

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΑΣΚΗΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 6

ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Επιμέλεια Εργαστηριακών Σημειώσεων

*Δρ. Γλυτσός Θόδωρος
Καθ. Λαζαρίδης Μιχάλης*

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς το ενδιαφέρον τόσο της επιστημονικής κοινότητας όσο και των ατόμων που συνδέονται με την κατασκευή και εκμετάλλευση κτηρίων (εργολάβοι, μηχανικοί, σχεδιαστές κτηρίων, μεσίτες) για την κατασκευή κτηρίων μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης. Η συντελούμενη κλιματική αλλαγή που σχετίζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργήσε την ανάγκη κατασκευής κτηρίων που ελαχιστοποιούν τη χρήση ενέργειας τόσο για την κατασκευή τους όσο και για τη συντήρησή τους, με τελικό σκοπό τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου τα οποία σχετίζονται άμεσα με την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Την ίδια όμως στιγμή αυξάνονται και οι ανησυχίες σχετικά με την επίδραση των αερίων, σωματιδιακών και μικροβιακών ρύπων που συναντώνται σε εσωτερικά περιβάλλοντα και έχουν σημαντική επίδραση στην ανθρώπινη υγεία. Επομένως η κοινότητα των ατόμων που σχετίζεται άμεσα με την κατασκευή και διαχείριση των κτηρίων καλείται να αντιμετωπίσει την πρόκληση της ταυτόχρονης μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται στην κατανάλωση ενέργειας από τη χρήση και κατασκευή κτηρίων και της διατήρησης συνθηκών που θα εξασφαλίζουν ένα ασφαλές περιβάλλον για την υγεία των ατόμων που ζουν και εργάζονται μέσα στα σύγχρονα κτήρια των μεγάλων αστικών κέντρων.

Οι άνθρωποι στις σύγχρονες πόλεις χρησιμοποιούν τα κτήρια ως χώρους κατοικίας, δουλειάς εκπαίδευσης και ψυχαγωγίας. Ο στόχος των κατασκευαστών και σχεδιαστών κτηρίων είναι να δημιουργήσουν χώρους που θα παρέχουν τις αναγκαίες συνθήκες αύξησης της παραγωγικότητας (σε χώρους δουλειάς και εκπαίδευσης) και των επιπέδων άνεσης και ικανοποίησης (σε χώρους διαμονής και ψυχαγωγίας) με παράλληλη προστασία της υγείας των ανθρώπων από επικίνδυνους ρυπαντές εσωτερικών χώρων. Ταυτόχρονα όμως θα πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα η ενεργειακή κατανάλωση των κτηρίων για λόγους μείωσης του κόστους αλλά και προστασίας του περιβάλλοντος.

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Ο όρος «Ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους» (Indoor Air Quality-IAQ) συνδέεται άμεσα με τη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών για τη προστασία της υγείας και την αύξηση των επιπέδων άνεσης και παραγωγικότητας των ατόμων που ζουν, εργάζονται, ψυχαγωγούνται, εκπαιδεύονται ή απλά βρίσκονται για οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητα σε κάποιο εσωτερικό χώρο. (Ο όρος Ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους θα αναφέρεται στο εξής ως Ποιότητα Αέρα για συντομία). Η υγεία των ατόμων που βρίσκονται σε κάποιο εσωτερικό χώρο συνδέεται άμεσα με τις συγκεντρώσεις των επικίνδυνων ρυπαντών που βρίσκονται στο χώρο. Επηρεάζεται όμως και από τη θερμική άνεση των ατόμων μέσα σε αυτόν. Η θερμική άνεση καθορίζεται από περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως θερμοκρασία, υγρασία, φωτισμός και επίπεδα θορύβου.

Η διατήρηση καλής «Ποιότητας Αέρα» συνεπάγεται την παροχή επαρκούς εξαερισμού του εσωτερικού χώρου με «καθαρό» εξωτερικό αέρα, διατήρηση ικανοποιητικών επιπέδων υγρασίας φωτισμού και θερμοκρασίας και ελαχιστοποίηση των πηγών εκπομπής επικίνδυνων αερίων και σωματιδιακών ρύπων. Τα παραπάνω άπτονται τόσο στο σωστό σχεδιασμό του κτηρίου, στη χρήση υλικών μειωμένων εκπομπών και παροχής θερμικής μόνωσης και στη σωστή διαχείριση του εξαερισμού του κτηρίου με κατάλληλες μηχανικές διατάξεις.

Σχέση μεταξύ Ποιότητας Αέρα και Κατανάλωσης ενέργειας.

Η βασική συσχέτιση μεταξύ της Ποιότητας του Αέρα και της Ενεργειακής κατανάλωσης γίνεται μέσω του εξαερισμού από το εξωτερικό περιβάλλον. Η συσχέτιση αυτή εκφράζεται μαθηματικά μέσω δυο βασικών εξισώσεων που αφορούν: α) τη συγκέντρωση αερίων και σωματιδιακών ρύπων και β) την απαιτούμενη ενέργεια για τη θέρμανση ή ψύξη του εσωτερικού χώρου.

Πιο συγκεκριμένα η μεταβολή της συγκέντρωση αέριων ρύπων σε κάποιο εσωτερικό χώρο μπορεί να εκφραστεί μέσω της εξίσωσης:

$$V \frac{d}{dt} = QC_a + E - Q \pm R \quad (1)$$

όπου C η συγκέντρωση του ρύπου στον εσωτερικό χώρο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_a η συγκέντρωση του ρύπου στον εξωτερικό χώρο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Q ο ρυθμός εξαερισμού (m^3/s)

E ο ρυθμός εκπομπής του ρύπου στον εσωτερικό χώρο ($\mu\text{g}/\text{s}$)

R ο ρυθμός παραγωγής ή κατανάλωσης του ρύπου λόγω χημικών αντιδράσεων ($\mu\text{g}/\text{s}$)

V ο όγκος του χώρου (m^3)

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η αύξηση του ρυθμού εξαερισμού (φυσικού ή μηχανικού) οδηγεί σε μείωση της εσωτερικής συγκέντρωσης των ρύπων. Η εξίσωση που περιγράφει σε απλοποιημένη μορφή, σε συνθήκες ισορροπίας, την ισχύ που απαιτείται για θερμανθεί (ή ψυχθεί) και να μετακινηθεί ο αέρας στον εσωτερικό χώρο είναι:

$$E = E_s + E_l = \rho C_p Q \Delta T + \rho C_l Q \Delta T + E_f - E_{hr} \quad (2)$$

Όπου E η συνολική ισχύς που απαιτείται για να θερμανθεί ή να ψυχθεί και να μετακινηθεί ο αέρας στον εσωτερικό χώρο (kW)

E_{fan} η ενέργεια που απαιτείται για τη μεταφορά του αέρα με μηχανικά μέσα (τιμή ίση με μηδέν για φυσικά αεριζόμενους χώρους)

E_{hr} η ενέργεια που ανακτάται με διάφορα μηχανικά μέσα

E_s η ισχύς αισθητής θερμότητας

E_l η ισχύς αισθητής θερμότητας

ρ η πυκνότητα του αέρα ($\rho=1,205 \text{ kg}/\text{m}^3$ σε θερμοκρασία 20°C)

C_p η ειδική θερμότητα του αέρα ($C_p=1,006 \text{ kJ}/\text{kg K}$ σε θερμοκρασία 20°C)

ΔT η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό περιβάλλον

C_l η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού ($C_l=2258 \text{ kJ}/\text{kg}$ σε στην επιφάνεια της θάλασσας-πίεση 1000 mb)

ΔW η διαφορά αναλογίας μίξης του εσωτερικού και του εξωτερικού αέρα. Η αναλογία μίξης (mixing ratio) είναι η μάζα των υδρατμών ανά μονάδα μάζας του ξηρού αέρα στον οποίο περιέχονται. Ο υπολογισμός αυτής της παράμετρου απαιτεί γνώση της υγρασίας του αέρα (απόλυτης ή σχετικής) και της πίεσης κορεσμού του αέρα σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Στους υπολογισμούς μπορεί να λαμβάνεται χωρίς σημαντικό λάθος στην τάξη μεγέθους η τιμή $\Delta W=0,0077 \text{ kg υγρού αέρα}/\text{kg ξηρού αέρα}$.

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η αύξηση του ρυθμού εξαερισμού οδηγεί σε ταυτόχρονη αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανση (ή ψύξη) του εξωτερικού αέρα που εισέρχεται στο χώρο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μια ιδιαίτερα απλοποιημένη μορφή της σχέσης ανάμεσα στον εξαερισμό και στην κατανάλωση ενέργειας, η οποία στην πραγματικότητα είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και καθορίζεται από πολλούς παράγοντες (αποτελεσματικότητα διατάξεων θέρμανσης/ψύξης, μορφολογία του εσωτερικού χώρου, παρουσία ατόμων, θερμομονωτικές ιδιότητες υλικών κλπ). Επιπλέον, οι παραπάνω εξισώσεις (1 και 2) αναφέρονται σε ένα μοναδικό εσωτερικό χώρο που δέχεται αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον και δεν επικοινωνεί με άλλους εσωτερικούς χώρους. Επομένως δεν υπάρχει μίξη του αέρα με τον αέρα άλλων χώρων που θα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά θερμοκρασίας και υγρασίας αλλά και πιθανότατα διαφορετικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων.

ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ

Θερμική άνεση ονομάζεται η νοητική κατάσταση κατά την οποία εκφράζεται ικανοποίηση με το θερμικό περιβάλλον από τους διαμένοντες σε αυτό, βάση υποκειμενικών κριτηρίων (ANSI/ASHRAE Standard 55). Ένας δεύτερος ορισμός έχει διατυπωθεί από τον Hensen και προσδιορίζει τη θερμική άνεση σαν την κατάσταση στην οποία στην οποία ένα άτομο δεν επιθυμεί να μεταβάλλει το θερμικό περιβάλλον μέσω των πράξεων ή της συμπεριφοράς του (Hensen, 2004). Ως νοητική κατάσταση επηρεάζεται, πέρα από τις μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες, από την ψυχολογία του ατόμου και από κοινωνικούς παράγοντες. Η αντίληψη του θερμικού περιβάλλοντος είναι πολλές φορές διαφορετική ανάμεσα σε άτομα που βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Παρόλο που τα όργανα καταγραφής των περιβαλλοντικών συνθηκών μπορεί να δείχνουν ακριβώς τις ίδιες μετρήσεις σε δύο διαφορετικές περιοχές, η αίσθηση της θερμικής άνεσης μπορεί να είναι τελείως διαφορετική για τα άτομα που βρίσκονται εκεί. Επομένως για τον προσδιορισμό της θερμικής άνεσης απαιτούνται επιπλέον των μετρήσεων των βασικών κλιματικών παραμέτρων και οι υποκειμενικές αντιλήψεις των διαμενόντων στους χώρους των παρατηρήσεων. Η ικανοποίηση ενός ατόμου αναφορικά με το θερμικό περιβάλλον είναι μία πολυσύνθετη και σε μεγάλο βαθμό υποκειμενική αντίδραση σε πολλές μεταβλητές που δεν είναι ανεξάρτητες αλλά επηρεάζουν έντονα η μία την άλλη. Η αντίληψη για τη θερμική άνεση επηρεάζεται από αυτές τις μεταβλητές οι οποίες περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά του φυσικού περιβάλλοντος, το είδος του ρουχισμού, το επίπεδο της σωματικής δραστηριότητας και τα δημογραφικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση ατόμων (φύλο, ηλικία, υγεία κλπ).

Επομένως δεν υπάρχει κάποιο «απόλυτο» μέγεθος για τον προσδιορισμό της θερμικής άνεσης. Γενικά η θερμική άνεση επέρχεται όταν η θερμοκρασία του σώματος διατηρείται μεταξύ στενών ορίων, η υγρασία του δέρματος είναι χαμηλή και δεν καταβάλλεται «προσπάθεια» από τον οργανισμό να ρυθμιστεί με φυσιολογικό τρόπο η θερμοκρασία του.

Βάση των προτύπων θερμικής άνεσης καθορίζεται σε πολλές περιπτώσεις η ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων κλιματισμού ενός σύγχρονου κτηρίου. Ο προσδιορισμός της θερμικής άνεσης των διαμενόντων σε ένα κτήριο μπορεί επομένως να παίξει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή και περιβαλλοντική βιωσιμότητα του κτηρίου. Επιπλέον η θερμική άνεση αποτελεί παράγοντα κλειδί για την παραγωγικότητα των εργαζομένων σε εσωτερικά περιβάλλοντα και σχετίζεται άμεσα με τη σωματική και πνευματική τους υγεία. Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί έντονα προς της κατεύθυνση της εύρεσης δεικτών και της καθιέρωσης προτύπων με τα οποία θα συσχετίζεται η επίτευξη θερμικής άνεσης σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον με την κατανάλωση ενέργειας και την υγεία των διαμενόντων σε αυτό.

Σημασία της θερμικής άνεσης στην καθημερινή ζωή

Το θερμικό περιβάλλον σε ένα εσωτερικό χώρο δεν επηρεάζει μόνο την αίσθηση της θερμικής άνεσης των διαμενόντων σε αυτόν. Οι συνθήκες θερμικής άνεσης έχουν συνδεθεί με την υγεία των ανθρώπων και την απόδοση των εργαζομένων. Πιο συγκεκριμένα, σε υπερβολικά θερμά ή ψυχρά περιβάλλοντα υπάρχει σοβαρός κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία που εμφανίζεται με τη μορφή θερμικού στρες, εμφράγματος, κρυοπαγημάτων κλπ. Τέτοιες ακραίες συνθήκες δεν συναντώνται σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Ωστόσο αυξημένες θερμοκρασίες στους εσωτερικούς χώρους, έξω από τα όρια της θερμικής άνεσης, έχουν συνδεθεί με την εμφάνιση συμπτωμάτων όπως πονοκέφαλος, πόνοι στο στήθος, δυσκολία στην αναπνοή, κόπωση, ερεθισμός των ματιών και πόνοι στους μυς και στις αρθρώσεις. Πολλά από τα παραπάνω είναι τυπικά συμπτώματα του «άρρωστου κτηρίου» (sick building syndrome). Σε αρκετές περιπτώσεις τα συμπτώματα μετριάζονταν σημαντικά όταν το άτομο έφευγε από το κτήριο.

Το θερμικό περιβάλλον επηρεάζει την παραγωγικότητα και την εργασιακή απόδοση μέσω διαφόρων μηχανισμών και διεργασιών. Η δυσφορία με το θερμικό περιβάλλον προκαλεί σε πολλές

περιπτώσεις έλλειψη προσοχής και συγκέντρωσης. Επιπλέον μικρά προβλήματα υγείας (που αναφέρθηκαν παραπάνω) είναι προφανές ότι επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση στην εργασία. Τέλος κατακόρυφες βαθμίδες θερμοκρασίας (με αύξηση της θερμοκρασίας προς τα πάνω) συντελούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες δέρματος στα κάτω άκρα, προκαλώντας δυσφορία και έλλειψη συγκέντρωσης. Πρέπει ωστόσο να αναφερθεί ότι πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η απόδοση των εργαζομένων σε αρκετές περιπτώσεις αυξήθηκε όταν οι θερμοκρασίες ήταν εκτός των θεωρητικά υπολογιζόμενων ορίων θερμικής άνεσης και συγκεκριμένα ελαφρώς χαμηλότερες. Η ακριβής σύνδεση της παραγωγικότητας με τις συνθήκες θερμικής άνεσης δεν έχει αποσαφηνιστεί και αποτελεί αντικείμενο μελέτης από πολλούς σύγχρονους ερευνητές.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση σε εσωτερικό περιβάλλον

Καθώς υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα άτομα όσον αφορά τη σωματική και ψυχολογική ικανοποίηση αναφορικά με το θερμικό περιβάλλον, καθίσταται δύσκολη η εύρεση μίας ιδανικής θερμοκρασίας για κάθε άτομο που είναι παρών σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον. Για το σκοπό αυτό έχει πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός μετρήσεων τόσο σε εργαστηριακούς θαλάμους, όσο και σε πραγματικά περιβάλλοντα ώστε να προσδιοριστούν στο μέγιστο βαθμό οι συνθήκες που είναι ιδανικές για ένα συγκεκριμένο ποσοστό των διαμενόντων στο χώρο. Η θερμική «ουδετερότητα» (η κατάσταση δηλαδή κατά την οποία το άτομο δεν αισθάνεται ούτε να ζεσταίνεται, ούτε να κρυώνει) επιτυγχάνεται όταν η θερμότητα που παράγεται από τον ανθρώπινο οργανισμό μπορεί να μεταφέρεται στο περιβάλλον έτσι ώστε να υπάρχει θερμική ισορροπία του ανθρώπου με τα αντικείμενα που βρίσκονται γύρω του. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν τη θερμική άνεση είναι αυτοί που καθορίζουν τις διαδικασίες πρόσληψης και αποβολής θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν κάποιοι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τη θερμική άνεση και οι οποίοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες ομάδες:

A) Προσωπικοί παράγοντες που είναι χαρακτηριστικοί για το κάθε διαμένοντα στο χώρο. Περιλαμβάνουν:

- 1) Ρουχισμός
- 2) Μεταβολισμός
- 3) Σχήμα σώματος
- 4) Κατανάλωση φαγητού ή υγρών
- 5) Δυνατότητα εγκλιματισμού στο περιβάλλον.

B) Περιβαλλοντικοί παράγοντες που αντιστοιχούν στις μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες που καθορίζουν το θερμικό περιβάλλον. Αυτές είναι:

- 6) Θερμοκρασία ξηρού αέρα
- 7) Υγρασία
- 8) Ταχύτητα αέρα
- 9) Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας

Όταν μεταβάλλεται κάποια από τις παραπάνω μεταβλητές, οι υπόλοιπες πρέπει να ρυθμιστούν ξανά ώστε να υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στη θερμότητα που αποβάλλεται και προσλαμβάνεται από ένα άτομο έτσι ώστε αυτό να συνεχίσει να αισθάνεται άνετα στο περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η επίδραση των παραπάνω παραγόντων στην διαδικασία επίτευξης θερμικής άνεσης σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον. Οι παράγοντες 3-5 δεν θα μελετηθούν ξεχωριστά, αλλά η επίδραση τους θα εξεταστεί στα πλαίσια της αλληλεπίδρασης τους με τους υπόλοιπους παράγοντες.

Ρουχισμός

Ένας καθοριστικός παράγοντας για την επίτευξη θερμικής άνεσης σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον είναι ο ρουχισμός (τα είδη ένδυσης). Στην πλειοψηφία τους οι διαμένοντες στο χώρο είναι καθιστοί ή εκτελούν ήπιες εργασίες και επομένως φορούν τα ανάλογα με τις παραπάνω περιστάσεις είδη ένδυσης. Οι μονωτικές ικανότητες των ειδών ένδυσης είναι αποτέλεσμα των μικρών θυλάκων αέρα που δημιουργούνται ανάμεσα στα στρώματα των ρούχων και εμποδίζουν τον αέρα να μετακινηθεί προς το ανθρώπινο σώμα. Πρακτικά τα είδη ένδυσης αποτρέπουν τον κρύο αέρα να διεισδύσει και να αντικαταστήσει το θερμό στρώμα αέρα που βρίσκεται πολύ κοντά στο ανθρώπινο σώμα και σε θερμική ισορροπία με αυτό και επιπλέον παγιδεύουν ένα στρώμα αέρα μεταξύ των ινών των υφασμάτων που λειτουργεί ως θερμική μόνωση και προστατεύει το ανθρώπινο σώμα. Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος ενός ρούχου τόσο καλύτερη θερμική μόνωση προκαλεί. Σημαντικό ρόλο φυσικά παίζει και το είδος του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα είδη ένδυσης καθώς και η πυκνότητα των ινών του ρούχου. Η υγρασία παίζει σημαντικό ρόλο στις μονωτικές ιδιότητες των ειδών ένδυσης, καθώς το νερό είναι καλός αγωγός της θερμότητας. Αν τα ρούχα είναι υγρά εξαιτίας βροχής, ιδρώτα ή υψηλής υγρασίας στο χώρο, οι υδρατμοί αντικαθιστούν μεγάλο μέρος του παγιδευμένου αέρα ανάμεσα στις ίνες των ρούχων προκαλώντας έτσι απώλεια θερμότητας μέσω επαφής ή εξάτμισης.

Η ικανότητα θερμικής μόνωσης των διαφόρων ειδών ένδυσης εκφράζεται μέσω της μονάδας clo. Ισχύει ότι $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ (οι μονάδες αντιστοιχούν στις μονάδες θερμικής μόνωσης που χρησιμοποιούνται για τα υλικά κατασκευής κτηρίων) και αντιστοιχεί σε παντελόνι, μακρυμάνικο πουκάμισο, λεπτό μπουφάν και βαμβακερά εσώρουχα ή κουστούμι, πουκάμισο και βαμβακερά εσώρουχα. Αυτή είναι η θερμική μόνωση που απαιτείται για να παραμένει ένα άτομο σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον σε θερμοκρασία 21°C σε ένα φυσικά αεριζόμενο χώρο με ταχύτητα αέρα $0,1 \text{ m/s}$. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί το άτομο ιδρώνει ενώ αν μειωθεί το άτομο αρχίζει να κρυώνει. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμικής μόνωσης χαρακτηριστικών ειδών ένδυσης

Πίνακας 1: Ενδεικτικές τιμές θερμικής μόνωσης χαρακτηριστικών ειδών ένδυσης (Πηγή: πρότυπα ASHRAE 1985 και ASHRAE 55-2010)

Είδος ένδυσης	Περιγραφή	Θερμική μόνωση (clo)
Άνδρες		
Εσώρουχα	Μποξεράκι	0,06
	Κοντομάνικο μπλουζάκι	0,09
	Πυτζάμα (πάνω μέρος, μακρύ μανίκι)	0,35
	Πυτζάμα (μακρύ παντελόνι)	0,35
Πουκάμισο	Ελαφρύ (κοντό μανίκι)	0,14
	Ελαφρύ (μακρύ μανίκι)	0,22
	Χοντρό (Μακρύ μανίκι)	0,29
Γιλέκο	Ελαφρύ	0,15
	Χοντρό	0,29
Παντελόνι	Ελαφρύ	0,26
	Χοντρό	0,32
Πουλόβερ	Ελαφρύ	0,20
	Χοντρό	0,37
Μπουφάν	Ελαφρύ	0,22
	Χοντρό	0,49
Κάλτσες	Μέχρι τον αστράγαλο	0,04
	Μέχρι το γόνατο	0,10

Υποδήματα	Σανδάλια/παντόφλες	0,02
	Αθλητικά	0,04
	Μπότες	0,08
Γυναίκες		
Εσώρουχα	Σλίπ και σουτιέν	0,05
	Πυτζάμα (πάνω μέρος, μακρύ μανίκι)	0,35
	Πυτζάμα (μακρύ παντελόνι)	0,35
Μπλούζα	Ελαφριά	0,20
	Χοντρή	0,29
Φόρεμα	Ελαφρύ	0,22
	Χοντρό	0,70
Φούστα	Ελαφριά	0,10
	Χοντρή	0,22
Μπουφάν	Ελαφρύ	0,17
	Χοντρό	0,37
Καλτσόν	Οποιοδήποτε μήκος	0,01
Υποδήματα	Σανδάλια/παντόφλες	0,02
	Αθλητικά	0,04
	Μπότες	0,08

Μία σωστότερη πρακτική θα είναι η θερμική μόνωση να διορθώνεται με βάση την εξωτερική θερμοκρασία, την υγρασία και τις απαιτήσεις που υπάρχουν για τους διαμένοντες στο χώρο αναφορικά με το είδος ντυσίματος (dress code). Είναι επίσης σημαντικό να γνωρίζουμε κατά πόσο τα άτομα είναι ελεύθερα να μεταβάλλουν τον ρουχισμό τους ανάλογα με πόσο άνετα αισθάνονται στο χώρο στον οποίο βρίσκονται. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες να αναπτυχθούν δυναμικά μοντέλα που μεταβάλλουν τις τιμές της θερμικής μόνωσης ανάλογα με τις συνθήκες του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος, τη δραστηριότητα των ατόμων και την ψυχολογική τους κατάσταση αλλά δεν υπάρχει σήμερα κάποιο τέτοιο μοντέλο που να γνωρίζει καθολική αποδοχή και να έχει υιοθετηθεί από τους διεθνείς οργανισμούς πιστοποίησης της θερμικής άνεσης σε εσωτερικά περιβάλλοντα.

Μεταβολισμός

Για να διατηρηθεί ζωντανός ο ανθρώπινος οργανισμός μεταβολίζει (οξειδώνει) μέσα στο ανθρώπινο σώμα το φαγητό που λαμβάνει μετατρέποντας το σε ηλεκτροχημική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και την αναζωογόνηση του οργανισμού και για τη σωστή λειτουργία των οργάνων. Όπως σε κάθε μετατροπή ενέργειας από μια μορφή σε άλλη υπάρχει ένα συγκεκριμένο (εντός ορίων) ποσοστό μετατροπής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μόλις το 20% όλης της διαθέσιμης ενέργειας που περιλαμβάνουν οι τροφές χρησιμοποιείται για τις ζωτικές λειτουργίες και τη παραγωγή έργου. Το υπόλοιπο 80% μετατρέπεται σε θερμότητα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία συνεχής παραγωγή θερμότητας μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό. Αυτή η μεταβολική παραγωγή θερμότητας μπορεί να διαχωριστεί σε δύο είδη:

Α) Θερμότητα λόγω βασικών βιολογικών διεργασιών (π.χ. κυκλοφορία του αίματος, διαδικασία της αναπνοής) της οποίας η παραγωγή είναι συνεχής και μη συνειδητή.

Β) Θερμότητα λόγω μυϊκών διεργασιών, δηλαδή λόγω παραγωγής έργου. Η θερμότητα αυτή ελέγχεται συνειδητά από τον άνθρωπο (εκτός από την περίπτωση του τρέμουλου λόγω κρύου ή ασθένειας).

Η παραγόμενη αυτή θερμότητα πρέπει να αποβάλλεται από τον οργανισμό μέσω ροής αισθητής θερμότητας (sensible heat) και συγκεκριμένα μέσω ακτινοβολίας (radiation), επαφής (conduction) ή μεταφοράς (convection). Αποβολή θερμότητας επιτυγχάνεται επίσης μέσω εξάτμισης σωματικών υγρών. Στην περίπτωση που ο οργανισμός προσλαμβάνει περισσότερη ενέργεια μέσω του φαγητού από αυτή που χρειάζεται την αποθηκεύει στους ιστούς με τη μορφή λίπους. Ο ρυθμός μεταβολισμού μεταβάλλεται ανάλογα με το επίπεδο της δραστηριότητας και αυξάνεται όταν το σώμα χρειάζεται περισσότερη ενέργεια (χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο λίπος), αυξάνοντας όμως παράλληλα και την παραγωγή θερμότητας. Η αύξηση όμως της παραγωγής θερμότητας προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας του σώματος, το οποίο στην προσπάθεια να σταθεροποιήσει τη θερμοκρασία αυξάνει το ρυθμό μεταβολισμού παρόλο που δεν υπάρχει κάποια πρόσθετη σωματική ή πνευματική εργασία. Στην περίπτωση αυτή όλη η επιπλέον ενέργεια που μεταβολίζεται μετατρέπεται σε θερμότητα

Σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 55-2010, ο ρυθμός μεταβολισμού ορίζεται ως το επίπεδο μετασχηματισμού χημικής ενέργειας σε θερμότητα και μηχανικό έργο μέσα στον οργανισμό, μέσω μεταβολικών δραστηριοτήτων. Ο ρυθμός μεταβολισμού εκφράζεται συνήθως με τη μονάδα 1 met, όπου $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2 = 50 \text{ Kcal/(h} \cdot \text{m}^2)$. Το 1 met αντιστοιχεί στην ενέργεια που παράγεται ανά μονάδα ανθρώπινης επιφάνειας από ένα άτομο που κάθεται χωρίς να εκτελεί κάποια άλλη δραστηριότητα. Η επιφάνεια ενός μέσου ανθρώπου ορίζεται σε $1,8 \text{ m}^2$. Για να προσδιοριστούν οι βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες για θερμική άνεση και καλή υγεία πρέπει να είναι γνωστό το επίπεδο του ρυθμού μεταβολισμού κατά τη διάρκεια φυσικών δραστηριοτήτων, καθώς ο ρυθμός μεταβολισμού αυξάνει ανάλογα του επιπέδου φυσικής άσκησης. Όταν το επίπεδο φυσικής άσκησης μεταβάλλεται από τη διαδικασία του ύπνου σε βαριά σωματική εργασία, ο ρυθμός μεταβολισμού μεταβάλλεται αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2: Ενδεικτικές τιμές ρυθμού μεταβολισμού για διάφορες δραστηριότητες
(Πηγή: πρότυπα ASHRAE 1985 και ASHRAE 55-2010)

Είδος δραστηριότητας	Met	W/m ²
Ύπνος	0,7	40
Ανάπαυση, ξαπλωμένος	0,8	46
Καθιστός	1,0	58
Όρθιος, στατική εργασία	1,2	70
Ελαφριά εργασία	1,6	93
Μέτρια εργασία μικρής χρονικής διάρκειας	2,0	116
Μέτρια εργασία μεγάλης χρονικής διάρκειας	3,0	175
Βαριά εργασία/άθληση	6,0	350
Πολύ βαριά εργασία/έντονη άθληση	7,0	410

Γενικά ο ρυθμός μεταβολισμού είναι ανάλογος του σωματικού βάρους και εξαρτάται από τη σωματική δραστηριότητα, την επιφάνεια του σώματος, το επίπεδο υγείας, το φύλο, την ηλικία, το ρουχισμό και μικροκλιματικές συνθήκες του περιβάλλοντος. Ο ρυθμός μεταβολισμού φτάνει στη μέγιστη τιμή περίπου στην ηλικία των 10 χρονών και μειώνεται στις ελάχιστες τιμές σε μεγάλη ηλικία. Αυξάνεται επίσης λόγω πυρετού, συνεχόμενης δραστηριότητας ή κάτω από συνθήκες ψύχους αν το σώμα δεν προστατεύεται θερμικά. Οι διατροφικές συνήθειες επηρεάζουν το ρυθμό μεταβολισμού και συμβάλλουν με τον τρόπο αυτό στον έμμεσο καθορισμό των προτιμήσεων αναφορικά με τις συνθήκες θερμικής άνεσης. Το σχήμα του σώματος είναι ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει έμμεσα τη θερμική άνεση. Η αποβολή θερμότητας εξαρτάται από τη συνολική επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος. Ένα ψηλό και λεπτό άτομο έχει μεγαλύτερη αναλογία επιφάνειας-όγκου και αποβάλλει θερμότητα ευκολότερα από ένα άτομο με «σφαιρικό» σώμα. Έτσι μπορεί να παρουσιάζει ανοχή σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία ξηρού αέρα

Η θερμοκρασία ξηρού αέρα επηρεάζει το ρυθμό απώλειας θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα μέσω μεταφοράς (convection) και εξάτμισης. Είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της θερμικής άνεσης καθώς υπάρχει μία πολύ στενή ζώνη θερμοκρασιών θερμικής άνεσης που μπορούν να καθοριστούν ανεξάρτητα από τις άλλες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Αντίθετα το εύρος των θερμοκρασιών άνεσης μεγαλώνει σημαντικά αν παράλληλα μεταβληθούν κατάλληλα και οι υπόλοιπες περιβαλλοντικές μεταβλητές (υγρασία, ταχύτητα αέρα και μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας). Αλλά αν μεταβληθεί κάποια περιβαλλοντική μεταβλητή η θερμοκρασία ξηρού αέρα πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να επιτευχθούν και πάλι επίπεδα θερμικής άνεσης. Η θερμοκρασία σε κάποιο εσωτερικό χώρο αυξάνει γενικά από το πάτωμα προς την οροφή. Αν η μεταβολή αυτή είναι μεγάλη προκαλείται δυσφορία στους διαμένοντες στο χώρο καθώς μπορεί ένα άτομο αισθάνεται ζεστό το κεφάλι του αλλά παγωμένα τα πόδια του. Επομένως για να αποφευχθεί το αίσθημα της δυσφορίας θα πρέπει η κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας στα όρια της ζώνης που καταλαμβάνει ένας άνθρωπος να μην υπερβαίνει του 3 °C. Η ζώνη που καταλαμβάνει ένας άνθρωπος ορίζεται ως 1,8 m από το έδαφος και τουλάχιστον 0,6 m από τους τοίχους ή συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης. Η θερμοκρασία του δαπέδου θα πρέπει να είναι μεταξύ 18 °C και 29 °C για συνήθη υποδήματα σε εσωτερικούς χώρους.

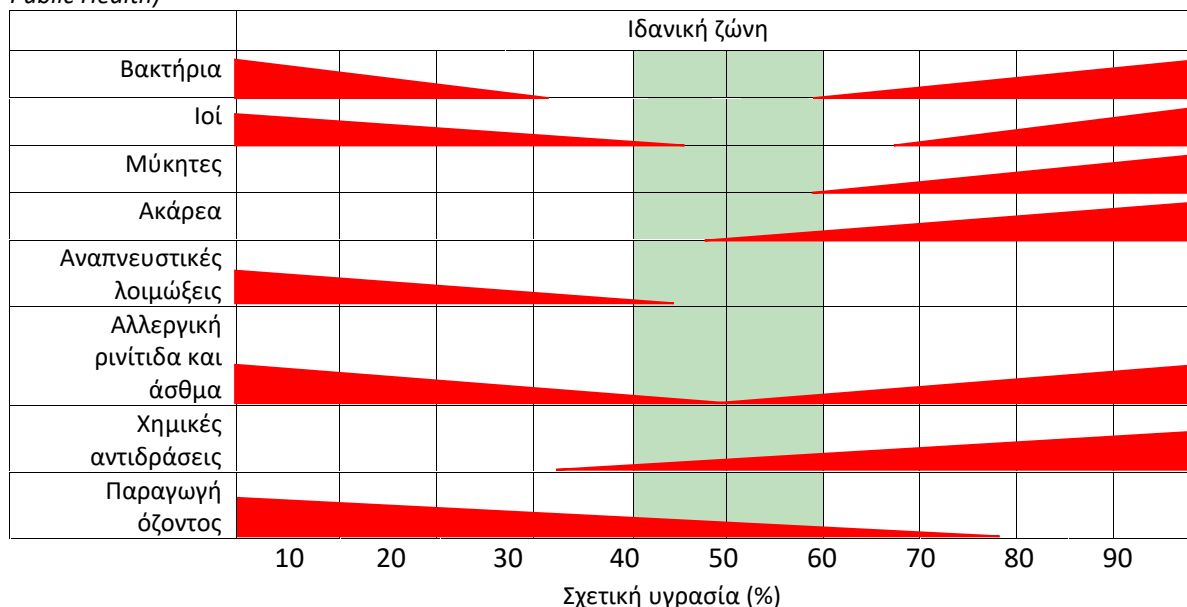
Υγρασία

Υγρασία ονομάζεται η ποσότητα των υδρατμών σε ένα συγκεκριμένο όγκο. Η απόλυτη υγρασία ορίζεται ως η μάζα των υδρατμών σε ένα καθορισμένο όγκο αέρα και εκφράζεται σε μονάδες μάζας ανά όγκο (kg/m³). Η υγρασία σε κάποιο εσωτερικό χώρο εκφράζεται συνήθως με τη σχετική υγρασία (RH), που ορίζεται ως ο λόγος της τάσης των υδρατμών στον αέρα προς την τάση των υδρατμών αν ο αέρας ήταν πλήρως κορεσμένος σε ίδια θερμοκρασία ξηρού αέρα. Ο παραπάνω λόγος πολλαπλασιάζεται με 100 και η σχετική υγρασία εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό (%). Η ποσότητα των υδρατμών που μπορεί να συγκρατηθεί σε μία μάζα αέρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Όσο ζεστότερος είναι ο αέρας τόσο περισσότερους υδρατμούς μπορεί να περιέχει.

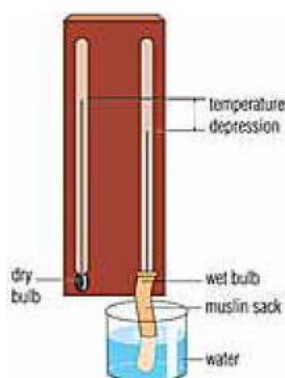
Παρόλο που η ανοχή του ανθρώπου σε μεταβολές της υγρασίας είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ανοχή σε αντίστοιχες μεταβολές της θερμοκρασίας, ο έλεγχος της υγρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την επίτευξη θερμικής άνεσης. Υψηλή υγρασία μπορεί να προκαλέσει συμπίκνωση υδρατμών σε ψυχρές επιφάνειες και επιβραδύνει την απώλεια θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα μέσω εφύδρωσης και διαπνοής, καθώς ο πλούσιος σε υδρατμούς αέρας δεν μπορεί να απορροφήσει άλλους υδρατμούς προερχόμενους από το ανθρώπινο σώμα. Επομένως θερμός και ξηρός αέρας ευνοεί τη διαδικασία της εφίδρωσης και της αποβολής θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα.

Η επίδραση της υγρασίας στη θερμική άνεση είναι μικρή σε εσωτερικούς χώρους για άτομα που εκτελούν ελαφρά σωματική εργασία. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ένα άτομο αισθάνεται άνετα για σχετική υγρασία μεταξύ 20% και 50%, ενώ κατά την καλοκαιρινή περίοδο το άνω όριο μπορεί να υπερβεί το 60%. Σε κάποιους εσωτερικούς χώρους εργασίας (κλωστοϋφαντουργία, αποθήκευση και επεξεργασία τροφίμων, κατασκευή οπτικών ειδών) επιβάλλεται η σχετική υγρασία να υπερβαίνει πάντοτε το 60%. Αντίθετα σε κάποιες άλλες περιπτώσεις (π.χ. εργαστήρια παρασκευής φαρμάκων) απαιτείται σχετική υγρασία μικρότερη από 20%. Σε νοσοκομεία επιβάλλεται η σχετική υγρασία να διατηρείται μεταξύ 50%-55% γιατί σε αυτό το εύρος έχουν τη μικρότερη αντοχή οι επικίνδυνοι μικροοργανισμοί (βακτήρια, υιοί, μύκητες κλπ). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα όρια της σχετικής υγρασίας στα οποία μπορούν να επιβιώσουν και να αναπτυχθούν επικίνδυνοι μικροοργανισμοί, να προκληθούν ασθένειες και να πραγματοποιηθούν συνήθεις χημικές αντιδράσεις σε εσωτερικούς χώρους.

Πίνακας 3: Όρια σχετικής υγρασίας για ανάπτυξη μικροοργανισμών, εμφάνιση ασθενειών και πραγματοποίηση χημικών αντιδράσεων (Πηγή Lectures on Indoor Air Quality and Health, Harvard School of Public Health)



Η τιμή της σχετικής υγρασίας μπορεί να υπολογιστεί με ένα ψυχρόμετρο (Σχήμα 1). Αποτελείται από δύο όμοια υδραργυρικά θερμόμετρα, τοποθετημένα παράλληλα το ένα με το άλλο. Το ένα θερμόμετρο ονομάζεται ξηρό και μετράει τη θερμοκρασία του αέρα. Το άλλο ονομάζεται υγρό και η βάση τυλίγεται με λεπτό μεταξωτό ύφασμα μουσκεμένο με απεσταγμένο νερό. Το ύφασμα διατηρείται συνέχεια υγρό. Η εξάτμιση υδατμών από την υγρή επιφάνεια οδηγεί σε απώλεια θερμότητας του αέρα που περιβάλλει το υγρό θερμόμετρο και σε πτώση της θερμοκρασίας του υγρού θερμόμετρου. Μεγαλύτερη εξάτμιση λαμβάνει χώρα όσο μικρότερη είναι η περιεκτικότητα των υδατμών στην ατμόσφαιρα. Από τις τιμές της θερμοκρασίας που καταγράφονται με τα δύο θερμόμετρα και με τη βοήθεια ειδικών πινάκων προσδιορίζεται η απόλυτη και η σχετική υγρασία.



Σχήμα 1: Σχηματική παράσταση ψυχρομέτρου.

Σχέση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

Έχουν διατυπωθεί πολλοί δείκτες για να αποτυπωθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Ο συνηθέστερος είναι ο δείκτης θερμότητας (Heat index). Με το δείκτη αυτό προσδιορίζεται η θερμική αίσθηση του ανθρώπου (για συνθήκες ακινησίας ή ελαφριάς εργασίας) σαν συνάρτηση της πραγματικής θερμοκρασίας και της ποσότητας των υδατμών στον αέρα σε σκιασμένες περιοχές. Ο δείκτης αυτός εκφράζεται συχνά και ως «αισθητή θερμοκρασία». Στο

παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι τιμές της αισθητής θερμοκρασίας για διάφορες τιμές της σχετικής υγρασίας.

		Θερμοκρασία (°C)															
Σχετική υγρασία (%)		27	28	29	30	31	32	33	34	36	37	38	39	40	41	42	43
	40	27	27	28	29	31	33	34	36	38	41	43	46	48	51	54	58
	45	27	28	29	31	32	34	36	38	40	43	46	48	51	54	58	
	50	27	28	29	31	33	35	37	39	42	45	48	51	55	58		
	55	27	29	30	32	34	36	38	41	44	47	51	54	58			
	60	28	29	31	33	35	38	42	43	47	51	54	58				
	65	28	29	32	34	37	39	42	46	49	53	58					
	70	28	30	32	35	38	41	44	48	52	57						
	75	29	31	33	36	39	43	47	51	56							
	80	29	32	34	38	41	45	49	54								
	85	29	32	36	39	43	47	52	57								
	90	30	33	37	41	45	50	55									
95	30	34	38	42	47	53											
100	31	35	39	44	49	56											

Εκτίμηση κινδύνου λόγω υπερβολικής έκθεσης ή επίπονης σωματικής δραστηριότητας

Απαιτείται προσοχή	Απαιτείται αυξημένη προσοχή	Κίνδυνος για την υγεία	Μεγάλος κίνδυνος για την υγεία

Σχήμα 2: Δείκτης Θερμότητας- τιμές της αισθητής θερμοκρασίας για διάφορες τιμές της σχετικής υγρασίας.

Ταχύτητα αέρα

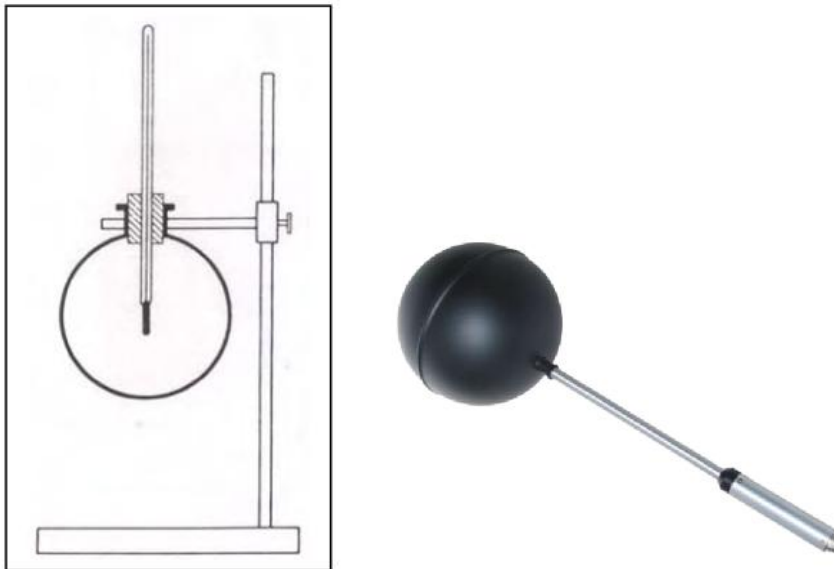
Η κίνηση του αέρα επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας από και προς το ανθρώπινο σώμα μέσω μεταφοράς και εξάτμισης. Η κίνηση του αέρα μπορεί να προκαλείται από φυσικά αίτια, μέσω χρήσης μηχανικών συστημάτων αλλά και λόγω της κίνησης των διαμενόντων στον χώρο. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αέρα τόσο αυξάνεται η ροή θερμότητας λόγω μεταφοράς και εξάτμισης. Αν η θερμοκρασία ενός χώρου είναι εντός των ορίων ανοχής δεν υπάρχει ελάχιστη τιμή ταχύτητας αέρα για να διατηρηθούν επίπεδα θερμικής άνεσης. Η φυσική ροή αέρα πάνω από την ανθρώπινη επιφάνεια επαρκεί για τη συνεχή αποβολή θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα. Αν όμως η θερμοκρασία αυξηθεί, η φυσική ροή αέρα δε είναι πλέον αρκετή και η ταχύτητα του αέρα πρέπει να αυξηθεί με μηχανικά μέσα. Γενικά αν ο αέρας παραμένει στάσιμος σε ένα χώρο οι διαμέμοντες αισθάνονται δυσφορία καθώς προκαλείται στρωμάτωση της θερμοκρασία από το δάπεδο προς την οροφή. Επιπλέον επιβαρύνεται η ποιότητα του αέρα καθώς μειώνεται ο ρυθμός απομάκρυνσης οσμών και επικίνδυνων ρυπαντών (αέριοι ρύποι, αιωρούμενα σωματίδια αλλά και ζωντανοί οργανισμοί όπως μικρόβια και βακτήρια).

Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας

Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (Mean radiant temperature, T_{mrt}) ορίζεται ως η ομοιόμορφη θερμοκρασία μιας κλειστής επιφάνειας στην οποία η ανταλλαγή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα ισούται με την πραγματική ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας στο πραγματικό υπό εξέταση περιβάλλον. Είναι στην πραγματικότητα η μέση θερμοκρασία (ανηγμένη ως προς την επιφάνεια) των σωμάτων που περιβάλλουν το ανθρώπινο σώμα σε ένα κλειστό χώρο. Εξαρτάται από την ικανότητα των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένες οι επιφάνειες να

απορροφούν και να εκπέμπουν θερμότητα. Εξαρτάται επίσης από το συνολικό τμήμα της επιφάνειας που είναι «ορατό» από το ανθρώπινο σώμα. Η σημασία της αποτυπώθηκε με πειράματα σε περιβαλλοντικούς θαλάμους που έδειξαν ότι άτομα αισθανόταν θερμική άνεση σε θερμοκρασία 10 °C όταν οι γύρω επιφάνειες θερμαινόταν επαρκώς, ενώ αντίθετα αισθανόταν δυσφορία σε θερμοκρασία 49 °C αν οι περιβάλλουσες επιφάνειες είχαν χαμηλή θερμοκρασία. Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας σε περιπτώσεις γραφείων πρέπει να διατηρείται μεταξύ 18 °C και 27 °C ανάλογα με τα είδη ένδυσης των εργαζομένων και το επίπεδο του μεταβολισμού τους.

Η μέτρηση της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενός σφαιρικού θερμομέτρου (globe thermometer, σχήμα 1), το οποίο μπορεί να καταγράψει τη συνδυαστική επίδραση της ακτινοβολίας από τις επιφάνειες και της ταχύτητας του αέρα στη θερμοκρασία του χώρου. Το σφαιρικό θερμόμετρο αποτελείται από μία μαύρη χάλκινη σφαίρα, η οποία περιέχει στο εσωτερικό της ένα αισθητήριο θερμοκρασίας. Το θερμόμετρο τοποθετείται στον εσωτερικό χώρο που ζητείται να υπολογιστεί η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας και αφήνεται για χρόνο 10-15 λεπτά (ανάλογα με τη διάμετρο της σφαίρας και τις μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες) ώστε να επιτευχθεί ισορροπία ανάμεσα στη θερμότητα που ανταλλάσσει η σφαίρα με το περιβάλλον λόγω μεταφοράς και ακτινοβολίας. Αν η θερμοκρασία της σφαίρας (T_G) είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα, η σφαίρα προσλαμβάνει θερμότητα, ενώ αποβάλλει θερμότητα στην αντίθετη περίπτωση, οπότε οι εσωτερικές επιφάνειες που περικλείουν τη σφαίρα είναι ψυχρότερες από αυτήν. Η συνήθης διάμετρος της σφαίρας σε ένα σφαιρικό θερμόμετρο είναι 150 mm. Όσο μικρότερη είναι η σφαίρα τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της θερμότητας λόγω μεταφοράς. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αέρα, τόσο η τιμή της T_G πλησιάζει την τιμή της θερμοκρασίας του αέρα.



Σχήμα 3: Σχηματική παράσταση σφαιρικό θερμομέτρου (αριστερά) και εικόνα σφαιρικού θερμομέτρου Sweta 05 (δεξιά) με διάμετρο σφαίρας 150 mm.

Για τον προσδιορισμό της T_{mrt} έχουν διατυπωθεί αρκετές εμπειρικές σχέσεις. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη είναι η:

$$T_m = \left[(T_G + 273)^4 + \frac{1,1 * 10^8 * v^{0,6}}{\varepsilon * D^{0,4}} * (T_G - T_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (3)$$

Όπου T_{mrt} η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (°C)

T_G η θερμοκρασία του σφαιρικού θερμομέτρου (°C)

T_a η θερμοκρασία του αέρα (°C)

v η ταχύτητα του αέρα (m/s)

ϵ ο συντελεστής εκπομπής της μαύρης σφαίρας (αδιάστατο μέγεθος, $\epsilon=0,95$ για το Swema 05)

D η διάμετρος της σφαίρας (m, $D=0,15$ m για το Swema 05).

Η παραπάνω σχέση προσομοιάζει ακριβέστερα την επίδραση της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας στο ανθρώπινο σώμα σε περίπτωση που το άτομο κάθεται, λόγω του σφαιρικού σχήματος του θερμομέτρου. Σε περίπτωση ατόμου που στέκεται θα ήταν προτιμότερο ένα ελλειψοειδές σχήμα θερμομέτρου.

Σε πολλές μελέτες και εφαρμογές θερμικής άνεσης χρησιμοποιείται η **ενεργός θερμοκρασία (operative temperature, T_{op})**. Ορίζεται ως η ομοιόμορφη θερμοκρασία μιας κλειστής επιφάνειας στην οποία η ανταλλαγή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και μεταφοράς από το ανθρώπινο σώμα ισούται με την πραγματική ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας στο πραγματικό υπό εξέταση περιβάλλον. Προκύπτει ως η μέση τιμή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας σταθμισμένες με τους αντίστοιχους συντελεστές μεταφοράς.

$$T_o = \frac{h_r T_m + h_c T_a}{h_r + h_c} \quad (4)$$

Όπου T_a η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και h_r , h_c οι συντελεστές διάδοσης θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και μεταφοράς αντίστοιχα ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$). Ο οργανισμός πιστοποίησης ASHRAE προτείνει ότι χωρίς σημαντικό σφάλμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλά ο μέσος όρος των τιμών της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$T_o = \frac{T_m + T_a}{2} \quad (5)$$

Η ενεργός θερμοκρασία χρησιμοποιείται πολύ συχνά ως δείκτης για τον καθορισμό του εύρους των θερμοκρασιών ανάμεσα στις οποίες θεωρείται ότι οι διαμένοντες σε ένα εσωτερικό περιβάλλον βιώνουν συνθήκες θερμικής άνεσης.

ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ

Για τον προσδιορισμό της θερμικής άνεσης χρησιμοποιούνται δύο κατηγορίες μοντέλων, τα μοντέλα θερμικής ισορροπίας και τα μοντέλα προσαρμογής. Τα μοντέλα θερμικής ισορροπίας (Heat balance models) είναι τα πλέον αναγνωρισμένα από τη διεθνή κοινότητα μοντέλα προσδιορισμού και περιγραφής της θερμικής άνεσης. Αναπτύχθηκαν βασιζόμενα στη χρήση των αρχών της ανταλλαγής θερμότητας του ανθρώπινου σώματος με το περιβάλλον αλλά και σε πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν κάτω από ελεγχόμενες μικροκλιματικές συνθήκες (συνήθως μέσα σε θαλάμους σταθερών συνθηκών). Τα μοντέλα προσαρμογής (adaptive models) αναπτύχθηκαν μέσω μεγάλου αριθμού (αρκετές εκατοντάδες) μελετών κάτω από πραγματικές συνθήκες και βασίστηκαν στην πεποίθηση ότι οι διαμένοντες σε ένα χώρο αλληλεπιδρούν δυναμικά με το περιβάλλον και μεταβάλλουν τις συνθήκες ώστε να αισθάνονται καλύτερα μέσα σε αυτό. Τα μοντέλα θερμικής ισορροπίας βρίσκουν καλύτερη εφαρμογή σε κτήρια με μηχανικό αερισμό, ενώ αντίθετα τα μοντέλα προσαρμογής δίνουν γενικά καλύτερα αποτελέσματα σε κτήρια με φυσικό αερισμό. Παρόλο που μια συγκεκριμένη σταθερή θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει σε αίσθηση θερμικής ικανοποίησης, συνήθως η θερμική άνεση επιτυγχάνεται μέσω διαφορετικών εναλλασσόμενων θερμικών αποκρίσεων στο εσωτερικό περιβάλλον. Τα μοντέλα προσαρμογής επιτρέπουν την ευελιξία στο σχεδιασμό φυσικά αεριζόμενων κτηρίων που επιτρέπουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των κτηρίων. Έτσι μπορεί να επιτυγχάνεται η θερμική ικανοποίηση των διαμενόντων με παράλληλη μείωση του ενεργειακού κόστους των κτηρίων.

Δεν υπάρχει ομοφωνία στη διεθνή κοινότητα αναφορικά με το ποιο είδος μοντέλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί καλύτερα σε κτήρια που χρησιμοποιούν μερικών τεχνητό εξαερισμό είτε χωρικά (σε κάποια μόνο τμήματα) είτε χρονικά (μόνο σε κάποιες χρονικές περιόδους). Πριν προχωρήσουμε στην εξέταση των δύο μοντέλων θα αναφερθούν κάποια στοιχεία για τους μηχανισμούς ανταλλαγής θερμότητας του ανθρώπινου σώματος με το περιβάλλον.

Ισοζύγιο ενέργειας ανθρώπινου οργανισμού.

Όπως όλα τα θηλαστικά, έτσι και ο άνθρωπος καταναλώνει φαγητό για να πάρει ενέργεια και στη συνέχεια πρέπει να αποβάλλει όλη την επιπλέον ενέργεια που παράγεται μέσω αυτής της διαδικασίας. Αυτή η απομάκρυνση θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω των τριών βασικών τρόπων ανταλλαγής θερμότητας (ακτινοβολία (radiation), μεταφορά (convection) και επαφή (conduction)) και επιπλέον με τη διαδικασία της εξάτμισης. Για να παραμένει ένα άτομο υγιές, η μεταφορά θερμότητας θα πρέπει να πραγματοποιείται με σχετικά αργό ρυθμό ώστε να μην μεταβάλλεται σημαντικά η θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος. Το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον όταν αποβάλλει θερμότητα με ακριβώς το ίδιο ρυθμό με τον οποίο προσλαμβάνει θερμότητα. Γενικά η μαθηματική σχέση που περιγράφει τη μεταβολή της θερμότητας στον ανθρώπινο οργανισμό είναι:

$$\Delta S = M - W \pm R \pm C_v \pm C_d - E - RES \quad (6)$$

Όπου: ΔS : Μεταβολή αποθηκευμένης θερμότητας (W/m^2 ανθρώπινης επιφάνειας)

M : Μεταβολισμός

W : Ρυθμός παραγωγής Μηχανικού έργου

R : Ανταλλαγή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας

C_v : Ανταλλαγή θερμότητας λόγω μεταφοράς (μεταγωγής)

C_d : Ανταλλαγή θερμότητας λόγω επαφής

E : Απώλειες θερμότητας λόγω εξάτμισης

RES : Απώλειες θερμότητας λόγω αναπνοής



Σχήμα 4: Μηχανισμοί ανταλλαγής θερμότητας του ανθρώπινου σώματος με το περιβάλλον.

Ο ρυθμός μεταβολισμού λαμβάνει πάντοτε θετικές τιμές. Αν οι μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες οδηγούν σε μικρότερη αποβολή θερμότητας σε σχέση με αυτή που παράγεται, η επιπλέον θερμότητα αποθηκεύεται με τη μορφή λίπους στους ιστούς του σώματος. Η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι όμως μικρή με αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή το ανθρώπινο σώμα να ενεργοποιεί τους μηχανισμούς αποβολής θερμότητας που διαθέτει και να προσπαθεί να φτάσει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας με το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα αυξάνεται η ροή αίματος στα αγγεία (αγγειοδιαστολή) και ενεργοποιείται και ο μηχανισμός της εφίδρωσης. Η αντίθετες διαδικασίες ακολουθούνται σε περιπτώσεις που οι απώλειες θερμότητας είναι μεγαλύτερες από την παραγωγή και πρόσληψη θερμότητας.

Θα γίνει στη συνέχεια εκτενέστερη αναφορά στο μηχανισμό απώλειας θερμότητας λόγω εξάτμισης, καθώς η ενεργοποίηση του σχετίζεται σε πολλές περιπτώσεις με την προσπάθεια του ανθρώπινου οργανισμού να μεταβεί σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον. Οι απώλειες θερμότητας λόγω εξάτμισης δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στο ισοζύγιο θερμότητας σε συνήθεις θερμοκρασίες, γίνονται όμως σημαντικές σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε συνήθεις θερμοκρασίες υπάρχει μια σταθερή ροή αισθητής θερμότητας (sensible heat) από το δέρμα προς τον περιβάλλοντα αέρα, η οποία καθορίζεται από τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο δέρμα και τον αέρα. Αν η θερμοκρασία του αέρα γίνει μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του ανθρώπινου δέρματος αυξάνεται η εξάτμιση από το δέρμα. Αυτό μπορεί να συμβεί και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε περιπτώσεις έντονης σωματικής εργασίας. Ο ρυθμός εξάτμισης εξαρτάται από την υγρασία του αέρα και σε μεγαλύτερο βαθμό από την ταχύτητα του αέρα. Η υγρασία που εξατμίζεται από το δέρμα μεταφέρεται μακριά από το σώμα με την κίνηση του περιβάλλοντα αέρα. Για να μεταβεί το νερό που αποβάλλεται από τον οργανισμό στην αέρια φάση απαιτείται θερμότητα, η οποία αντλείται από τον ανθρώπινο οργανισμό και είναι η λανθάνουσα θερμότητα που αποβάλλεται από τον ανθρώπινο οργανισμό. Μικρά ποσά λανθάνουσας θερμότητας αποβάλλονται και σε περιπτώσεις που δεν έχουμε εφίδρωση, καθώς ο αέρας που αποβάλλεται μέσω του αναπνευστικού συστήματος είναι συνήθως κορεσμένος σε υδρατμούς (100% RH) και επομένως απαιτείται ένα σημαντικό ποσό θερμότητας για να μετατραπεί το νερό που περιέχει σε υδρατμούς. Θα εξεταστούν στη συνέχεια οι δύο κατηγορίες μοντέλων θερμικής άνεσης.

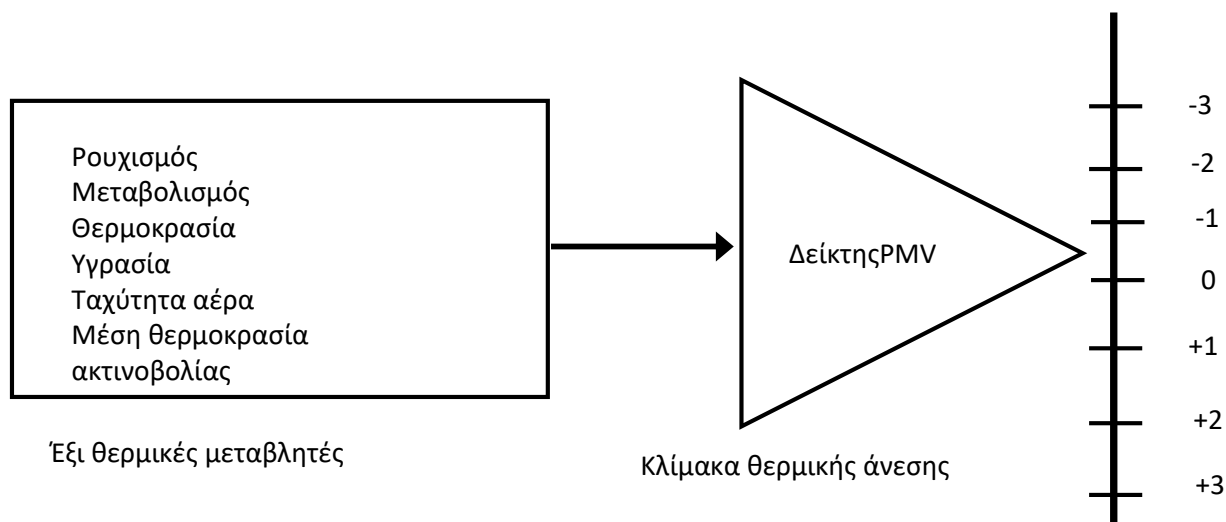
A) Μοντέλο θερμικής ισορροπίας

Η ανάπτυξη των μοντέλων θερμικής ισορροπίας ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960 με πρωτεργάτη το Δανό καθηγητή Povl Ole Fanger. Η δουλεία του ήταν πρωτοποριακή και τα περισσότερα μοντέλα αυτής της κατηγορίας βασίζονται σε αυτή, ενώ το μοντέλο που ανέπτυξε υπάρχει αυτούσιο στο πρότυπο ISO7730. Το μοντέλο του Fanger συνδυάζει τη θεωρία της θερμικής ισορροπίας του ανθρώπινου σώματος μέσω ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον, παραγωγής έργου και μεταβολισμού με τη φυσιολογία της αυτορρύθμισης της θερμοκρασίας του σώματος, ώστε να προσδιοριστεί μαθηματικά το εύρος των θερμοκρασιών που οι διαμένοντες σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον θα αισθάνονται άνετα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το ανθρώπινο σώμα ενεργοποιεί μηχανισμούς (εφίδρωση, τρέμουλο, κλπ) ώστε να βρεθεί σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Αν επιτευχθεί θερμική ισορροπία το άτομο αισθάνεται άνετα. Ο Fanger υποστήριξε ότι το σύστημα αυτορρύθμισης της θερμοκρασίας είναι αρκετά αποτελεσματικό και επομένως μπορεί να επιτευχθούν επίπεδα θερμικής άνεσης εντός αρκετά μεγάλων ορίων θερμοκρασιών του περιβάλλοντος. Για να προσδιοριστούν οι συνθήκες θερμικής άνεσης, ο Fanger πραγματοποίησε εντατική μελέτη των διεργασιών του ανθρώπινου σώματος κοντά στα όρια στα οποία υπάρχει θερμική ισορροπία με το περιβάλλον. Μέσω των παρατηρήσεων του διαπίστωσε ότι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την επίτευξη θερμικής ισορροπίας για δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ο βαθμός εφίδρωσης και η μέση θερμοκρασία του δέρματος. Τα δύο παραπάνω εξαρτώνται σημαντικά από το μεταβολισμό και πιο συγκεκριμένα από το είδος της δραστηριότητας που εκτελεί το άτομο. Στη συνέχεια ο Fanger χρησιμοποίησε δεδομένα από μελέτη σε 183 δανούς φοιτητές, οι οποίοι εκτέθηκαν σε διάφορες μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες και καθόρισε γραμμικές σχέσεις ανάμεσα στο ρυθμό εφίδρωσης και το βαθμό σωματικής δραστηριότητας. Επιπλέον μέσω πειραμάτων σε περιβαλλοντικούς θαλάμους προσδιόρισε εμπειρικές γραμμικές σχέσεις μεταξύ του επιπέδου σωματικής δραστηριότητας και της θερμοκρασίας του δέρματος. Τις παραπάνω σχέσεις τις εισήγαγε στη βασική σχέση του ισοζυγίου ενέργειας του ανθρώπινου οργανισμού (Εξίσωση 6) και δημιούργησε τη βασική εξίσωση προσδιορισμού της θερμικής άνεσης με την οποία προσδιορίζονται οι συνθήκες στις οποίες οι διαμένοντες σε ένα εσωτερικό περιβάλλον αισθάνονται άνετα. Η βασική εξίσωση του Fanger τροποποιήθηκε αργότερα από τον ίδιο με χρήση δεδομένων από μελέτη σε 1296 υποψηφίους. Προέκυψε έτσι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέχρι σήμερα εξίσωση προσδιορισμού των επιπέδων θερμικής άνεσης για δεδομένες μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες, βαθμό σωματικής δραστηριότητας και ρουχισμό των διαμενοντών σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Αυτή η διευρυμένη εξίσωση θερμικής άνεσης αποτέλεσε τη βάση του δείκτη PMV (Predicted Mean Vote) ο οποίος κατατάσσει το επίπεδο θερμικής άνεσης σε μια κλίμακα επτά σημείων και έχει υιοθετηθεί στα περισσότερα πρότυπα (π.χ. ASHRAE 55-2010) προσδιορισμού της θερμικής άνεσης. Ο δείκτης PMV χρησιμοποιήθηκε για να διαμορφωθεί μια κλίμακα προσδιορισμού της θερμικής άνεσης επτά σημείων που έχει διαβάθμιση από το -3 (πολύ ψυχρό περιβάλλον) έως το +3 (πολύ θερμό περιβάλλον). Η κλίμακα παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

Πίνακας 4: Κλίμακα του δείκτη PMV (Predicted Mean Vote)

	+3 Θερμό περιβάλλον (hot)
	+2 Ζεστό περιβάλλον (warm)
	+1 Ελαφρώς ζεστό περιβάλλον (slightly warm)
PMV	=0 Ουδέτερο Περιβάλλον (neutral)
	-1 Ελαφρώς ψυχρό περιβάλλον (slightly cool)
	-2 Ψυχρό περιβάλλον (cool)
	-3 Πολύ ψυχρό περιβάλλον (cold)

Σχηματικά η χρήση ενός μοντέλου θερμικής ισορροπίας για τον υπολογισμό του δείκτη PMV παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 5: Σχηματική παράσταση της χρήσης και εφαρμογής ενός μοντέλου θερμικής ισορροπίας

Η εξίσωση υπολογισμού του δείκτη PMV (μαζί με τις βοηθητικές εξισώσεις υπολογισμού παραμέτρων που εμφανίζονται στη βασική σχέση) είναι:

$$P = (0,325 * e^{-0,014 * M} + 0,032) * [M - 0,35 * (43 - 0,061 * M - P_V) - 0,42 * (M - 50) - 0,0023 * M * (44 - P_V) - 0,0014 * M * (34 - T_a) - 3,4 * 10^{-8} * f_c * [(T_c + 273)^4 - (T_m + 273)^4 - f_c * (T_c - T_a)]] \quad (7)$$

$$T_c = 35,7 - 0,032 * M - 0,18 * I_c \{3,4 * 10^{-8} * f_c * [(T_c + 273)^4 - (T_m + 273)^4] + f_c * h_c * (T_c + T_a)\} \quad (7.1)$$

$$h_c = 2,05 * (T_c - T_a)^{0,2} \quad \gamma \quad 2,38 * (T_c - T_a)^{0,2} > 10,4 * \sqrt{v} \quad (7.2\alpha)$$

$$h_c = 10,4 * \sqrt{v} \quad \gamma \quad 2,38 * (T_c - T_a)^{0,2} < 10,4 * \sqrt{v} \quad (7.2\beta)$$

$$P_V = \frac{P_s * R}{100} \quad (7.3)$$

Όπου T_a είναι η θερμοκρασία του αέρα ($^{\circ}\text{C}$), T_{mrt} η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας ($^{\circ}\text{C}$), M ο ρυθμός μεταβολισμού ($\text{kcal}/(\text{hr} * \text{m}^2)$), v η ταχύτητα του αέρα (m/s), P_V είναι η τάση υδρατμών του αέρα (mmHg), P_s είναι η τάση υδρατμών του κορεσμένου αέρα (mmHg), I_{cl} είναι η θερμική αντίσταση του ρουχισμού (clo), h_c ο συντελεστής διάδοσης θερμότητας λόγω μεταφοράς ($\text{kcal}/\text{m}^2 * \text{h} * ^{\circ}\text{C}$), f_{cl} η λόγος της επιφάνειας με ρούχα προς τη συνολική επιφάνεια του σώματος, T_{cl} η θερμοκρασία των ρούχων στην πλευρά που είναι σε επαφή με τον αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον ($^{\circ}\text{C}$) και RH η σχετική υγρασία (%). Η τάση υδρατμών μπορεί να προσδιοριστεί από τον παρακάτω πίνακα ανάλογα με τη θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Πίνακας 5: Τάση υδρατμών κορεσμένου αέρα σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας

Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Τάση υδρατμών P_s (mmHg)
0	4.6
10	9.2
20	17.4
30	31.7

40	55.1
50	92.2
60	149
70	233
80	354
90	525
100	758
120	1486
140	2704
160	4619
180	7475
200	11549

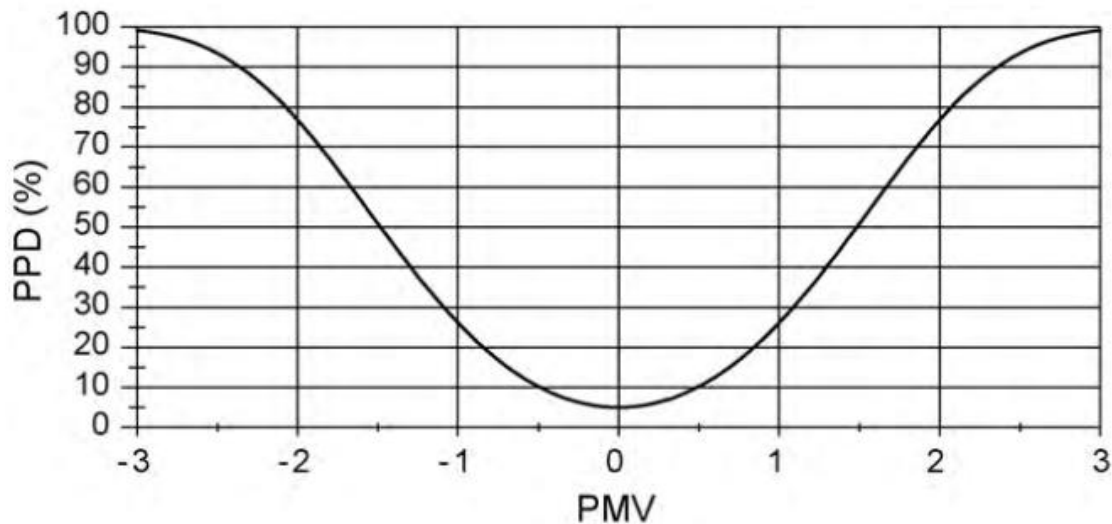
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η αίσθηση θερμικής άνεσης σε κάποιο περιβάλλον υπόκειται σε μεγάλο βαθμό σε υποκειμενικά κριτήρια. Επομένως ο δείκτης PMV, που υπολογίζεται με βάση τις μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες, το μεταβολισμό και το ρουχισμό, θα πρέπει να συνοδεύεται από ένα ακόμα δείκτη που θα βασίζεται σε υποκειμενικά κριτήρια. Ο δείκτης αυτός ονομάζεται PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) και προέκυψε από απαντήσεις ατόμων αναφορικά με το πώς αισθάνονται σε κάθε περιβάλλον με βάση την κλίμακα των επτά σημείων του δείκτη PMV. Ουσιαστικά εκφράζει το ποσοστό των ατόμων που αισθάνονται άνετα σε κάποιο περιβάλλον. Με βάση τα πειράματα του Fanger συμπληρώθηκαν ερωτηματολόγια αναφορικά με την αίσθηση του κάθε ατόμου και όσα άτομα έδωσαν τιμές -1,0 και +1 θεωρήθηκε ότι αισθάνονται άνετα στο περιβάλλον, ενώ τα υπόλοιπα θεωρήθηκε ότι δυσφορούν στις συνθήκες στις οποίες βρίσκονται. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε μία αριθμητική σχέση ανάμεσα στους δύο δείκτες που είναι:

$$P = 100 - 95 e^{-[(0,003353 * P^4 + 0,2179 * P^2)]} \quad (8)$$

Η σχέση των δύο δεικτών παρουσιάζεται γραφικά παρακάτω (Σχήμα 6). Παρατηρούμε ότι υπάρχει συμμετρία γύρω από τη θέση PMV=0 όπου το περιβάλλον θεωρείται θερμικά ουδέτερο. Είναι ενδιαφέρον επίσης το γεγονός ότι για τη μηδενική τιμή του δείκτη PMV υπάρχει ένα ποσοστό ατόμων (περίπου 5%) που δεν αισθάνεται άνετα στο θερμικό περιβάλλον. Ανάλογα με τις τιμές των δεικτών PMV και PPD μπορούν να καθοριστούν τρεις ζώνες θερμικής άνεσης, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6). Οι ζώνες αυτές έχουν ενταχθεί στο πρότυπο ISO 7730. Στην ζώνη 1 αντιστοιχεί στο υψηλότερο ποσοστό ικανοποίησης αναφορικά με το θερμικό περιβάλλον, στη ζώνη 2 έχουμε μια κατάσταση όπου δεν υπάρχει δυσφορία στο χώρο όπου βρίσκεται το άτομο χωρίς όμως να αισθάνεται τελείως άνετα, ενώ η ζώνη 3 αντιπροσωπεύει τις ελάχιστες ανεκτές συνθήκες για το θερμικό περιβάλλον σε κάποιο εσωτερικό χώρο.

Πίνακας 6: Ζώνες θερμικής άνεσης ανάλογα με τους δείκτες PMV και PPD

Ζώνη Θερμικής Άνεσης	Δείκτης PPD	Εύρος του δείκτη PMV
1	<6	-0,2<PMV<0,2'
2	<10	-0,5<PMV<0,5'
3	<15	-0,7<PMV<0,7'



Σχήμα 6:Γραφική παράσταση του δείκτη PMV (Predicted Mean Vote) σε σχέση με το δείκτη PPD (Predicted Percentage of dissatisfied)

Περιορισμοί των μοντέλων θερμικής ισορροπίας

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις σε περιβαλλοντικούς θαλάμους πραγματοποιούνται συνήθως υπό σταθερές ελεγχόμενες συνθήκες, οι οποίες είναι πολύ δύσκολο να συναντηθούν στο πραγματικό περιβάλλον. Είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι οι μετρήσεις υπό ελεγχόμενες συνθήκες δεν μπορούν να αναπαραστήσουν ρεαλιστικά το πραγματικό περιβάλλον στο οποίο ζει ο σύγχρονος άνθρωπος το οποίο σε πολλές περιπτώσεις μεταβάλλεται δυναμικά σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Επομένως η αποκλειστική χρήση μοντέλων θερμικής ισορροπίας για τον προσδιορισμό των προτύπων θερμικής άνεσης δεν είναι αποτελεσματική στον «πραγματικό» κόσμο. Τα μοντέλα θερμικής ισορροπίας είναι αποτελεσματικά μόνο για την πρόβλεψη συνθηκών θερμικής άνεσης υπό σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπλέον πειραματικές μελέτες σε εσωτερικούς χώρους σε περιοχές με τροπικό κλίμα έδειξαν ότι μέσω των δεικτών PMV και PPD δεν μπορούν να προσδιοριστούν συνθήκες άνεσης, ειδικά για κτήρια που δεν έχουν μηχανικά συστήματα κλιματισμού. Άλλες παρεμφερείς μελέτες έδειξαν λάθη και σε κτήρια με μηχανικό κλιματισμό σε περιοχές με τροπικό κλίμα. Πέρα από το γεγονός ότι οι συνθήκες σε τέτοιες περιοχές δεν είχαν αναπαραχθεί πλήρως κατά τα πειράματα σε θαλάμους, υπάρχει και το υποκειμενικό κριτήριο καθώς τα άτομα που διαμένουν στις περιοχές αυτές δεν προτιμούν τις συνθήκες θερμικής ουδετερότητας ($PMV=0$) αλλά αισθάνονται περισσότερο άνετα όταν το περιβάλλον είναι πιο «δροσερό». Το αντίθετο συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις για άτομα που βρίσκονται σε περιοχές με ψυχρό κλίμα. Τα παραπάνω δείχνουν πως είναι δύσκολο να υπάρξει ένα θερμικό μοντέλο που να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις περιοχές του πλανήτη, καθώς η υποκειμενική αίσθηση θερμικής άνεσης διαφέρει από τόπο σε τόπο.

Β) Μοντέλα προσαρμογής

Τα μοντέλα προσαρμογής βασίζονται στην αρχή ότι αν προκληθεί μία μεταβολή στο περιβάλλον η οποία δημιουργεί την αίσθηση της δυσφορίας σε ένα άτομο, το άτομο αυτό θα αντιδράσει με διάφορους τρόπους ώστε να επανέλθει σε μία κατάσταση όπου αισθάνεται άνετα. Με βάση την προσέγγιση αυτή η επίτευξη θερμικής άνεσης σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό από της ενέργειες των διαμενόντων σε αυτό να μεταβάλλουν τις μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες ώστε να ταυτιστούν με τις δικές τους θερμικές προτιμήσεις.

Η προσαρμογή των ατόμων στο θερμικό περιβάλλον γίνεται άμεσα με ενέργειες που αλλάζουν τις συνθήκες του περιβάλλοντος ή τη θερμική κατάσταση του ατόμου είτε έμμεσα μέσω της αλλαγής συμπεριφοράς ή συνηθειών. Πιο συγκεκριμένα η προσαρμογή διακρίνεται σε α) Φυσιολογική/Σωματική προσαρμογή, β) Ψυχολογική προσαρμογή και γ) Προσαρμογή συμπεριφοράς.

α) Φυσιολογική/Σωματική προσαρμογή

Η σωματική προσαρμογή είναι σημαντική για να διατηρείται η θερμοκρασία του σώματος σε επίπεδα που επιτυγχάνεται θερμική άνεση στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Η προσαρμογή αυτή γίνεται μέσω της εφίδρωσης, της αγγειοδιαστολής και της αγγειοσυστολής. Η σωματική προσαρμογή μπορεί να γίνει μακροχρόνια σε γενετικό επίπεδο και βραχυπρόθεσμα μέσω του εγκλιματισμού με το φυσικό περιβάλλον. Η γενετική προσαρμογή αναφέρεται στο γονιδιακά χαρακτηριστικά μίας ομάδας ατόμων τα οποία έχουν διαμορφωθεί μέσα σε πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα το οποίο υπερβαίνει το χρόνο ζωής του εξεταζόμενου ατόμου. Αντίθετα ο εγκλιματισμός αφορά την άμεση αντίδραση των μηχανισμών ρύθμισης της θερμοκρασίας του σώματος στις αλλαγές του θερμικού περιβάλλοντος και των μικροπεριβαλλοντικών συνθηκών. Ο εγκλιματισμός δεν λαμβάνεται υπόψη στα μοντέλα θερμικής ισορροπίας αφού θεωρείται ότι η αρχική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το άτομο δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου.

Σε ένα ψυχρό περιβάλλον το σώμα μειώνει τη ροή αίματος προς το δέρμα (αγγειοσυστολή) ελαττώνοντας παράλληλα τη θερμοκρασία του δέρματος και την αποβολή θερμότητας προς το περιβάλλον. Αντίθετα σε ένα θερμό περιβάλλον, αυξάνεται η ροή αίματος μέσα από τα αγγεία προς το δέρμα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του δέρματος και η ροή θερμότητας προς το περιβάλλον. Αν δεν επιτευχθεί με τον τρόπο αυτό θερμική ισορροπία με το περιβάλλον αρχίζει η εφίδρωση και η θερμοκρασία μειώνεται μέσω εξάτμισης του ιδρώτα.

Η προσαρμογή σε προσωπικό επίπεδο αφορά μεταβολή της σωματικής δραστηριότητας, μεταβολή του είδους και της ποσότητας του ρουχισμού, μεταβολή της θέσης, κατανάλωση φαγητού, νερού ή άλλων υγρών. Αν η θερμοκρασία του δέρματος υπερβεί τους 45 °C (εσωτερική θερμοκρασία 40 °C) προκαλείται θερμικό στρες που οδηγεί στο θάνατο. Αντίστοιχα σε πολύ ψυχρά περιβάλλοντα μετά την αγγειοσυστολή ενεργοποιείται ο μηχανισμός της θερμογένεσης μέσω έντονης μυϊκής κίνησης (τρέμουλο). Αν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του σώματος γίνει μικρότερη από 20 °C επέρχεται θάνατος. Η μακροχρόνια παραμονή σε ψυχρά ή θερμά περιβάλλοντα οδηγεί σε καρδιοαγγειακή και ενδοκρινολογική προσαρμογή του οργανισμού. Μέσω ανάλογης αύξησης ή μείωσης της ροής του αίματος και ρύθμιση του μηχανισμού εφίδρωσης. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται σταδιακά και η αρχική δυσφορία με το θερμικό περιβάλλον.

β) Ψυχολογική προσαρμογή

Δεν υπάρχει κάποιος τρόπος να ποσοτικοποιηθεί η ψυχολογική προσαρμογή σε κάποιο θερμικό περιβάλλον. Η ψυχολογική προσαρμογή περιλαμβάνει την επίδραση γνωστικών και πολιτιστικών μεταβλητών στην ψυχολογική κατάσταση του ατόμου και περιγράφει την έκταση στην οποία οι συνήθειες και οι προσδοκίες επηρεάζουν τις θερμικές αντιλήψεις. Στην αντίληψη του κάθε ατόμου είναι δυνατόν να υπάρχουν κάποιες βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες αισθάνεται άνετα και έχουν προκύψει από τις προηγούμενες εμπειρίες του. Οι συνθήκες αυτές λειτουργούν ως κριτήριο για το αν σε κάποιο χώρο επικρατούν συνθήκες θερμικής άνεσης. Οι συνθήκες αυτές

επηρεάζονται σημαντικά και από το είδος του χώρου (που σχετίζεται με τις δραστηριότητες που εκτελεί μέσα σε αυτόν το άτομο) καθώς είναι διαφορετικές οι προσδοκίες στο σπίτι, στους χώρους εργασίας ή σε χώρους διασκέδασης. Με βάση τα παραπάνω οι αντιδράσεις ενός ανθρώπου σε κλιματικές συνθήκες που δεν θεωρεί ιδανικές θα εξαρτηθούν μεταξύ άλλων από τις προσδοκίες του, την τρέχουσα ψυχολογία του και το είδος της ασχολίας που επιτελεί στο χώρο. Η ψυχολογική προσαρμογή δεν μπορεί να μελετηθεί εύκολα, αλλά δεν πρέπει να υποβαθμίζεται ο ρόλος της στην συνολική προσπάθεια του ατόμου να προσαρμοστεί στο θερμικό περιβάλλον. Αντίθετα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και μπορεί να εξηγήσει σε μεγάλο βαθμό τις αποκλίσεις ανάμεσα στις θεωρητικές προβλέψεις των μοντέλων θερμικής ισορροπίας και των θερμικών αντιλήψεων των ατόμων σε μελέτες σε πραγματικά περιβάλλοντα. Εξηγεί επίσης τις διαφορές στη θερμική άνεση που παρατηρήθηκαν ανάμεσα σε χώρους γραφείων και οικιών ή ανάμεσα σε κτήρια με φυσικό και μηχανικό εξαερισμό για τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες.

γ) Προσαρμογή συμπεριφοράς

Η προσαρμογή συμπεριφοράς περιλαμβάνει όλες τις ενέργειες και τις πρωτοβουλίες που αναλαμβάνει το άτομο για να προσαρμοστεί ή για να αλλάξει ένα θερμικό περιβάλλον στο οποίο δεν αισθάνεται άνετα. Η προσαρμογή συμπεριφοράς διακρίνεται σε α) προσωπική προσαρμογή, β) τεχνολογική προσαρμογή και γ) πολιτιστική προσαρμογή. Η προσωπική προσαρμογή αναφέρεται σε όλες τις ενέργειες που πραγματοποιεί το άτομο, όπως μεταβολή της σωματικής δραστηριότητας, αλλαγή του ρουχισμού, αλλαγή της θέσης, κατανάλωση τροφής και υγρών. Η τεχνολογική προσαρμογή περιλαμβάνει τη χρήση ψύξης και θέρμανσης, άνοιγμα ή κλείσιμο παραθύρων, χρήση σκιαδίων κλπ.). Τέλος η πολιτιστική προσαρμογή περιλαμβάνει μεταβολές σε καθημερινές συνήθειες, όπως αλλαγή ωρών εργασίας αν είναι εφικτό. Σε πολλές περιπτώσεις η πολιτιστική προσαρμογή γίνεται συνολικά από μία ομάδα πληθυσμού που ζει σε μία περιοχή, όπως καθιέρωση ωρών ανάπαυσης το μεσημέρι σε χώρες με θερμό κλίμα. Η προσαρμογή συμπεριφοράς διαφέρει από την σωματική και την ψυχολογική προσαρμογή καθώς περιλαμβάνει συνειδητές ενέργειες του ατόμου να μεταβεί σε κατάσταση θερμικής άνεσης και να διορθώσει το περιβάλλον του.

Συσχέτιση θερμοκρασίας άνεσης και εξωτερικής θερμοκρασίας σε μοντέλα προσαρμογής.

Μελέτες σε πραγματικές συνθήκες έδειξαν ότι σε κτήρια με φυσικό αερισμό υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος και στη θερμοκρασία που τα άτομα αισθάνονται άνετα. Η γραμμική αυτή σχέση δεν επεκτείνεται σε κτήρια με μηχανικό εξαερισμό και για ψυχολογικούς λόγους, καθώς είναι άλλες οι απαιτήσεις των ατόμων σε χώρους που το περιβάλλον μπορεί να ελεγχθεί. Η σχέση ανάμεσα στην εξωτερική θερμοκρασία (T_{out}) και τη θερμοκρασία που υπάρχει η αίσθηση της άνεσης στον εσωτερικό χώρο (T_{co}) είναι της μορφής:

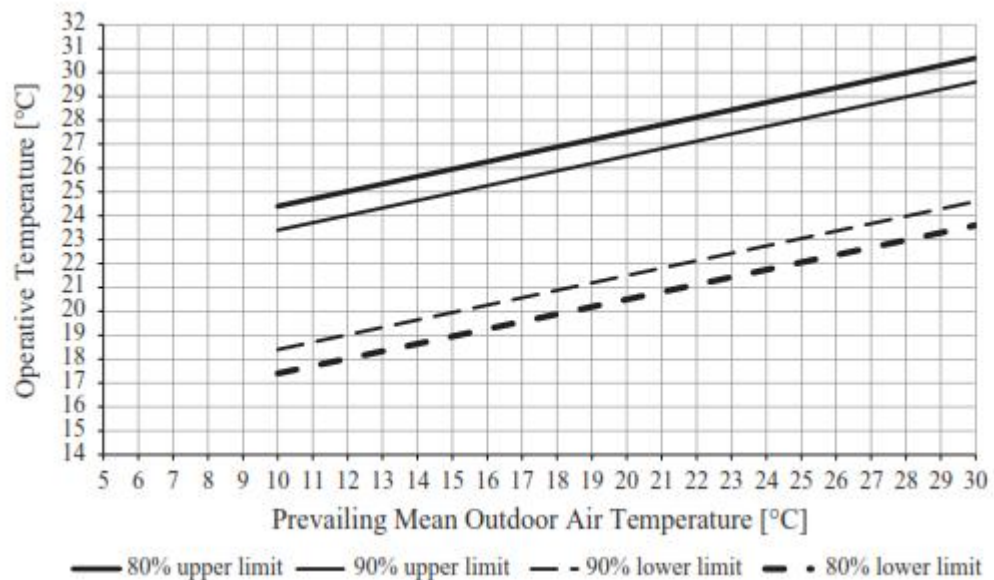
$$T_c = aT_o + b \quad (9)$$

Η τιμή της εξωτερικής θερμοκρασίας δεν αναφέρεται στην τιμή που έχει τη στιγμή του υπολογισμού, αλλά είναι σταθμισμένος μέσος όρος των εξωτερικών θερμοκρασιών των προηγούμενων ημερών, καθώς οι θερμοκρασίες αυτές επηρεάζουν ψυχολογικά και σωματικά το άτομο αλλά μεταβάλλουν και τη συμπεριφορά του (π.χ. αναφορικά με το είδος του ρουχισμού που θα επιλέξει). Με βάση πειραματικές εργασίες σε διάφορες περιοχές του πλανήτη υιοθετήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις στα περιβαλλοντικά πρότυπα ASHRAE 55-2010 και EN15251. Έχουμε ότι: Σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 55-2010:

$$T_c = 0,31T_r + 17,8 \text{ (} ^\circ\text{C)} \quad (A. 55 - 2010) \quad (10)$$

Όπου T_{ref} η συννηθέστερα εμφανιζόμενη μέση εξωτερική θερμοκρασία για χρονικό διάστημα 7 έως 30 ημερών πριν την υπό εξέταση ημέρα.

Τα αποδεκτά όρια σε ποσοστό 80% και 90% για τη θερμοκρασία άνεσης σύμφωνα με τη σχέση 8 φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Η θερμοκρασία T_{co} μπορεί να ταυτιστεί με την ενεργό θερμοκρασία T_{op} . Το ποσοστό 80% αναφέρεται σε τυπικές καθημερινές εφαρμογές και το ποσοστό 90% σε εξειδικευμένες περιπτώσεις που απαιτούνται καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης. Το επίπεδο δραστηριότητας θεωρείται ότι είναι μικρότερο του 1,3 met.



Σχήμα 7: Όρια των θερμοκρασιών άνεσης σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 55-2010

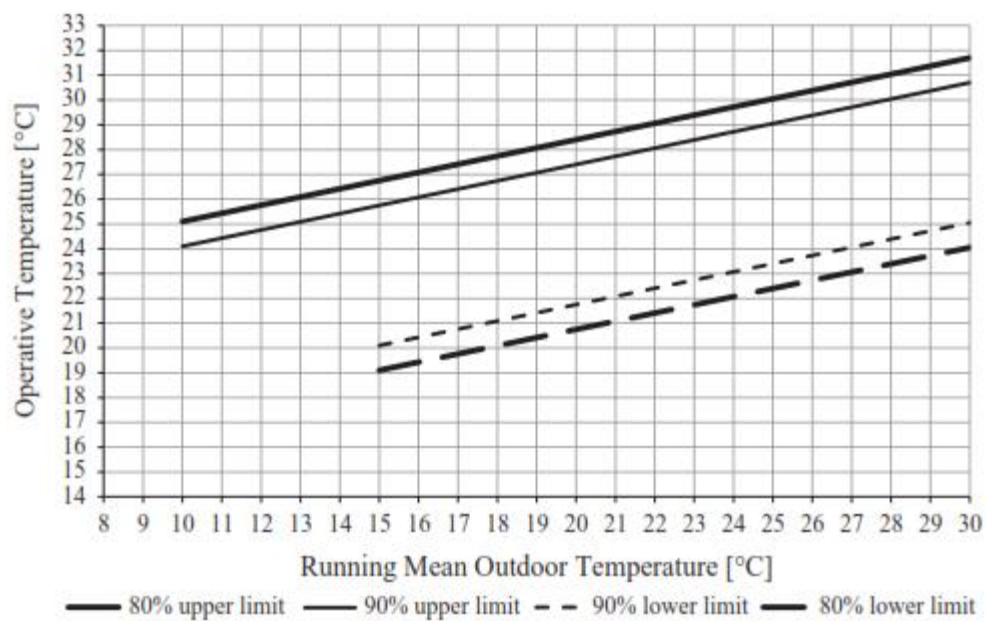
Σύμφωνα με το πρότυπο EN15251:

$$T_c = 0,33T_{r-7} + 18,8 \text{ (} ^\circ C \text{)} \quad (E \ 15251) \quad (10)$$

Όπου T_{r-7} σταθμισμένη μέση τιμή της εξωτερικής θερμοκρασίας των προηγούμενων επτά ημερών, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{r-7} = \frac{T_{-1} + 0,8T_{-2} + 0,6T_{-3} + 0,5T_{-4} + 0,4T_{-5} + 0,3T_{-6} + 0,2T_{-7}}{3,8} \quad (11)$$

Τα αποδεκτά όρια σε ποσοστό 80% και 90% για την ενεργό θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση 9 παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8: Όρια των ενεργών θερμοκρασιών σύμφωνα με το πρότυπο EN15251

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ - ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ

Διεθνή Πρότυπα

Πρότυπο» είναι το έγγραφο που έχει καθιερωθεί με συναίνεση και έχει εγκριθεί από έναν αναγνωρισμένο φορέα, παρέχει, για κοινή και επαναλαμβανόμενη χρήση, κανόνες, κατευθυντήριες οδηγίες ή χαρακτηριστικά, για δραστηριότητες ή τα αποτελέσματά τους και αποσκοπεί στην επίτευξη του βέλτιστου βαθμού τάξης σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο εφαρμογής. Μέσω των προτύπων καθορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις για ένα προϊόν ή τμήμα προϊόντος, μια υπηρεσία, μία μέθοδο ή μία διαδικασία. Τα πρότυπα διευκολύνουν το εμπόριο εξασφαλίζοντας συμβατότητα και διαλειτουργικότητα των προϊόντων και των υπηρεσιών σε διεθνές επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό ωφελείται σημαντικά το εμπόριο προϊόντων ενώ παράλληλα διασφαλίζεται και ο καταναλωτής/τελικός χρήστης αναφορικά με ζητήματα που αφορούν την απόδοση, την λειτουργικότητα, την ασφάλεια, το κόστος και το χρόνο ζωής ενός προϊόντος ή μίας υπηρεσίας. Τα πρότυπα καθορίζονται και εκδίδονται από αναγνωρισμένους διεθνείς οργανισμούς μέσω μίας διαδικασίας ανταλλαγής γνώσης και συναίνεσης ανάμεσα σε όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη, δηλαδή κυβερνητικούς φορείς, επιχειρήσεις, καταναλωτές, περιβαλλοντικές οργανώσεις κλπ.

Όσον αφορά τα θέματα της ενεργειακής κατανάλωσης κτηρίων και της θερμικής άνεσης, συναντώνται διεθνή πρότυπα ISO, ASHRAE και EN. Για τα πρότυπα αυτά ισχύουν τα παρακάτω:

Ο **Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO, International Organization for Standardization)** είναι μια διεθνής οργάνωση δημιουργίας και έκδοσης προτύπων που αποτελείται από αντιπροσώπους των εθνικών οργανισμών τυποποίησης. Ο οργανισμός ιδρύθηκε στις 23 Φεβρουαρίου του 1947 και παράγει τα παγκόσμια βιομηχανικά και εμπορικά πρότυπα, τα επονομαζόμενα πρότυπα ISO. Ενώ ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης ορίζεται από τον ίδιο ως μη κυβερνητική οργάνωση, η ικανότητα του να θέτει πρότυπα τα οποία αργότερα οι κυβερνήσεις αποφασίζουν πως πρέπει να τηρούνται δια νόμων ή συνθηκών, τον καθιστά πιο ισχυρό από άλλες μη κυβερνητικές οργανώσεις και στην πράξη λειτουργεί σαν μια κοινοπραξία με ισχυρούς συνδέσμους με κυβερνήσεις. Μεταξύ αυτών που συμμετέχουν στον ISO, συγκαταλέγονται μεγάλες εταιρίες και τουλάχιστον ένα σωματείο τυποποίησης από κάθε κράτος μέλος.

Η **Αμερικανική Ένωση Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)** ιδρύθηκε το 1894 και μέχρι σήμερα έχει εκδώσει περισσότερα από 4000 πρότυπα με την κατασκευή κτηρίων, την ενεργειακή απόδοση, την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους, την ψύξη και τη θέρμανση και τη βιωσιμότητα των ενεργειακών πηγών αναφορικά με τη χρήση τους στο βιομηχανικό κλάδο. Αποτελεί πλέον ένα διεθνή οργανισμό που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις εξελίξεις στον τομέα της κατασκευής και της ενέργειας.

Τα Ευρωπαϊκά πρότυπα (ENs) είναι έγγραφα τα οποία έχουν επικυρωθεί από ένα από τους τρεις Ευρωπαϊκούς οργανισμούς πιστοποίησης (CEN, CENELEC και ETSI), οι οποίοι είναι αναγνωρισμένοι ως αρμόδιοι στον τομέα της εθελοντικής τεχνικής τυποποίησης σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 1025/2012. Παρόλο που οι τρεις παραπάνω οργανισμοί δραστηριοποιούνται σε διαφορετικούς τομείς, συνεργάζονται σε αρκετές επιστημονικές και τεχνικές περιοχές, όπως οι τομείς των τηλεπικοινωνιών και της κατασκευής μηχανημάτων. Η έκδοση ενός Ευρωπαϊκού προτύπου (EN) συνεπάγεται την υποχρέωση εφαρμογής του σε εθνικό επίπεδο και την απόσυρση οποιουδήποτε εθνικού προτύπου έρχεται σε αντίθεση με αυτό σε κάθε μία από τις 34 χώρες της

Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επομένως ένα πρότυπο ΕΝ γίνεται αυτόματα με την έκδοση του και Εθνικό πρότυπο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συμμόρφωση με τα πρότυπα των διεθνών οργανισμών είναι προαιρετική και δεν υπάρχει καμία νομική υποχρέωση εφαρμογής τους. Ωστόσο νόμοι και κανονισμοί μπορούν να αναφέρονται στα πρότυπα και επιπλέον να καθιστούν τη συμμόρφωση με αυτά υποχρεωτική.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ASHRAE STANDARD 55-2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, GA 30329, www.ashrae.org.

Atthajariyakul, S., & Leephakpreeda, T. (2004). Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage. *Energy and Buildings*, 36(7), 720-733.

Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (1997). Thermal comfort. PLEA.

Bradshaw, V. (2006). Chapter 1: Human Comfort and Health Requirements. *The building environment: active and passive control systems*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2626-2640.

Kalz, D., & Pfafferott, J. (2014). *Thermal comfort and energy-efficient cooling of nonresidential buildings*. Springer Science & Business Media.

Khan, M. H., & Pao, W. (2015). Thermal comfort analysis of PMV model prediction in air conditioned and naturally ventilated buildings. *Energy Procedia*, 75, 1373-1379.

Li, D. H., Yang, L., & Lam, J. C. (2013). Zero energy buildings and sustainable development implications—A review. *Energy*, 54, 1-10.

Olesen, B. W., & Parsons, K. C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and buildings*, 34(6), 537-548.

Rupp, R. F., Vásquez, N. G., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178-205.

Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2013). Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings. *Energy and buildings*, 60, 410-419.

Standard, I. S. O. (2005). 7730. Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.

Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., & van den Dobbela, A. (2013). A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 201-215.

Wang, D., Jiang, J., Liu, Y., Wang, Y., Xu, Y., & Liu, J. (2017). Student responses to classroom thermal environments in rural primary and secondary schools in winter. *Building and Environment*.

Wolkoff, P. (2013). Indoor air pollutants in office environments: assessment of comfort, health, and performance. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 216(4), 371-394.

Yang, L., Yan, H., & Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications—a review. *Applied Energy*, 115, 164-173.

Yau, Y. H., & Chew, B. T. (2014). A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(1), 23-35.

<http://www.engineeringtoolbox.com>

https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_comfort