

Voor niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten

Uitbreiding van het PMV-model

Voorspellingen met het PMV-model komen goed overeen met hoge kwaliteit veldstudies in geconditioneerde gebouwen in koude, milde en warme klimaten, voor zowel de winter als de zomersituatie. In niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten, kunnen bewoners warmte positiever beoordelen dan volgens de PMV voorspelling. De belangrijkste reden hiervoor is een laag verwachtingspatroon, maar een te hoog geschat metabolisme kan het verschil mede verklaren. Dit artikel beschrijft een uitbreiding van het PMV-model met een verwachtingsfactor voor niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten. Voorspellingen met het uitgebreide PMV-model komen goed overeen met hoge kwaliteit veldstudies in niet-geconditioneerde gebouwen verspreid over drie continenten.

- door prof. P. Ole Fanger en Jørn Toftum**

Het PMV-model is gebaseerd op uitgebreide Amerikaanse en Europese experimenten met meer dan duizend proefpersonen in goed gecontroleerde omgevingen [1]. Uit het onderzoek bleek dat de thermische gewaarwording nauw gerelateerd is aan de thermische belasting van de effectoren van de menselijke temperatuurregeling. Het PMV-model geeft een voorspelling van de thermische gewaarwording als functie van het activiteitsniveau, kleding en de vier klassieke thermische omgevingsparameters: luchttemperatuur, gemiddelde stralingstemperatuur, luchtsnelheid en luchtvochtigheid. Het voordeel van het PMV-model is dat het een flexibel model is op basis van de belangrijkste invloedsvariabelen voor thermische gewaarwording. Het model kwalificeert het absolute en relatieve belang van deze zes factoren en kan daardoor worden gebruikt voor binnenomgevingen, gecreëerd met een

grote verscheidenheid van klimaatinstallaties en ook voor verschillende activiteitsniveaus en verschillend kledinggedrag. Gezien het feit dat het PMV-model al een internationale standaard is sinds de jaren tachtig [2, 3], is het ondertussen in de praktijk gebruikt voor binnen en buitencondities, in een grote verscheidenheid van gebouwen en voertuigen in alle werelddelen. Het PMV-model is ook gevalideerd met Aziatische proefpersonen [4, 5] in klimaatkameronderzoek en in het veld; meest recent in een wereldwijd onderzoek door ASHRAE in geconditioneerde gebouwen in koude, milde en warme klimaten, voor zowel de zomer als de wintersituatie [6, 7, 8, 9]. Kenmerkend voor het ASHRAE veldonderzoek is de vereiste hoge kwaliteit van metingen en procedures. Deze behoren tot de klasse I van de kwaliteitskwalificatie voor veldstudies zoals geïntroduceerd door de Dear [1]. Ander veldonderzoek behoort tot klasse II met min-

der strenge eisen, terwijl het grootste aantal veldonderzoeken slechts aan lage eisen voldoet voor de metingen en de beschrijving van activiteitsniveau en kleding. Deze behoren tot de laagste kwaliteitsklasse III.

Terwijl de PMV de thermische gewaarwording in geconditioneerde gebouwen goed voorspelt, heeft onderzoek in warme klimaten in niet-geconditioneerde gebouwen aangetoond dat het een warmere thermische gewaarwording voorspelt dan wat de bewoners eigenlijk beleven [11,12]. Voor dergelijke niet-geconditioneerde gebouwen is een adaptief thermisch model voorgesteld [13]. Dit model is een regressievergelijking die de neutrale binnentemperatuur relateert aan de maandgemiddelde buitentemperatuur. De enige variabele is dus de maandgemiddelde buitentemperatuur, die alleen voor de hoogste waarden een indirecte invloed kan hebben op de menselijke warmtebalans. Een evidente tekortkoming van het adaptieve model is dat er geen rekening wordt gehouden met kledinggedrag of activiteitsniveau en ook niet met de vier klassieke thermische parameters, waarvan bekend is dat ze belangrijk zijn voor de menselijke warmtebalans en dus voor thermische gewaarwording. Hoewel het adaptieve model vrij goed de thermische gewaarwording voorspelt

* International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark, www.ie.dtu.dk

Vertaling door Jan Hensen van "Extension of the PMV-model to non-airconditioned buildings in warm climates, Energy and Buildings, vol. 34 (2002), pp. 533 - 536" t.b.v. de discussie over het Fanger model in relatie tot adaptieve thermische behaaglijkheid.

in twintigste-eeuwse niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten, is het nog maar de vraag voor toekomstige gebouwen waarin de bewoners wellicht anders gekleed gaan en andere activiteiten uitvoeren, dan in het veldonderzoek waarop het adaptieve model is gebaseerd.

Hoe komt het eigenlijk dat het PMV-model het warmtegevoel in niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten overschat? Men is het er *grosso modo* over eens dat fysiologische acclimatisatie geen rol speelt [11]. Een wel eens gesuggereerde verklaring is, dat te openen ramen in natuurlijk geventileerde gebouwen een sterker gevoel van regelbaarheid bieden dan geconditioneerde gebouwen. Wij geloven niet dat dit in zijn algemeenheid waar is in warme klimaten. Hoewel met een te openen raam de luchttemperatuur en –snelheid in enige mate te regelen zijn, geldt dit alleen voor de mensen nabij het raam [14]. Wat gebeurt er met mensen die ver van het raam werken? En in warme klimaten is het gebruikelijk in natuurlijk geventileerde gebouwen om 's nachts het gebouw af te koelen en om dan in de loop van de ochtend, als het buiten warmer is geworden dan binnen, de ramen te sluiten. Een ander probleem is vaak verkeerslawaai, waardoor in veel gevallen de ramen niet kunnen worden geopend. Wij geloven dat in warme klimaten airconditioning met gepaste thermostatische regeling per vertrek een beter gevoel van regelbaarheid kan geven dan te openen ramen.

UITBREIDING VAN HET PMV-MODEL

Een ander factor waarvan is gesuggereerd dat het een verklaring zou kunnen bieden voor het verschil, is het verwachtingspatroon van de bewoners. Wij denken zelfs dat dit de belangrijkste verklarende factor is waarom het PMV-model de thermische gewaarwording in niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten overschat. Er is hier typisch sprake van mensen die al lang in warme binnen- en buitenomgevingen geleefd hebben, misschien zelfs al generaties lang. Zij geloven wellicht dat het hun "lot" is om in een omgeving te leven die warmer aanvoelt dan neutraal. Als ze de mogelijkheid zou worden geboden, dan zouden ze gemiddeld gezien wellicht geen andere voorkeur hebben, dan mensen die

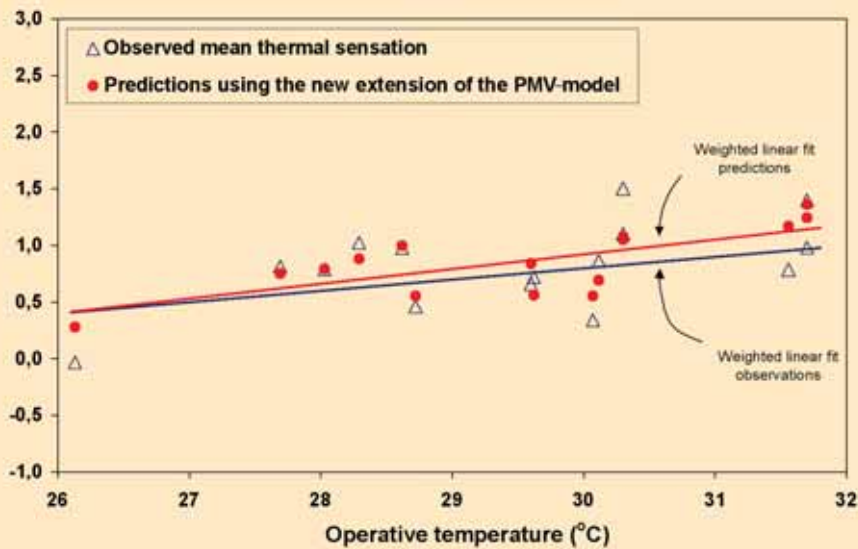
gewend zijn aan geconditioneerde gebouwen. De kans is echter groot dat zij een bepaalde warme omgeving als minder erg en minder bezwaarlijk zullen beoordelen dan mensen die gewend zijn aan airconditioning. Dit kan worden uitgedrukt in een verwachtingsfactor e , waarmee de PMV moet worden vermenigvuldigd om tot de gemiddelde thermische gewaarwording/beoordeling te komen van de bewoners van het betreffende niet-geconditioneerde gebouw in een warm klimaat. De factor e wordt geschat te variëren tussen 1 en 0,5. De factor e is 1 voor geconditioneerde gebouwen. Voor niet-geconditioneerde gebouwen wordt verondersteld dat de verwachtingsfactor afhankelijk is van de duur van het warme weer over het jaar en of dergelijke gebouwen (door de bewoners) kunnen worden vergeleken met veel andere gebouwen in de regio, die wel airconditioning hebben. Als het bijna het gehele jaar door warm weer is en er geen of weinig gebouwen met airconditioning zijn, kan e wel 0,5 zijn, terwijl het 0,7 kan zijn als er veel gebouwen met airconditioning zijn. Voor niet-geconditioneerde gebouwen in regio's waar het alleen 's zomers warm is, kan de verwachtingsfactor 0,7 tot 0,8 zijn als geen of weinig gebouwen airconditioning hebben, terwijl de verwachtingsfactor 0,8 tot 0,9 kan zijn als veel gebouwen airconditioning hebben. In regio's met 's zomers maar korte periodes met warm weer, kan de verwachtingsfactor 0,9 tot 1 zijn. Tabel 1 geeft een eerste grove schatting voor de verwachtingsfactor voor een hoog, matig en laag verwachtingspatroon.

Een tweede factor die mede het geconstateerde verschil kan verklaren tussen berekende PMV en de echte thermische gewaarwording in niet-geconditioneerde gebouwen is het geschatte activiteitsniveau. Bij veel veldstudies in kantoren is het metabolisme geschat op basis van een vragenlijst waarmee het percentage van de tijd is bepaald gedurende welke de betreffende persoon zat, stond of liep. Deze mechanistische benadering houdt geen rekening met het feit dat mensen, als ze het warm hebben, onbewust hun activiteitsniveau verlagen. Zij passen zich aan de warme omgeving aan door hun metabolisme te verlagen. Het lagere tempo in een warme omgeving moet in rekening worden gebracht door een lager metabolisme in de berekening van de PMV. Om deze hypothesen verder te onderzoeken, is data gebruikt uit de database met thermische behaaglijkheid veldonderzoek [10]. Alle beschikbare gegevens van ten minste kwaliteitsklasse II voor niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten zijn gebruikt voor de analyse. Kwaliteitsklasse II betekent dat alle fysische parameters, die nodig zijn voor de berekening van de PMV synchroon, bepaald zijn met de vragenlijsten. De metingen hoeven echter niet te hebben voldaan aan alle eisen in de huidige thermische behaaglijkheid normen. De gegevens voor vier steden (Bangkok, Brisbane, Athene en Singapore) zijn meegenomen; in totaal meer dan 3.200 meetsets [15, 16, 17, 18]. Dezelfde gegevens voor deze vier steden met warme klimaten zijn gebruikt voor het ontwikkelen van het adaptieve model [13].

Verwachting	Type gebouw	Verwachtingsfactor, e
Hoog	Niet-geconditioneerde gebouwen in regio's waar airconditioning gewoon is. De warme periodes zijn kort gedurende de zomer.	0,9 - 1,0
Matig	Niet-geconditioneerde gebouwen in regio's met enkele gebouwen met airconditioning. Warme zomers.	0,7 - 0,9
Laag	Niet-geconditioneerde gebouwen in regio's met weinig gebouwen met airconditioning. Warm gedurende het gehele jaar.	0,5 - 0,7

Verwachtingsfactoren voor niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten

TABEL 1.



Thermische gewaarwording in niet-geconditioneerde gebouwen in vier steden in warme klimaten. Vergelijking van de geobserveerde gemiddelde thermische gewaarwording met voorspellingen van het nieuwe uitgebreide PMV-model voor niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten. De lijnen zijn gebaseerd op lineaire regressie analyse met het aantal responses in ieder gebouw als weegfactor.

-FIGUUR 1-

Stad	Verwachtingsfactor	PMV gecorrigeerd voor correct activiteitsniveau	PMV _e gecorrigeerd voor verwachting	Waargenomen gemiddelde beoordeling
Bangkok	0,6	2,0	1,2	1,3
Singapore	0,7	1,2	0,8	0,7
Athene	0,7	1,0	0,7	0,7
Brisbane	0,9	0,9	0,8	0,8

Niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten. Vergelijking van de geobserveerde thermisch gewaarwording met de voorspelling van het uitgebreide PMV-model.

-TABEL 2-

Verwachtingsfactor, e	PPD (%)	PMV _e	Niet aangepaste PMV	Bovenste temperatuur grens (°C)
1	10	0,5	0,5	27,9
	20	0,85	0,85	28,7
0,7	10	0,5	0,7	28,3
	20	0,85	1,2	29,4
0,5	10	0,5	1	29,0
	20	0,85	1,7	30,5

Voorbeeld van temperatuur bovengrens van het behaaglijkheidsgebied aangepast aan het verwachtingspatroon in niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten. De berekeningen zijn gebaseerd op een metabolisme van 1 met, een kledingweerstand van 0.5 clo, een luchtsnelheid van 0.3 m/s en een relatieve vochtigheid van 70 %.

-TABEL 3-

Voor iedere meetset is het betreffende metabolisme verlaagd met 6,7 % per schaaleenheid PMV boven neutraal; d.w.z. een PMV van 1,5 komt overeen met een verlaging van het metabolis-

me met 10 %. Vervolgens is de PMV opnieuw berekend voor dit verlaagde metabolisme met de thermische behaaglijkheid software van ASHRAE [19]. De zo bepaalde PMV-waarde is vervol-

gens aangepast voor het verwachtingspatroon met een verwachtingsfactor 0,9 voor Brisbane, 0,7 voor Athene en Singapore, en 0,6 voor Bangkok. In Figuur 1 en Tabel 2 wordt, gemiddeld gezien voor ieder gebouw in deze veldstudies, de gemeten thermische gewaarwording vergeleken met de voorspelde waarden volgens het uitgebreide PMV-model voor warme klimaten.

Het nieuwe uitgebreide PMV-model voor niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten voorspelt de gemeten waarden goed. De uitbreiding combineert het beste van het PMV-model met het beste van het adaptieve model. Het erkent het belangrijke verwachtingspatroon waarmee het adaptieve model al rekening hield, terwijl het de klassieke thermische parameters, die direct van invloed zijn op de menselijke warmtebalans uit het oude PMV-model in stand houdt

Opgemerkt dient te worden dat de nieuwe uitbreiding van het PMV een hogere temperatuur bovengrens voorspelt voor een lage verwachtingsfactor. Mensen met een laag verwachtingspatroon zullen een warmer binnenklimaat accepteren; dit komt goed overeen met de waarnemingen waarop het adaptieve model is gebaseerd. Een voorbeeld: de relatie tussen PMV en PPD voorspelt dat 10 % van een grote groep bewoners ontevreden zullen zijn bij een PMV van 0,5. Ervan uitgaande dat deze relatie niet veranderd door een laag verwachtingspatroon, zal een verwachtingsfactor e leiden tot een hogere temperatuur bovengrens, overeenkomend met een PMV van $0,5/e$, maar met niet meer dan 10 % ontevreden. Tabel 3 geeft voor verwachtingspatroon aangepaste temperatuur bovengrenzen voor 10 % en 20 % ontevreden. Een laag verwachtingspatroon kan de temperatuur bovengrens met 2 °C verhogen. Overigens wordt alleen de bovengrens van het behaaglijkheidsgebied beïnvloed; aanpassing van de ondergrens is niet te verwachten.

De database met hoge kwaliteit veldstudies in niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten is nog niet erg uitgebreid. Aanvullende veldstudies in dergelijke gebouwen op verschillende plaatsen ter wereld zouden nuttig zijn om het uitgebreide PMV-model verder te verfijnen en om verwachtingsfactoren te bepalen voor verschillende locaties met een warm klimaat. Derge-

lijke studies met metingen van kwaliteitsklasse II, of liever klasse I, zouden specifiek moeten vragen naar de verwachting, het al dan niet aanvaardbaar zijn en naar eerdere ervaringen van de bewoners. Het zou ook nuttig zijn om de invloed van warme kantooromgevingen op werktempo en metabolisme te bepalen.

STATISCH EN STATIONAIR MODEL

Er wordt wel verwezen naar het PMV-model als zijnde een statisch model, waarmee wordt bedoeld dat het een constante temperatuur zou voorschrijven. Dit is echter niet correct. Het PMV-model kan in werkelijkheid iedere luchttemperatuur tussen 10 °C en 35 °C als neutrale waarde voorspellen, afhankelijk van de andere vijf variabelen in het model. Het schrijft een bepaalde acceptabele spreiding rond de neutrale temperatuur voor, waarbij de spreiding afhankelijk is van het toegestane percentage ontevreden.

Er wordt soms ook beweerd dat het model alleen van toepassing is onder stationaire omstandigheden. Het is correct dat het PMV-model is ontwikkeld voor stationaire omstandigheden. Er is echter aangetoond dat het in goede benadering ook geldig is bij de relatief langzame fluctuaties van de binnenklimaatparameters, die typisch binnen voorkomen. Het mag zelfs in eerste benadering worden toegepast na stapsgewijze verandering van de variabelen. Het PMV-model voorspelt de thermische gewaarwording direct na een opwaartse stapsgewijze verandering goed. Na een neerwaartse stapsgewijze verandering duurt het ongeveer 20 minuten [20].

CONCLUSIES

Het PMV-model komt goed overeen met hoge kwaliteit veldstudies in geconditioneerde gebouwen in koude, matige en warme klimaten, voor zowel de zomer als de winter.

In niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten kunnen de bewoners de warmte als minder negatief beoordelen, dan als voorspelt met de PMV. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een laag verwachtingspatroon, maar een te hoog geschat metabolisme bij warme omstandigheden, draagt ook bij aan de verklaring van het verschil.

Een uitbreiding van het PMV-model met een verwachtingsfactor is voorgesteld voor gebruik bij niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten. Het uitgebreide PMV-model komt goed overeen met beschikbare hoge kwaliteit veldstudies in niet-geconditioneerde gebouwen in warme klimaten over drie continenten.

DANKWOORD

De financiële ondersteuning van dit onderzoek door de Danish Technical Research Council wordt met dank erkend. 

LITERATUUR

1. P.O. Fanger, Thermal comfort. Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark, (1970).
2. CEN ISO 7730, Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Organization for Standardization, Geneva (1994).
3. ASHRAE 55-1992R: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers, Inc.
4. R. de Dear, K.G. Leow, A. Ameen, Thermal comfort in the humid tropics - Part I: Climate chamber experiments on temperature preferences in Singapore, ASHRAE Transactions 97(1) (1991) 874-879.
5. S. Tanabe, K. Kimura, T. Hara, Thermal comfort requirements during the summer season in Japan, ASHRAE Transactions 93(1) (1987) 564-577.
6. K.M. Cena, Field study of occupant comfort and office thermal environments in a hot-arid climate (Eds. Cena, K. and de Dear, R.), Final report ASHRAE 921-RP, ASHRAE Inc., Atlanta (1998).
7. G. Donini, J. Molina, C. Martello, D. Ho Ching Lai, K. Ho Lai, C. Yu Chang, M. La Flamme, V.H. Nguyen, F. Haghihat, Field study of occupant comfort and office thermal environments in a cold climate, Final report ASHRAE 821 RP, ASHRAE Inc., Atlanta (1996).
8. R. de Dear, M. Fountain, S. Popovic, S. Watkins, G. Brager, E. Arens, C. Benton, A field study of occu-

9. G.E. Schiller, E. Arens, F. Bauman, C. Benton, M. Fountain, T. Doherty, A field study of thermal environments and comfort in office buildings, Final report ASHRAE 462 RP, ASHRAE Inc., Atlanta (1988).
10. R. de Dear, A global database of thermal comfort field experiments, ASHRAE Transactions 104(1b) (1998) 1141-1152.
11. G.S. Brager, R. de Dear, Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Buildings 27 (1998) 83-96.
12. M.A. Humphreys, Outdoor temperatures and comfort indoors, Building Research and Practice 6(2) (1978) 92-105.
13. R. de Dear, G.S. Brager, Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions 104(1a) (1998) 145-167.
14. J.F. Nicol, M.R.B. Kessler, Perception of comfort in relation to weather and adaptive opportunities, ASHRAE Transactions 104 (1B) (1998) 1005-1017.
15. J.F. Busch, A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand, Energy and Buildings 18 (1992) 235-249.
16. R. de Dear, A. Auliciems, Validation of the Predicted Mean Vote model of thermal comfort in six Australian field studies, ASHRAE Transactions 91(2) (1985) 452-468.
17. N. Baker, M. Standeven, A Behavioural Approach to Thermal Comfort Assessment in Naturally Ventilated Buildings. Proceedings from CIBSE National Conference (1995) pp. 76-84.
18. R. de Dear, K.G. Leow, S.C. Foo, Thermal comfort in the humid tropics: Field experiments in air-conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore, International Journal of Biometeorology 34 (1991) 259-265.
19. M.E. Fountain, C. Huizenga, A thermal sensation prediction tool for use by the profession, ASHRAE Transactions 103(2) (1997) 130-136.
20. R. de Dear, J.W. Ring, P.O. Fanger, Thermal sensations resulting from sudden ambient temperature changes, Indoor Air 3 (1993) 181-192.