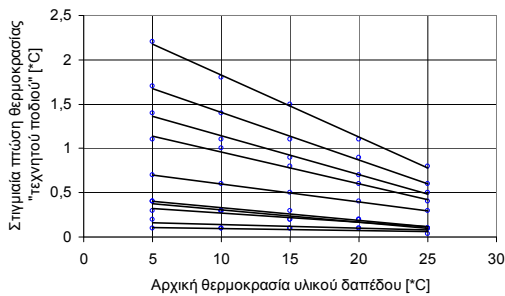
Η στιγμιαία πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας του «τεχνητού ποδιού» κατά την επαφή με δάπεδο, δίνεται στους πίνακες 7 και 8. Για θερμοκρασία «τεχνητού ποδιού» $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$ και δαπέδου $5 \text{ }^\circ\text{C}$, η στιγμιαία πτώση είναι από $0,1 \div 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ για τα δάπεδα του Πίνακα 3 και από $0,1 \div 2$ για τους έξι τύπους δαπέδων του Σχήματος 12. Στο δάπεδο από φελλό η πτώση έχει την τιμή $0,1$ και στο μάρμαρο $2,2$. Διπλάσια

του φελλού είναι η πτώση στον ακρυλικό τάπητα. Μεγάλη πτώση παρατηρείται στο σκυρόδεμα και στο μωσαϊκό. Στο φυσικό ξύλο η πτώση είναι μικρή. Ειδικότερα στην οξυά και στο λίμπα η πτώση είναι ίδια και ίση με $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

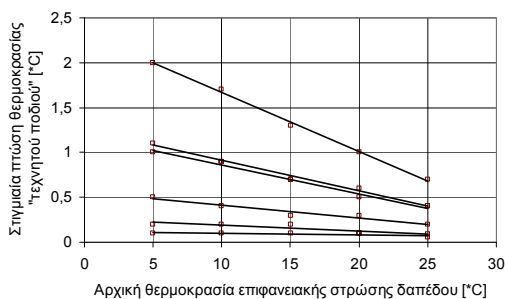
Στα δάπεδα με υποστρώματα η πτώση γενικά είναι μικρότερη με εξαίρεση στους τύπους T_3 και T_4 όπου η πτώση είναι μεγαλύτερη κατά $0,3$ και $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, αντιστοίχως. Η διαφορά σε σχέση με τα αντίστοιχα υλικά του πίνακα 3 είναι πολύ μικρή και σε μερικά υλικά, όπως φελλό και κεραμικά πλακάκια είναι ίδια.

Στα διαγράμματα των σχημάτων 21 και 22 απεικονίζεται η πτώση της στιγμιαίας θερμοκρασίας του «τεχνητού ποδιού» σε σχέση με την αρχική θερμοκρασία του δαπέδου. Η πτώση είναι γραμμική και μειώνεται με την αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας του δαπέδου.

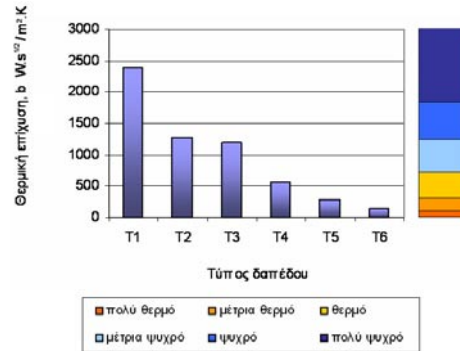
Στο ιστόγραμμα του σχήματος 23 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της μελέτης της θερμικής συμπεριφοράς των εξετασθέντων τύπων δαπέδων του Σχήματος 12 και η διάκρισή τους σε κατηγορίες με βάση το αίσθημα θερμότητας ή ψύχους.



Σχήμα 21. Μεταβολή της πτώσης της στιγμιαίας θερμοκρασίας «τεχνητού ποδιού» με την επιφανειακή θερμοκρασία δαπέδου για διάφορα υλικά.



Σχήμα 22. Μεταβολή της πτώσης της στιγμιαίας θερμοκρασίας «τεχνητού ποδιού» με την επιφανειακή θερμοκρασία δαπέδου για έξι τύπους δαπέδων.



Σχήμα 23. Τιμές της θερμικής επίχυσης των εξετασθέντων δαπέδων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας συμπεραίνεται ότι κάθε ένα από τα εξετασθέντα υλικά παρουσιάζει διαφορετικές θερμικές ιδιότητες, επειδή αυτά έχουν διαφορετικές δομές.

Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η φαινόμενη πυκνότητα. Η ειδική θερμότητα μειώνεται, καθώς αυξάνεται η φαινόμενη πυκνότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας στην ειδική θερμότητα είναι εντονότερη από την αντίστοιχη επίδραση της φαινόμενης πυκνότητας.

Από τα εξετασθέντα υλικά το μάρμαρο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θερμική διάχυση ($1,2 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$) και το πλαστικό δάπεδο, ο συμπιεσμένος φελλός και το μίγμα φελλού-καουτσούκ τη μικρότερη ($0,1 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$). Γενικά παρατηρείται μείωση της θερμικής διάχυσης με την αύξηση της ειδικής θερμότητας. Μεγάλη είναι η μεταβολή της θερμικής διάχυσης στα υλικά με μικρή ειδική θερμότητα.

Η θερμική επίχυση αυξάνεται με την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Η τιμή της στα εξετασθέντα υλικά έχει μεγάλο εύρος (από $38\text{ W.s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ στην εξηλασμένη πολυστερίνη μέχρι $2655\text{ W.s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ στο λευκό μάρμαρο της Πεντέλης). Σε όλα τα είδη φελλού και στον τάπητα οι τιμές της θερμικής επίχυσης είναι σημαντικά μικρές. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει η αντίστροφη σχέση μεταξύ της θερμικής επίχυσης και της ειδικής θερμότητας. Η μεταβολή είναι μεγάλη στα υλικά με μικρή ειδική θερμότητα.

Αποτέλεσμα των διαφορετικών θερμικών ιδιοτήτων είναι η διαφορά θερμικής συμπεριφοράς των υλικών στην κατασκευή. Ειδικότερα, στα δάπεδα η θερμική συμπεριφορά καθορίζεται από τη θερμική επίχυση, η οποία αποτελεί βασικό κριτήριο.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο χαρακτηρισμός των δαπέδων από άποψη αισθήματος θερμότητας ή ψύχους καθορίζεται από τη θερμική επίχυση της ανώτατης στρώσης. Στην περίπτωση απλών δαπέδων κριτήριο είναι η τιμή της

θερμικής επίχυσης του υλικού, όπως φαίνεται αναλυτικά στον πίνακα 5. Στα δάπεδα εσωτερικού χώρου, τα οποία είναι δάπεδα κατ' εξοχήν με υποστρώματα, οι τιμές της θερμικής επίχυσης της ανώτατης στρώσης διαμορφώνεται από τις τιμές της θερμικής επίχυσης όλων των στρώσεων και από το χρονικό μέτρο Fourier. Τα συμπεράσματα των πειραματικών αποτελεσμάτων, για έξι σύνθετα δάπεδα, είναι ότι η θερμική επίχυση της ανώτατης στρώσης επηρεάζεται θετικά ή αρνητικά ανάλογα με τη θερμική συμπεριφορά των υποστρωμάτων και ειδικότερα της υποκείμενης στρώσης του δαπέδου. Στα σύνθετα δάπεδα, όπου το υλικό της ανώτατης στρώσης παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμική επίχυση από το υπόστρωμα, όπως μάρμαρο με υπόστρωμα κονίαμα, κεραμικά πλακάκια με γαρμπιλόδεμα και οξυά με συμπιεσμένο φελλό, παρατηρείται μείωση της θερμικής επίχυσης της ανώτατης στρώσης. Το αντίθετο συμβαίνει στα δάπεδα από υλικό μικρότερης θερμικής επίχυσης του υποστρώματος, όπως πλαστικό δάπεδο με υπόστρωμα μωσαϊκό, δρυς με μίγμα φελλού-καουτσούκ και δεύτερο υπόστρωμα μωσαϊκό και φελλός με νοβοπάν, όπου η θερμική επίχυση της ανώτατης στρώσης αυξάνεται.

Ανάλογα είναι τα συμπεράσματα για τη θερμική αδράνεια των δαπέδων. Παρατηρείται μεταβολή της θερμικής αδράνειας του δαπέδου λόγω επίδρασης των υποστρωμάτων. Δεν προκύπτει κανόνας για την αύξηση ή τη μείωση της θερμικής αδράνειας του δαπέδου λόγω συμμετοχής και της θερμικής αντίστασης του δαπέδου στη διαμόρφωση της τελικής τιμής της θερμικής αδράνειας.

Σχετικά με τη στιγμιαία πτώση της θερμοκρασίας «τεχνητού ποδιού», κατά την επαφή του με απλό ή σύνθετο δάπεδο, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις αυξάνεται με τη θερμική επίχυση του δαπέδου. Παράλληλα παρατηρείται μείωση της στιγμιαίας πτώσης της θερμοκρασίας του δαπέδου.

Από τα παραπάνω προκύπτει ο καθοριστικός ρόλος των υποστρωμάτων στη θερμική συμπεριφορά των σύνθετων δαπέδων και ειδικότερα του πρώτου υποστρώματος κάτω από το δάπεδο. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η θερμική συμπεριφορά δαπέδου βελτιώνεται σημαντικά από ένα υπό-

στρωμα μικρής θερμικής επίχυσης. Αντίθετα δάπεδο καλής θερμικής συμπεριφοράς μπορεί να χαρακτηριστεί «μη θερμό» λόγω υποστρώματος μεγάλης θερμικής επίχυσης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Chapman, A.J., Heat Transfer, New York, Macmillan Publ.Co.Inc., 1967.
2. Croy D.E. & Dougherty D.A., Handbook of Thermal Insulation Applications, 1983
3. Billington N.S., Building Physics Heat, Pergamon Press Ltd., 1967.
4. Munro A.F. & Chrenko F.A., "The effects of air temperature and velocity and of various flooring materials on the thermal sensations and skin temperature of the feet", *J.Hygiene*, 1960, 56.
5. Woodfield P.L., Monde M. & Mitsutake Y., "On estimating thermal diffusivity using analytical inverse solution for unsteady one-dimensional heat conduction", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50:5-6, p. 1202-1205.
6. ISO 7345, Thermal Insulation-Physical Quantities and Definitions, 1987.
7. Al-Ajlan S.A., "Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique", *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26:17-18, p. 2184-2191.
8. Choi S. & Krarti M., "Heat transfer for slab-on-grade floor with prescribed heat flux", International Solar Energy Conference, 1996, p. 517-524.
9. Krarti M., "Time-varying heat transfer from horizontally insulated slab-on-grade floors", *Buildings & Environment*, 1994, 29, p.63-71.
10. Seta T. & Gunji, "Thermal properties of carpets on floor heater", *J. of the Textile Machinery Society of Japan*, 1993, 39, p.57-61.
11. Kusuda T. Mizuno & Bean J.W., "Seasonal heat loss calculation for slab-on-grade floors", Washington, U.S.A., Department of Energy, 1982.
12. Prelovsiek P. & Uran B., "Generalised hot wire method for thermal conductivity measurement", *J.Phys.E:Sci.Instrum.*, 1984, 17, p.674-677.

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΠΟΥΛΑΚΟΣ,

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Τομέας Συνθέσεων Τεχνολογικής Αιχμής, Εργαστήριο Ηχοτεχνίας, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, τηλ.: 2107721394

Extended summary

Thermal properties and behaviour of floors

GEORGE J. POULAKOS,

Associate Professor, School of Architecture, National Technical University of Athens, Greece

Abstract

This paper analyses the effect of floor substrates on the thermal behaviour of floors in interior spaces, as well as on the thermal sensation of the inhabitants. For this reason, the thermal and physical properties of commonly used flooring materials, such as concrete, marble, terrazzo, ceramic tiles, gravel concrete, perlite concrete and mortars, Swedish pine, Slovenian oak and beech, African Limba, particleboard, middle density fibreboard, plastic tile, polystyrene, asphalt material, cork tile, mixture of cork-rubber and acrylic carpet, are presented and studied. Firstly, according to the thermal sensation that is induced, floors are classified from “very cold” to “very hot”, depending on the thermal effusivity of the material. Furthermore, the thermal behaviour of six types of floors with substrates is studied according to the thermal sensation. From the analysis of the results of the study, useful conclusions are drawn concerning the use of materials for the construction of floors for interior spaces.

1. INTRODUCTION

In interior spaces, when the air is stagnant—something that rarely occurs in real conditions—the surface temperature of the floor depends on the interior air temperature and the temperature of the ground or the space underneath the floor, as well as on the thermal conductivity of the flooring material and its substrate(s). In non-steady state, the instant surface temperature of the floor is defined by the amount of heat that is transferred to the ground, the thermal conductivity and the heat capacity of the floor [1,2,3].

Contact of the foot with floors with a surface temperature higher than 28°C for a long period of time causes uneasiness, while for temperatures lower than 15°C there is cold discomfort. [4] The heat transfer from the foot to the floor refers to conduction heat transfer. In this case, the heat transfer rate, from the hot to the cool solid, depends on the thermal effusivity, b , of the cooler, which is defined by eq. (1.1). The speed in which thermal balance is achieved in the cooler solid depends on its thermal diffusivity [5], which is derived from eq. (1.2), while the instant surface temperature, t_s , on the contact surface can be calculated from eq. (1.3). [6,7]

For floors that are formed by one sole layer, the temperature drop of the foot's temperature during the contact

with the floor is proportional to the b value. However, in interior spaces, the floor is nearly always made up of more than one layer and the effect of the substrates on its thermal behaviour is important. As a result, the thermal sensation from the contact of the foot with the floor depends on the new value of the thermal effusivity of the floor, which is influenced by the presence of substrates.

During the last decades, many researchers have been concerned with the behaviour of warm and cold floors. [8,9,10] In some of those publications, results from experimental studies that were conducted with the use of the “artificial foot” are reported. This paper presents the experimental measurements of a study concerning the thermal behaviour of internal flooring materials under the influence of different substrates. The experimental method is based on the theory of thermal conductivity of multi-layered solid materials.

2. MATERIALS AND TESTING

For the experimental procedure, materials that are commonly used for the construction of floors (Δ) and floor substrates (Y) were used and are presented in Tables 1 and 2. The experimental procedure took place in the Building Materials Laboratory of the N.T.U.A. From the results of the measurements, the materials' typical, physical and thermal properties were defined, according to the appropriate standards. The specimens used during the experiments were in dry condition. For artificial rocks, such as concrete (Δ_1 ή Y_1), terrazzo (Δ_2), gravel-concrete (Y_2), perlite-concrete (Y_3) and mortar (Y_4), the measurements were conducted in 28-day specimens. The thermal conductivity, the thermal diffusivity and effusivity and the thermal inertia of natural wood models (Δ_6 , Δ_7 , Δ_8 and Y_5) were defined for a direction perpendicular to their fibres.

The density was defined after accurate measurement of the volume and the weight of the prismatic specimens. (tables 3,4 and figs. 1,2)

The thermal conductivity (tables 3,4 and figs. 3,4) and

the volumetric heat capacity were measured with the use of a specific portable device, the "CT METRE". The method used is dynamic, rapid and accurate. The measuring time does not exceed 500 s and the accuracy of the results, after repetition, is of a magnitude of $\pm 2\%$. The method's basic principle is based on the conduction of heat to the module with the aid of appropriate sensors connected to the device and the measurement of the rate of increase and decrease of the module's temperature. The sensors are connected to thermocouples, which provide the device with constant temperature measurements. The sensors have different shapes (rod, ring or frame) and are either inserted into the module or placed in direct contact with its surface. For every measurement, the selection of a predefined program and the definition of an appropriate number of parameters concerning the material's thermal conductivity and the shape of the sensor are required.

From the values of density, volumetric heat capacity and thermal conductivity, the specific heat (eq. 3.1), the effusivity (eq. 1.1) and the thermal diffusivity (eq. 1.2), were calculated. The results of the measurements and the calculations are recorded in tables 3 and 4 and depicted in the form of clustered column charts in figs. 5,7,9 and 6,8,10 for the floors and substrates, respectively.

Subsequently, the thermal effusivity of the floors under examination was defined using the following method. First, the number of layers $n+1$ that constitute the floor is defined, where $n=1,2,\dots$. For the floor, $n=1$. Secondly, the thermal effusivity of each layer, n , is calculated from eq. (3.2). Then, the thermal effusivity of each substrate, n , under the influence of the one that is placed directly above it, $n+1$, (heat transfer from n to $n+1$) from eq. (3.3), which consecutively leads to the calculation of the thermal effusivity B_1 or B , of the uppermost layer (floor). The coefficient $K_{n,n+1}$ expresses the influence of the layer $n+1$ on n and depends on the b_{n+1}/b_n ratio and on the Fourier time meter, $N_{Fo,n}$, of the layer n (eq. 3.4).

Finally, the thermal behaviour of six floor-substrate configurations, T_1 to T_6 , was studied (see. fig.12). These correspond to six characterisations of thermal sensation, which range from "very hot" to "very cold" (Table 5). For these floor configurations, the values of thermal effusivity and thermal inertia were defined as described above and from eq. (3.5), (3.6) and (3.7), respectively. The results of the calculations are recorded in Table 3. Finally, the instant drop of the surface temperature of the "artificial foot" during the contact with the flooring materials of Table 3 and the floor-substrate configurations $T_1 - T_6$ of fig. 12 was calculated. The data concerning these experimental measurements ("artificial foot" parameters and results for different floor temperatures) are recorded in Tables 7 and 8.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The density values of the flooring and substrate materials under examination present a great variety (tables 3,4 and

figs. 1,2), ranging from 34 Kg/m³ (extruded polystyrene) to 2700 Kg/m³ (white marble). The thermal conductivity values are in most cases lower than 1.0 W/m.K, apart from concrete, terrazzo and ceramic tiles, which have values between 1.0-2.0 W/m.K, and marble with a value of nearly 3.0 W/m.K. As a result, most of the materials behave and can be characterised as thermal insulation materials (tables 3,4 and figs. 3,4). In figure 13, the correlation between the thermal conductivity and the density of the tested materials is given. From the form of the curve, the great influence of the density on the thermal conductivity can be deduced.

From tables 3,4 and figures 5,6, it can be seen that the specific heat of nearly all the examined materials ranges between $2.00 \times 10^{-1} - 5.3010^{-1}$ W.h/Kg.K, with the exception of the perlite-concrete, which has an even higher value.

In the diagrams of figures 14 and 15, the variation of the specific heat with density and thermal conductivity, respectively, is shown. It can be seen that the specific heat greatly decreases with the increase of density (fig. 14). The effect of the thermal conductivity on the specific heat is similar and more pronounced (fig. 15).

The values of thermal diffusivity of the materials under consideration range between $0.10 - 1.19 \times 10^{-6}$ m²/s, with the lowest value being that of the rubber floor (0.10×10^{-6} W/m.K) and the highest that of marble (1.19×10^{-6} W/m.K) (tables 3,4 and figs. 7,8). The correlation between thermal diffusivity and specific heat is depicted in figure 16, from which it can be seen that these properties are inversely proportional.

In most of the materials, the value of thermal effusivity is lower than 900 W.s^{1/2}/m²K. Conventional materials, such as concrete, terrazzo, marble, ceramic tiles, etc., present high values, while in the case of natural wood, the values are low and around 400 W.s^{1/2}/m²K. The lowest value is that of extruded polystyrene, which is equal to 38 W.s^{1/2}/m²K.

The variation of the thermal effusivity with thermal conductivity and specific heat is presented graphically in figures 17 and 18, respectively. From the curve of the diagram of figure 17, it can be seen that thermal effusivity is proportional to thermal conductivity, while the curve of the diagram of figure 18 shows that it is inversely proportional to specific heat, with its value decreasing as the values of specific heat increase.

The results of the measurements of the thermal effusivity under the influence of different substrates are presented for the six floor configurations under investigation in figure 19. These values, combined with the categories of thermal sensation presented in table 5, result in the characterisation of the floors in terms of thermal behaviour (fig. 12).

The thermal inertia values of the floor configurations are depicted in figure 20 and present large differences. Similar differences are observed between the respective values of the flooring materials (Table 6). From the data of table 6 and figure 20, it can be seen that the difference in the thermal inertia values between the different floor configurations T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 and T_6 and the flooring materials is a direct

result of the effect of the substrate on the uppermost layer.

The instant surface temperature drop of the “artificial foot” during its contact with the floor is given in tables 7 and 8. For an “artificial foot” temperature of 36.5°C and a floor temperature of 5°C, the instant drop was between 0.1 and 2.2°C for the floors of table 3 and between 0.1 and 2°C for the six floor configurations of figure 12.

In the diagrams of figures 21 and 22, the relationship between the drop of the instant temperature of the “artificial foot” and the initial floor temperature is depicted. The drop is linear and decreases with the increase of the initial floor temperature. Finally, in the diagram of figure 23, the results of the study of the thermal behaviour of the floor configurations of figure 12, as well as their categorisation according to the induced thermal sensation of heat or cold, are depicted

4. CONCLUSIONS

From the analysis of the results of the study, it can be deduced that all the materials present varying thermal properties due to their different compositions. The thermal conductivity increases with the increase of the density. The specific heat decreases with the increase of the thermal conductivity and the density. The effect of the thermal conductivity on the specific heat is more pronounced than that of the density.

Of the materials under investigation, marble presents the highest values of thermal diffusivity ($1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), whereas PVC, compacted cork and the cork-rubber mixture have the lowest ($0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). In general, the thermal diffusivity decreases with the increase of the specific heat. The thermal effusivity is proportional to the thermal conductivity. The values of thermal effusivity for the materials under examination presented a vast range (from $38 \text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ for extruded polystyrene up to $2655 \text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ for white Pentelis marble), whereas in all the different types of cork and carpet, they were particularly low. From the experimental results, the inverse relationship that exists between the thermal effusivity and the specific heat can be discerned.

The different thermal properties of the materials result

in their different thermal behaviour in the construction. In flooring materials in particular, the thermal behaviour is largely defined by the thermal effusivity. The results show that the characterisation of the floors depending on the sensation of heat or cold is mostly defined by the thermal effusivity of the uppermost layer. In the case of single-layered floors this is the value of the material that forms them. In interior space, with multi-layered floors, the values of thermal effusivity of the uppermost layer are influenced by the respective values of the underlying layers and the Fourier time meter. The results of the experimental tests for six composite (multi-layered) floors show that the thermal effusivity of the upper layer is positively or negatively influenced according to the thermal behaviour of the substrates, namely the one directly underneath. In composite floors, where the material of the upper layer has a higher effusivity than its substrate (e.g. marble with mortar substrate, ceramic tiles on gravel-concrete and beech on compacted cork), the effusivity of the upper layer is decreased. The contrary occurs when a flooring material of low effusivity is placed on a substrate of high effusivity, as is the case in a rubber or cork floor on a terrazzo substrate, where the upper layer's effusivity is increased.

Similar conclusions can be drawn concerning the thermal inertia of the floors. The thermal inertia of the upper layer is altered under the influence of the substrates. Nevertheless, in this case, no clear relationship was found concerning the increase or the decrease of the floor's thermal inertia depending on the different materials.

Concerning the instant temperature drop of the “artificial foot” on its contact with a simple or composite floor, the conclusion that can be drawn is that in all the cases, the thermal effusivity of the floor is increased. Furthermore, the instant temperature drop of the floor is decreased.

From all the aforementioned data, the definitive role of the substrates on the thermal behaviour of composite floors, and especially of the layer directly beneath the final layer, can be seen. The general conclusion is that the thermal behaviour of the floor is greatly improved by the use of a substrate with a low thermal effusivity value. In contrast, a flooring material with good thermal characteristics can be judged as “cool” or “cold” as a result of a substrate with high thermal effusivity values.

GEORGE J. POULAKOS,

Associate professor. National Technical University of Athens, School of Architecture, Department of Architectural Technology, Sound Laboratory, 5 Heroon Polytechniou Str., Zografou Campus, tel.: 2107721394, fax: 2107721393, email: gpoulako@central.ntua.gr