

Optimaal thermisch comfort

Een belangrijke voorwaarde voor het succesvol toepassen van alternatieve, energiezuinige gebouw- en klimaatconcepten is het thermisch comfort van de gebruiker. Echter, eerder onderzoek heeft aangetoond dat door toepassing van energiezuinige installatieconcepten het thermisch comfort van de gebruiker kan verslechteren. Hierdoor kunnen niet-uniforme, zowel in tijd als ruimtelijk, thermische omgevingscondities ontstaan. Promotieonderzoek naar het thermisch comfort onder niet-uniforme condities (zie kader 1) laat zien dat met de huidige normen en richtlijnen het thermisch comfort onder deze condities niet adequaat voorspeld kan worden. Een ander belangrijk aandachtspunt zijn de verschillen in thermische perceptie tussen verschillende subpopulaties (zoals mannen versus vrouwen).

Dr.ir. L. (Lisje) Schellen¹, dr.ir. M.G.L.C. (Marcel) Loomans², prof.dr.ir. M.H. (Martin) de Wit⁴, dr. W.D. (Wouter) van Marken Lichtenbelt³

¹Post-doctoraal onderzoeker aan de Universiteit van Maastricht, vakgroep Humane Biologie, Onderzoeksschool Nutrim en docent aan de Avans Hogeschool, Academie voor Bouw en Infra

²Universitair docent aan de Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Unit Building Physics and Services

³Universitair hoofddocent aan de Universiteit van Maastricht, vakgroep Humane Biologie, Onderzoeksschool Nutrim

⁴Emiritus hoogleraar aan de Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Unit Building Physics and Services

De gebouwde omgeving is verantwoordelijk voor een derde van het totale primaire energiegebruik in Westerse landen. Deze energie wordt voornamelijk gebruikt voor het verwarmen, koelen, ventileren en verlichten van onze gebouwen. Voor een duurzame ont-

wikkeling van de gebouwde omgeving zal niet alleen het energiegebruik verminderd moeten worden maar ook de inzet van hoogwaardige fossiele energiebronnen. Dit laatste kan door de toepassing van laag-exergetische (LowEx) systemen. Een kenmerk van die systemen

is dat het verschil tussen de temperatuur waarmee verwarmd of gekoeld wordt en de gewenste ruimtetemperatuur veel kleiner is dan tot nu toe gebruikelijk. Bij de toepassing van deze systemen in ruimten met een zeer lage energievraag kunnen niet-uniforme en

PROMOTIEONDERZOEK

Dit artikel is een samenvatting van een deel van het promotieonderzoek dat verricht is aan de Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, unit Building Physics and Services in samenwerking met de Universiteit Maastricht, Vakgroep Humane Biologie. De resultaten van dit onderzoek kunnen worden gebruikt bij het ontwerp van nieuwe energiezuinige klimatiseringsconcepten in gebouwen.

De resultaten laten niet alleen zien dat er verschillen bestaan tussen individuele personen, maar ook tussen verschillende persoonsgroepen. Daarom zouden klimaatsystemen van kantoren meer moeten inspelen op het individu. Uiteraard is het wel belangrijk dat de energiekosten in de gaten gehouden worden. De verwachting is dat, vergeleken met een centraal klimaatsysteem, de energiekosten van een slim ontwerp met lokaal te regelen temperaturen zo'n 10 tot 30 procent lager kunnen uitvallen. In het recent gestarte TKI Ucer project wordt het concept van een individueel comfortstelsel nader onderzocht met als doelstelling het praktisch toepasbaar te maken. Daarnaast laten de resultaten zien dat gematigde temperatuurveranderingen tot 2K/h acceptabel zijn als energiebesparende strategie voor kantoorgebouwen.



-Figuur 1- Impressie van proefpersonen in onderzoekruimte

dynamische omgevingscondities ontstaan. Deze condities kunnen leiden tot lokaal en algemeen discomfort. Voor het succesvol toepassen van laag energetische en exergetische gebouwssystemen is de tevredenheid met betrekking tot het thermisch comfort van de gebruikers een belangrijke randvoorwaarde. Meer kennis over de interactie tussen het gebouwstelsel, binnenklimaat en menselijke fysiologie is benodigd voor het ontwerpen van toekomstige energiezuinige en comfortabele binnenklimaatcondities.

COMPLEX FENOMEEN

Thermisch comfort is een complex fenomeen. Het wordt behalve door de omgeving ook door persoonsgebonden factoren bepaald. Het is lastig om alle personen in eenzelfde ruimte tevreden te stellen wanneer er geen individuele regelmogelijkheden aanwezig zijn. Dit wordt veroorzaakt door de grote verschillen tussen individuen, zowel op psychisch als op fysiologisch vlak. In de huidige bouwpraktijk wordt tijdens de ontwerpfase vaak het PMV-model (predicted mean vote) gebruikt voor het voorspellen van het thermisch comfort van de

toekomstige gebruiker. Dit model voorspelt het gemiddelde thermisch comfort aan de hand van de gegeven klimaatrandvoorwaarden en gebruikerkenmerken (activiteitsniveau en kledingsisolatie). Het PMV-model is opgenomen in verschillende nationale en internationale normen ten aanzien van het thermisch comfort van gebruikers. Echter, aan de hand van literatuur blijkt dat het daadwerkelijke thermisch comfort van individuele gebouwgebruikers significant kan afwijken van het gemiddelde thermisch comfort dat vooraf voorspeld werd. Als gevolg hiervan voelen de gebruikers zich oncomfortabel en ontevredener dan vooraf voorspeld werd, hetgeen ook de productiviteit kan beïnvloeden. De verschillen tussen het vooraf voorspelde comfort en het gerealiseerde comfort worden onder meer veroorzaakt door geslacht- en leeftijdseffecten. In het promotieonderzoek werd het thermisch comfort onderzocht onder niet-uniforme condities [1]. Deze niet-uniformiteit is vanuit twee verschillende standpunten onderzocht, aan de hand van: (1) de omgeving (dynamische en niet-uniforme thermische omgevingscondities) en (2) de mens (verschillende subpopula-

ties; mannen vs. vrouwen en jong volwassenen vs. ouderen).

In het eerste gedeelte van het onderzoek zijn de effecten van een dynamisch temperatuurverloop onderzocht en de invloed van leeftijd op de thermische perceptie. In het tweede gedeelte van het onderzoek zijn de invloed van niet-uniforme omgevingscondities bestudeerd en de verschillen in thermisch comfort en fysiologische responsies tussen mannen en vrouwen.

DYNAMISCHE OMGEVINGSCONDITIES

In de laatste jaren is steeds duidelijker geworden dat volledig geklimatiseerde gebouwen, die geregeld worden op een constante binnentemperatuur, niet altijd leiden tot een optimaal thermisch comfort. Eerdere onderzoeken hebben uitgewezen dat gebruikers in gebouwen met een beperkte klimaatregeling (bijvoorbeeld natuurlijk geventileerde gebouwen) zich vaak comfortabeler voelen dan gebruikers in volledig geklimatiseerde gebouwen [2]. Aan de hand van deze onderzoeken werd geconcludeerd dat gebruikers in gebouwen met een beperkte klimaatregeling een grotere temperatuurrange en meer fluctuaties in de temperatuur gedurende de dag accepteren. Vanuit energetisch oogpunt kan het dynamisch regelen van de binnentemperatuur interessant zijn in termen van energiebesparingen op gebouwniveau, doordat de temperatuur niet meer constant geregeld dient te worden [3]. Echter, de huidige normen en richtlijnen staan slechts een kleine variatie in de binnentemperatuur toe, en lijken hierdoor redelijk conservatief te zijn [4, 5]. Een doel van het promotieonderzoek was om te onderzoeken binnen welke temperatuurrange temperatuurfluctuaties in geklimatiseerde gebouwen thermisch acceptabel zijn, en wat de invloed hiervan is op de fysiologische responsies en het thermisch comfort van de gebruikers. Aan de hand van een laboratoriumonderzoek, met behulp van acht jongere mannelijke proefpersonen (22-25 jaar) en acht oudere mannelijke proefpersonen (67-73 jaar), is onderzocht in welke mate een variërend temperatuurverloop een invloed heeft op het thermisch comfort en de productiviteit. Voor een gedetailleerde omschrijving van de onderzoekruimte (figuur 1) en metingen zie Schellen et al. [6]. Iedere proefpersoon werd blootgesteld aan twee condities: (1) een controle conditie waarbij de temperatuur constant op 21,5°C (PMV=0) gehouden werd, en (2) een experimentele conditie waarbij de temperatuur in de ruimte varieerde met ± 2 K/h in een temperatuurbereik van 17-25°C. In figuur 2 is

het gewenste temperatuurverloop gedurende de experimentele conditie weergegeven. De volgorde van de condities werd beurtelings omgewisseld.

De resultaten laten zien dat een temperatuurverloop tot ± 2 K/h in een temperatuurbereik van 17–25°C als acceptabel beoordeeld wordt en niet leidt tot onacceptabele condities ten aanzien van het thermisch comfort. Op subpopulatie niveau blijkt dat de ouderen in het algemeen een thermische sensatie beleven die 0,5 punten (op de 7-punts thermische sensatieschaal van Ashrae) lager ligt (lichtelijk koel versus neutraal bij de jongeren) dan de thermische sensatie van jongeren onder dezelfde thermische omstandigheden. Ten gevolge hiervan geven ouderen de voorkeur aan een hogere omgevingstemperatuur in vergelijking met jong volwassenen. Ondanks dat de thermische condities niet tot onacceptabele situaties leiden, resulteren ze wel in significante fysiologische responsies. Uit literatuur blijkt dat milde koude blootstellingen (20°C bij 0.04 clo) kunnen leiden tot een verhoogde systolische bloeddruk bij ouderen [7]. Daarom is het verstandig om ouderen te beschermen tegen thermische schommelingen, ook al zijn deze gering van aard. In tegenstelling tot ouderen, kunnen jong volwassenen baat hebben bij dynamisch thermische condities.

■ NIET-UNIFORME OMGEVINGSCONDITIES

De Annex 37 studie van de International Energy Agency heeft laten zien dat een optimaal energie-/exergiegebruik niet altijd leidt tot een verbeterd thermisch comfort [8]. Door toepassing van laag-exergetische systemen voor het verwarmen en koelen van gebouwen kunnen niet-uniforme omgevingscondities ontstaan (bijvoorbeeld verticale temperatuurgradiënten), die kunnen leiden tot thermisch discomfort. Echter, niet-uniforme omgevingscondities kunnen, in vergelijking tot een uniforme thermische omgeving, ook resulteren in een verhoogd thermisch comfortniveau [9]. In bepaalde situaties kan een combinatie van lokaal en algemeen discomfort als comfortabel worden beoordeeld; een voorbeeld hiervan is tocht onder warme omgevingscondities. Het laatste is interessant vanuit een energetisch perspectief, wanneer minder energie voor koeling benodigd zou zijn.

Het is van belang om het thermisch comfort onder dergelijke condities op een juiste manier te beoordelen tijdens de ontwerpfase, zodat condities waarvan verwacht wordt dat ze comfortabel zijn niet in de praktijk als oncomfortabel beoordeeld worden. In het algemeen beïnvloeden zowel convectieve stromingen als

■ MANNEN VS VROUWEN

De verschillen die gevonden worden tussen mannen vrouwen kunnen wellicht verklaard worden aan de hand van de morfologische verschillen. In vergelijking tot mannen, beschikken vrouwen over een grotere perifere warmteopslag. Dit resulteert in een grotere lichaamsisolatie bij vasoconstrictie, behalve voor de handen en voeten. Dit laatste verklaart wellicht de gevonden significante correlatie tussen de lokale sensatie van de handen en onderarmen en de bijbehorende lokale huidtemperaturen. Een andere verklaring voor de verschillen kan gevonden worden in de verschillen in hormoonhuishouding. Bij de vrouwen neemt het progesteronniveau tijdens de luteale fase van de menstruatiecyclus toe. Een gevolg hiervan is dat de aanvangstemperatuur voor vasodilatatie en zweten toeneemt, waardoor de extremiteiten kouder blijven. Daarnaast ligt de thermoneutrale zone van vrouwen hoger in vergelijking tot die van de mannen. Hierdoor vinden thermoregulatorische reacties in vrouwen bij een hogere absolute temperatuur plaats.

■ JONGEREN VS OUDEREN

De thermoregulatie van het lichaam kan negatief beïnvloed worden door leeftijd. De thermoregulatorische responsen verminderen wanneer men ouder wordt, hetgeen voornamelijk geldt voor de vasoconstrictie responsen. In het algemeen reageren ouderen trager op (kleine) veranderingen in de thermische balans van het lichaam. Daarnaast zijn ouderen minder goed in staat om met vasomotie (vasoconstrictie en -dilatatie) de thermische balans binnen dezelfde temperatuurrange als de jongeren te handhaven. Als gevolg hiervan is de thermoneutrale zone van ouderen waarschijnlijk smaller in vergelijking tot de thermoneutrale zone van jongeren. Dit kan wellicht de verschillen verklaren die gevonden zijn in fysiologische responsies en thermische perceptie tussen de jongeren en ouderen. Overigens kan de mate van fitness van ouderen de verschillen in thermoregulatie tussen jonge en oude mensen sterk reduceren.



-Figuur 2- Ingesteld dynamisch temperatuurverloop gedurende experimentele conditie

stralingsasymetrieën het thermisch comfort. De gecombineerde effecten hiervan zijn echter nog niet uitgebreid onderzocht. In het promotieonderzoek lag de nadruk op koeling. Koeling wordt gezien als een zeer belangrijk onderdeel ten aanzien van het energiegebruik in zowel woningbouw als utiliteitsbouw [10]. Daarom zijn er verschillende uniforme en niet-uniforme koeltechnieken onderzocht.

Aan de hand van metingen met proefpersonen in een klimaatkamer (figuur 3) werden twee verschillende koelprincipes onderzocht: *passieve* koeling (PC, in termen van verhoogde luchtsnelheden) en *actieve* koeling (AC). Met betrekking tot de *actieve* koeling, werd er een onderscheid gemaakt in koeling door middel

van *convectie* en koeling door middel van *straling*. In de *convectieve* koelingcases werd koude lucht toegevoerd via *mengventilatie* of *verdringingsventilatie*. Met betrekking tot de *straling* cases werden twee stralingsprincipes onderzocht, koeling door middel van het *plafond* of de *vloer*. Daarnaast is *vloerkoeling* in combinatie met *verdringingsventilatie* onderzocht, omdat hier vanuit de praktijk de vraag bestaat of dit thermisch acceptabel is [11]. Samenvattend zijn de volgende zes cases onderzocht:

1. *passieve* koeling d.m.v. *convectie* door *mengventilatie*;
2. *actieve* koeling d.m.v. *convectie* door *mengventilatie*;
3. *actieve* koeling d.m.v. *convectie* door *ver-*

dringingsventilatie;

- 4. actieve koeling d.m.v. straling vanuit het plafond, met mengventilatie;
- 5. actieve koeling d.m.v. straling vanuit de vloer, met mengventilatie;
- 6. actieve koeling d.m.v. straling vanuit de vloer, met verdringingsventilatie.

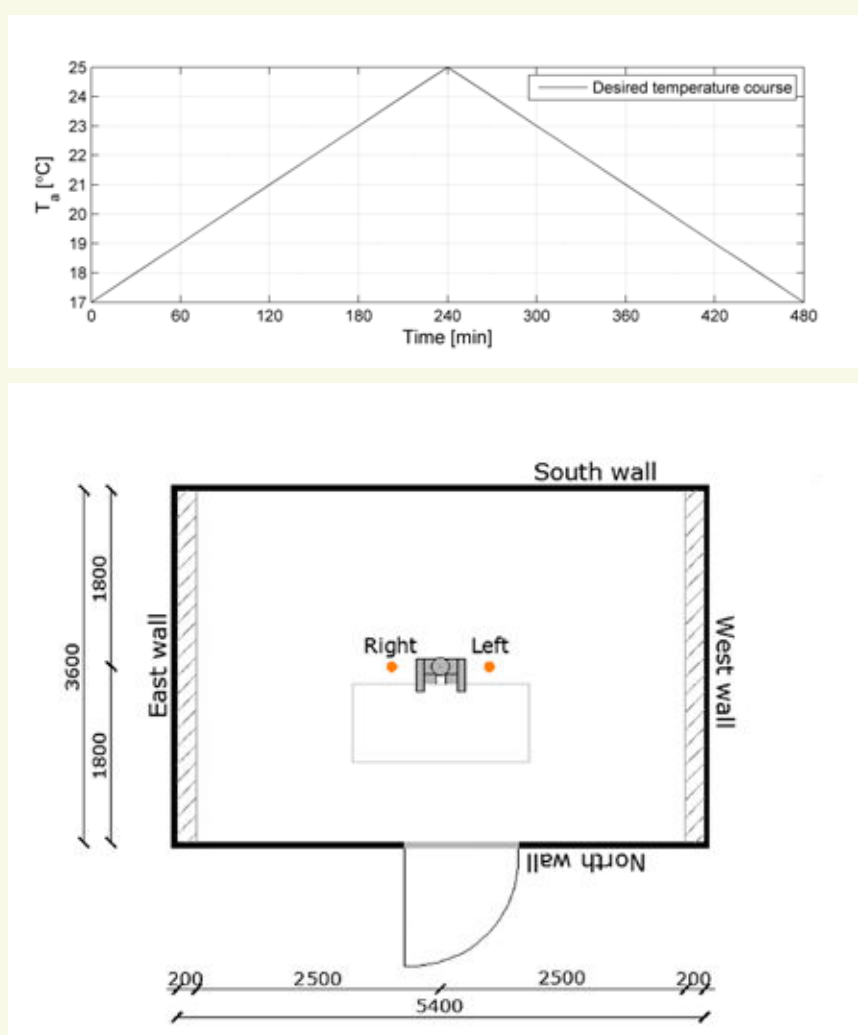
Een grafische weergave van de verschillende cases is gegeven in figuur 4.

Voor een uitgebreide beschrijving van de metingen zie Schellen et al. [12, 13]. De mannelijke proefpersonen hebben deelgenomen aan alle experimentele condities; de vrouwelijke proefpersonen zijn alleen blootgesteld aan case (1) en (4). Alle cases zijn ontworpen op een PMV van ongeveer 0 en de individuele lokale discomfortfactoren lagen binnen de gestelde limieten.

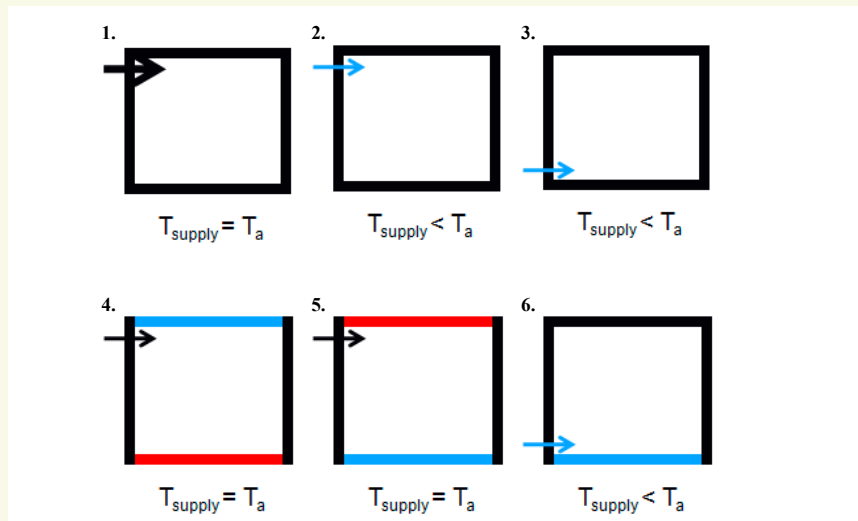
De resultaten laten zien dat onder niet-uniforme omgevingscondities lokale effecten, zoals de lokale huidtemperaturen (figuur 5), een significante invloed hebben op de algehele thermische sensatie en het algehele thermisch comfort. Voornamelijk de huidtemperaturen en de gekoppelde thermische sensaties van de extremiteiten (handen en armen) zijn van belang voor de algehele thermische comfortbeleving. Dit geldt met name voor vrouwen. De operationele temperatuur alleen is daarom niet voldoende voor het voorspellen van de thermische sensatie. Voor het grootste gedeelte van de experimentele cases week de daadwerkelijke thermische sensatie significant af van de vooraf voorspelde PMV. Deze afwijkingen werden met name veroorzaakt door de lokale effecten en de aanwezigheid van gecombineerde lokale discomfortfactoren, ook al waren deze individueel binnen de gestelde limieten (voorspelde aantal ontevredenen < 10%).

De resultaten laten eveneens zien dat de vrouwen zich in het algemeen oncomfortabel en ontevredener voelen in vergelijking tot de mannen onder dezelfde thermische omstandigheden. Wanneer er gekoeld dient te worden, dan dient de omgevingstemperatuur voor vrouwen hoger te zijn om de tevredenheid met de thermische omgeving te verhogen. Daarnaast dient, om algeheel thermisch comfort te bewerkstelligen, de nadruk te liggen op lokale effecten.

Met betrekking tot de verschillende koelprincipes laten de resultaten zien dat relatief sterke niet-uniforme omgevingscondities, zoals case (6), een vergelijkbare of zelfs comfortabelere beoordeling krijgen in vergelijking tot een uniforme omgevingsconditie (zoals case 2). Belangrijk is dat in een situatie waar een combinatie van lokale discomfortfactoren optreedt, het gerealiseerde comfort



-Figuur 3- (a) Een proefpersoon in de klimaatkamer; (b) plattegrond van de klimaatkamer, de oranje punten geven de locatie van de meetpalen aan en de grijs gearceerde rechthoeken representeren de in- en uitlaat (resp. links en rechts)



-Figuur 4- Grafische weergave van de verschillende experimentele cases; (1) passieve koeling d.m.v. convectie door mengventilatie, (2) actieve koeling d.m.v. convectie door mengventilatie, (3) actieve koeling d.m.v. convectie door verdringingsventilatie, (4) actieve koeling d.m.v. straling vanuit het plafond, met mengventilatie, (5) actieve koeling d.m.v. straling vanuit de vloer, met mengventilatie, en (6) actieve koeling d.m.v. straling vanuit de vloer, met verdringingsventilatie

significant kan afwijken van het van te voren voorspelde comfort. Ondanks dat de verschillende lokale discomfortfactoren elk binnen de gestelde limieten liggen, kan dit optreden. Een voorbeeld hiervan is case (4). Dit effect kan vergroot worden wanneer de condities verder afwijken van een neutrale PMV.

De conclusie dat vloerkoeling in combinatie met een verdringingsventilatiesysteem, waarbij temperatuurgradiënten tot 4K/m op kunnen treden, behaaglijker is dan voorheen werd aangenomen vergroot de mogelijkheden voor LowEx-koeling.

CONCLUSIE

In de huidige normen en richtlijnen ten aanzien van het voorspellen en beoordelen van thermisch comfort, wordt geen aandacht besteed aan de verschillen in thermische perceptie op subpopulatie niveau. Echter, aan de hand van de resultaten kan geconcludeerd worden dat, zelfs onder milde condities, er significante verschillen bestaan in de thermische comfortbeleving tussen subpopulaties. (mannen-vrouwen, jongeren-ouderen). In het algemeen hebben ouderen en vrouwen het kouder en voelen ze zich minder comfortabel in vergelijking tot jong volwassen mannen onder dezelfde omstandigheden. Het is van belang om rekening te houden met deze verschillen wanneer het thermisch comfort voorspeld wordt tijdens het ontwerp stadium van een gebouw.

In vergelijking tot een constante omgevings-temperatuur, lijkt een geleidelijk veranderende omgevingstemperatuur (temperature drift) potentie te bieden voor thermisch comfort, gezondheid en energiebesparing. Dit biedt kansen voor LowEx-verwarming en -koelsystemen, omdat deze vaak berusten op lage temperatuurverwarming en hoge temperatuurkoeling. Dit zijn meestal traag reagerende systemen, waarbij de ruimtetemperatuur in de loop van de dag geleidelijk verandert. De resultaten laten zien dat gematigde temperatuurveranderingen tot 2K/h acceptabel zijn als energiebesparende strategie voor kantoorgebouwen.

Daarnaast blijken de bestaande comfortmodellen niet geschikt te zijn voor het voorspellen van thermisch comfort onder niet-uniforme omgevingscondities. Onder niet-uniforme omgevingscondities, zoals die kunnen optreden bij toepassing van LowEx systemen, spelen voornamelijk lokale effecten (lokale huidtemperaturen en sensaties) een belangrijke rol in de algehele thermische comfortbeleving. Onder deze condities is alleen de operationele temperatuur niet voldoende voor het voorspellen van het thermisch comfort. Ook al liggen de individuele discomfortfactoren binnen de comfortlimieten en kan de omge-

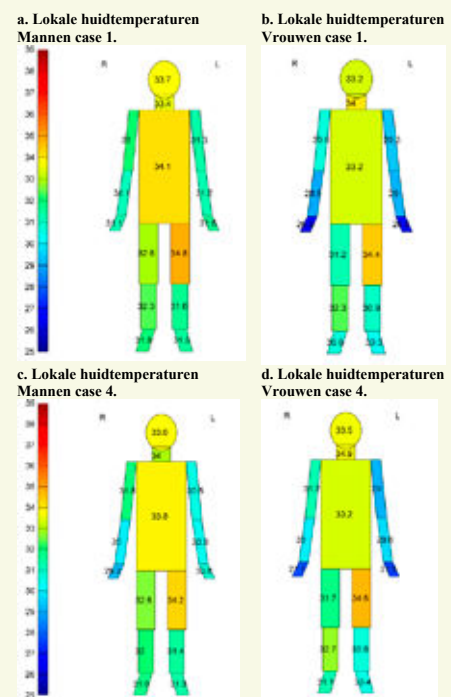
ving als comfortabel beoordeeld worden volgens de richtlijnen, dan kan een combinatie van deze discomfortfactoren toch tot een oncomfortabele situatie leiden. Echter, omgekeerd geldt ook; een niet-uniforme omgeving kan juist ook als comfortabel ervaren worden in vergelijking met een uniforme omgeving. Voor het verbeteren van de thermische comfortvoorspelling kan het zinvol zijn om de fysiologie, die ten grondslag ligt aan de thermische perceptie, mee te nemen. De koppeling tussen de fysiologische responsies en het thermisch comfort is een belangrijk aandachtspunt voor onderzoek.

DANKBETUIGING

Dit onderzoek werd gefinancierd door AgentschapNL (voorheen Senternovem) onder projectnummer EOS LT02003. Daarnaast willen de auteurs graag het personeel van het laboratorium van de Unit Building, Physics and Services aan de Technische Universiteit Eindhoven bedanken voor hun inzet tijdens het ontwerp en realisatie van de klimaatkamer en alle hulp gedurende de metingen. Speciale dank gaat uit naar de proefpersonen die deelgenomen hebben aan de experimenten.

REFERENTIES

- Schellen L. Beyond Uniform Thermal comfort - on the effects of non-uniformity and individual physiology. Eindhoven University of Technology; 2012
- de Dear R, Brager GS. The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *Int J Biometeorol.* 2001;45:100-8
- de Dear RJ, Brager GS. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *Ashrae Transactions.* 1998;104:145-67
- Ashrae. Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2010.
- NEN-EN-ISO 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. 2005. International Standards Organization, 2005
- Schellen L, Lichtenbelt WDV, Loomans MGLC, Toftum J, de Wit MH. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate tem-



-Figuur 5- Gemiddelde lokale huidtemperaturen; (a) Mannen case 1. (b) Vrouwen case 1. (c) Mannen case 4. (d) Vrouwen case 4

perature drift and a steady-state condition. *Indoor Air.* 2010;20:273-83

- Kingma BR, Frijns AJ, Saris WH, van Steenhoven AA, van Marken Lichtenbelt WD. Increased systolic blood pressure after mild cold and rewarming: relation to cold-induced thermogenesis and age. *Acta Physiol (Oxf).* 2011;203:419-27
- Juusela MA. Guidebook to IEA ECBCS Annex 37. Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort. Espoo: VTT Building and Transport; 2003
- Arens E, Zhang H, Huizenga C. Partial- and whole-body thermal sensation and comfort - Part II: Non-uniform environmental conditions. *J Therm Biol.* 2006;31:60-6
- Breesch H, Bossaer A, Janssens A. Passive cooling in a low-energy office building. *Sol Energy.* 2005;79:682-96
- Causone F, Baldin F, Olesen BW, Corngati SP. Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: Possibilities and limitations. *Energy Buildings.* 2010;42:2338-52
- Schellen L, Loomans MGLC, de Wit MH, Olesen BW, van Marken Lichtenbelt WD. The influence of local effects on thermal sensation under non-uniform environmental conditions--gender differences in thermophysiology, thermal comfort and productivity during convective and radiant cooling. *Physiol Behav.* 2012;107:252-61
- Schellen L, Loomans MGLC, de Wit MH, Olesen BW, van Marken Lichtenbelt WD. Effects of different cooling principles on thermal sensation and physiological responses. *Energy Buildings.* 2013; 62:116-25