

İKLİMLENDİRİLEN HACİMLERDE ORTAM IŞINIM SICAKLIĞININ ISIL KONFOR ÜZERİNE ETKİSİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

İbrahim ATMACA
Sezgi KOÇAK

ÖZET

Ortam ışıınım sıcaklığı, ısıı çevreden memnun olunan düşünce hali olarak tanımlanan ısıı konforu etkileyen 4 çevresel 2 kişisel parametre olarak ayrılan 6 temel unsurdan biridir. İklimlendirilen hacimlerdeki sıcak veya soğuk yüzeyler ortam ışıınım sıcaklığının değışimine neden olarak, ortam standartlarda önerilen çevresel parametrelerde olsa bile, hacmi kullananlar için konforsuzluğa sebep olabilmektedir. Bu çalışmada farklı ışıınım sıcaklıklarının ısıı konfor üzerine etkisi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Teorik incelemede vücudu 16 ayrı parçaya ayırarak inceleme yapabilen 2-noktalı Gagge modeli vasıtasıyla oluşturulan simülasyondan yararlanılmıştır. Deneysel çalışmalar ise yoğun güneş ışıınımı alan bir odanın iklimlendirilmesi esnasında yapılmıştır. Oda sıcaklığı, nemi ile ortamdaki hava hızı sabit tutulurken, yüksek ışıınım sıcaklığı nedeniyle ortamda bulunan insanın farklı vücut parçalarında oluşan sıcaklık asimetrisi termal kamera ile tespit edilmiştir. Çalışma, ortam ışıınım sıcaklığının, ortam kuru termometre sıcaklığından farklı olması durumunda konforsuzluk oluşumuna sebebiyet verebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

Anahtar kelimeler: Ortam ışıınım sıcaklığı; ısıı konfor; simülasyon; deneysel analiz

ABSTRACT

Mean radiant temperature is one of the 6 primary parameters (4 environmental and 2 personal) that have an effect on the thermal comfort which is defined as “that condition of the mind in which satisfaction is expressed with the thermal environment”. Hot or cold surfaces inside the conditioned spaces cause mean radiant temperature variations and that results as discomfort over the people in the space even if the conditioned space has the environmental parameters recommended in the standards. In this study, the effect of various mean radiant temperatures on the thermal comfort is investigated both theoretically and experimentally. 2-node Gagge model that separates the human body into 16 different segments is used in the simulation for the theoretical analysis. The experimental analysis is performed during the conditioning of a high solar radiation receiving space. The temperature asymmetry over the different parts of human body as a result of the high radiant temperature is determined by the thermal camera images. During the experimental analysis, the ambient temperature and humidity along with the air velocity inside the room is fixed. The present study is important in terms of showing that the discomfort might appear in case the ambient radiation temperature is different than the room dry bulb temperature.

Keywords: Mean radiant temperature; thermal comfort; simulation; experimental analysis

1. GİRİŞ

Çok çeşitli teknolojiler ve sistemler vasıtasıyla günümüzde yaygın olarak kullanılan iklimlendirme sistemlerinin amacı; bu ortamı kullanan insanlara kabul edilebilir kalitede konforlu ve temiz iç ortam havası hazırlamaktır. İklimlendirme işlemi yapılacak bir hacim için uygun sistemin seçimi, sistemin ekonomikliği ve güvenilirliğinin yanında hacimde çalışan veya ikamet edenler için ısı konforunun sağlanması da konuyla ilgili mühendislerin ilgi alanına girmektedir. Isıl konfor şüphesiz ki iş verimini ve üretkenliği etkileyen önemli etkenlerden biridir. Isıl konfor insan boyutları, yaşı, cinsiyeti gibi birçok parametreye bağlı olsa bile en genel anlamda ısı konforu etkileyen parametreler kişisel ve çevresel parametreler olarak sınıflandırılabilir. Ortam sıcaklığı, ortam bağıl nemi, ortam hava hızı ve ortalama ışınım sıcaklığı çevresel parametreler olarak adlandırılırken, kişisel parametreleri ise kişinin metabolik aktivite düzeyi ve giyinme durumu oluşturmaktadır.

İnsan vücudu, kullandığı besin ve teneffüs edilen oksijen ile düşük sıcaklıklı ısı yayan ve mekanik iş üreten termodinamik bir sistem gibi düşünülebilir. Vücutta üretilen metabolik enerji taşınım ve ışınım ile duyulur ısı olarak ve buharlaşma ile gizli ısı olarak deriden ve solunum ile ciğerlerden bulunan çevreye atılır. Bulunulan ortamın konforlu hissedilmesi için vücutta üretilen enerjinin vücuttan çevreye atılan enerjiye eşit olması gerekmektedir. Vücut, yaşamsal organların fonksiyonlarının zarar görmemesi için, çevresel şartlar ne olursa olsun vücut iç bölme sıcaklığını 36.8 °C de tutmak için kompleks fizyolojik denetim mekanizmalarına sahiptir. Vücut bulunduğu çevre ile ne kadar kolay bir şekilde enerji dengesini kurabiliyorsa, yani fizyolojik denetim mekanizmaları ne kadar az devreye giriyorsa, bulunduğu ortamı o denli konforlu hisseder [1,2]. Yine de belirli bir ortam şartında tüm insanların kendilerini tamamen konforlu hissetmedikleri bilinen bir konudur.

İklimlendirilen hacimlerdeki sıcak veya soğuk yüzeyler ortam ışınım sıcaklığının değişimine neden olarak, ortam standartlarda önerilen çevresel parametrelerde olsa bile, hacmi kullananlar için konforsuzluğa sebep olabilmektedir. Bu çalışmada farklı ışınım sıcaklıklarının ısı konforu üzerine etkisi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Teorik incelemede vücudu 16 ayrı parçaya ayırarak inceleme yapabilen 2-noktalı Gagge modeli vasıtasıyla oluşturulan simülasyondan yararlanılmıştır. Deneysel çalışmalar ise yoğun güneş ışınımı alan bir odanın iklimlendirilmesi esnasında yapılmıştır. Oda sıcaklığı ve nemi ile ortamdaki hava hızı sabit tutulurken, yüksek ışınım sıcaklığı nedeniyle ortamda bulunan insanın farklı vücut parçalarında oluşan sıcaklık asimetrisi termal kamera ile tespit edilmiştir.

2. MODEL VE SİMÜLASYON

Simülasyonda, vücut parçaları arasındaki lokal sıcaklık farkların tespiti için, 2 bölmeli Gagge modeli 16 ayrı vücut parçasına uygulanarak inceleme yapılmıştır [3,4]. Yani 2 bölmeli Gagge modeli 16 ayrı vücut parçasına uygulanarak simülasyon modeli oluşturulmuştur. Model detaylı bir şekilde sunulmuş olsa da daha fazla bilgiye Atmaca [5], Atmaca ve Yiğit [6] ve Atmaca ve ark. [7]' den ulaşılabilir:

$$S_{cr}(i, \theta) = M - W - [C_{res}(i, \theta) + E_{res}(i, \theta)] - Q_{cr,sk}(i, \theta) \quad (1)$$

$$S_{sk}(i, \theta) = Q_{cr,sk}(i, \theta) - [C(i, \theta) + R(i, \theta) + E_{sk}(i, \theta)] \quad (2)$$

Bu denklemlerde i vücut parçasını, θ ise zaman adımını temsil etmektedir. Modelde, vücut parçaları arasında iletimle ve kan akışı ile parçalar arasında taşınım olan ısı transferi vücut parçalarının sıcaklıkları arasındaki fark çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Bu durumda 16 parçalı modelde, eşitlik (1) ve (2) şu şekilde ifade edilebilir:

$$S_{cr}(i, \theta) = [1 - \alpha(\theta)]m(i).c_{p,b} \cdot [dT_{cr}(i, \theta) / d\theta] / A(i) \quad (3)$$

$$S_{sk}(i, \theta) = \alpha(\theta).m(i).c_{p,b} \cdot [dT_{sk}(i, \theta) / d\theta] / A(i) \quad (4)$$

Modelde “*i*” vücut parçası numarasını temsil etmektedir ve temsil ettiği vücut parçası ve bu parçalara ait yüzey alanı ve ağırlık değerleri Tablo 1’ de sunulmaktadır. Her bir vücut parçası için başlangıç deri $T_{sk}(i,0)$ ve kor $T_{cr}(i,0)$ sıcaklıkları bu parçaların nötr değerleri olarak alınmıştır. Vücut parçalarının nötr kor ve deri sıcaklıkları ile ortalama nötr kor ve deri sıcaklığı değerleri yine Tablo 1’ de verilmektedir. Belli bir zaman adımı için kor ve deride depolanan enerjinin tespitinden sonra, o zaman adımının sonunda oluşan yeni sıcaklıklar $dT_{cr}/d\theta$ ve $dT_{sk}/d\theta$ türevlerinin ileri sonlu farklara açılımı ile bulunabilir. Başlangıç değerler bilindiğine göre belli bir θ zaman adımı sonra vücut parçası deri ve kor sıcaklığı şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$T_{cr}(i, \theta + 1) = T_{cr}(i, \theta) + \frac{S_{cr}(i, \theta).A(i).\Delta\theta}{[1 - \alpha(\theta)].m(i).c_{p,b}} \quad (5)$$

$$T_{sk}(i, \theta + 1) = T_{sk}(i, \theta) + \frac{S_{sk}(i, \theta).A(i).\Delta\theta}{\alpha(\theta).m(i).c_{p,b}} \quad (6)$$

Deri yüzeyinden duyulur ısı kaybı giysilerden geçerek, insanın bulunduğu ısı ortama olur. Bu yol seri bir devre olarak düşünülebilir ve deri yüzeyi ile giysi dış yüzeyi arasındaki giysi yalıtımı, giysi dış yüzeyi ile ortam arasındaki dirençten oluşur. Deriden ışınlım ve taşınım ile olan duyulur ısı kaybı her bir vücut parçası için zamana bağlı olarak şu şekilde hesaplanabilir;

$$C(i, \theta) + R(i, \theta) = [T_{sk}(i, \theta) - T_o(i)] / R_r(i) \quad (7)$$

T_a çevre sıcaklığı ve T_r ışınlım sıcaklığı olmak üzere eşdeğer sıcaklık,

$$T_o(i) = (h_r.T_r(i) + h_c.T_a) / (h_r + h_c) \quad (8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Eşitlik (8)’ den görüleceği üzere eşdeğer sıcaklık T_o vücut parçasına göre değişebilmektedir. Çünkü her bir vücut parçasını etkileyen ışınlım sıcaklığı farklıdır ve kişiyi çevreleyen yüzeyler ile vücut parçası arasındaki görüş faktörüne bağlı olarak değişmektedir. Zaten eşitlikten görüleceği üzere ışınlım sıcaklığı T_r vücut parçasına bağlı olarak verilmiştir. ışınlım sıcaklığı, kişiyi çevreleyen yüzeylerin sıcaklıklarına ve bu yüzeylerin kişiye göre konumlarına bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Yapı malzemelerinin birçoğu yüksek yayma katsayısı değerlerine sahip olduğu için, yüzeylerin tümü siyah cisim gibi düşünülebilmektedir. Kişiyi çevreleyen yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı düşük ise ışınlım sıcaklığı şu şekilde tespit edilebilmektedir [1]:

$$T_r = T_1.F_{p-1} + T_2.F_{p-2} + \dots + T_N.F_{p-N} \quad (9)$$

Bu denklemde;

$$T_N = N. \text{ yüzeyin sıcaklığı, } ^\circ\text{C}$$

$$F_{p-N} = N. \text{ yüzey ile kişi arasındaki görüş faktörü}$$

olarak tanımlanmaktadır.

16 parçalı model için her bir vücut parçasını etkileyen ışınlım sıcaklığı ise şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$T_r(i) = \sum_{m=1}^N T(m).F(i, m) \quad (10)$$

Bu denklemde m yüzey numarasını temsil etmektedir. i . vücut parçası ile m . yüzey arasındaki görüş faktörü ise $F(i, m)$ olarak gösterilmektedir. Modelde her bir vücut parçasının ortamda bulunan duvar yüzeyleri ile arasındaki görüş faktörü [16,7] boyutunda 2 boyutlu bir matris ile verilmiştir. Bu matriste kullanılan değerler, yani kişi ile kişiyi çevreleyen yüzeyler arasındaki görüş faktörü $F(i, m)$, Tablo 2.’ de

verilmektedir. Bahsedilen tablodan görülebileceği üzere, her bir vücut parçasının, vücudun geriye kalan tüm kısmıyla olan görüş faktörü de mevcuttur. Bu durumda Eşitlik (10) ile yapılan hesaplamalarda gerekli olan yüzey sıcaklıklarının bir tanesi de vücut deri ortalama sıcaklığıdır. Vücut deri sıcaklığı çok geniş bir aralıkta değişim göstermediği için, hesaplamalarda nötr ortalama deri sıcaklığı değeri olan 33.84 °C değeri kullanılmış, zamana bağlı bir iterasyona gidilmemiştir.

Tablo 1. Simülasyonda Kullanılan Vücut Kısımları ve Bu Kısımlara Ait Değerler [8].

i	Vücut Kısmı	Yüzey Alanı A(i) (m ²)	Ağırlığı m(i) (kg)	Nötr deri sıcaklığı (°C)	Nötr kor sıcaklığı (°C)
1	Sol ayak	0.056	0.480	33.9	35.1
2	Sağ ayak	0.056	0.480	33.9	35.1
3	Sol diz altı	0.112	3.343	33.4	35.6
4	Sağ diz altı	0.112	3.343	33.4	35.6
5	Sol bacak	0.209	7.013	33.8	35.8
6	Sağ bacak	0.209	7.013	33.8	35.8
7	Pelvis	0.221	17.57	33.4	36.3
8	Baş	0.140	4.020	35.6	36.9
9	Sol el	0.050	0.335	35.2	35.4
10	Sağ el	0.050	0.335	35.2	35.4
11	Sol dirsek altı	0.063	1.373	34.6	35.5
12	Sağ dirsek altı	0.063	1.373	34.6	35.5
13	Sol kol	0.096	2.163	33.4	35.8
14	Sağ kol	0.096	2.163	33.4	35.8
15	Göğüs	0.175	12.40	33.6	36.5
16	Sırt	0.161	11.03	33.2	36.5
Tüm vücut		1.87	74	33.84	35.94

Ortalama değerler hesaplanarak tespit edilmiştir.

Tablo 2.' de sunulan görüş faktörleri değerleri Sorensen [9]' den alınmıştır. Bahsedilen çalışmada verilen bu görüş faktörleri nümerik bir metot ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda ihtiyaç duyulan ısıl mankenle ilgili detaylı yüzey alanı bilgisi doğruluğu, 0.5 mm civarında olan lazer tarama metodu ile yapılmıştır. Modelde kullanılan ısıl manken giyimisizdir ve oturma pozisyonundadır. Çalışmada ısıl mankenin, uzunluğu, genişliği ve yüksekliği sırasıyla 2.95 m, 2.95 m ve 2.4 m olan bir odada olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Isıl mankenin burnunun ucu duvarlar arasına 1.25 m yükseklikte merkezlidir. Diğer taraftan ısıl mankenin ayakları yerden 20 mm yüksekte kabul edilmiştir. Sorensen [9] tarafından hesaplanan ve Tablo 2.' de sunulan görüş faktörlerinin nümerik hesabında kullanılan kabuller bu şekildedir.

Tablo 2. Simülasyonda Kullanılan Görüş Faktörleri [$F(i,m)$ (%)].(Vücudun Simetrik Yapısından Dolayı Sadece Vücudun Sol Bölümü Tabloda Gösterilmiştir.) [9].

	Pelvis	Göğüs	Sırt	Baş	Sol Ayak	Sol diz altı	Sol bacak	Sol el	Sol dirsek altı	Sol kol
Zemin	23.7	11.6	14.2	9.58	51.5	36.9	34.7	31.3	17.6	12.3
Tavan	8.20	14.3	12.9	20.5	6.01	4.42	10.3	3.54	6.79	11.9
Ö.D.	11.0	30.9	0.93	12.9	11.2	18.0	10.8	8.78	13.8	14.1
A.D.	24.5	0.87	41.2	15.4	4.65	6.75	4.19	9.81	13.0	17.4
So.D.	10.1	11.9	9.95	16.3	13.3	15.2	15.4	16.4	19.8	23.2
S.D.	9.95	12.6	9.37	16.2	6.89	8.04	5.10	2.34	3.08	1.82
Vücut	12.6	17.9	11.5	9.16	6.45	10.7	19.6	27.8	25.8	19.4

Ö.D.: Ön Duvar, A.D.:Arka Duvar, So.D.: Sol Duvar, S.D.: Sağ Duvar

Deriden buharlaşma ile olan ısı kaybı E_{sk} , deri yüzeyi ile ısıl ortam arasındaki su buharı basıncı farkına ve deri ıslaklığına bağlıdır. İfade her bir bağımsız vücut parçası için, zamana bağlı olarak

$$E_{sk}(i, \theta) = w(i, \theta) \cdot [p_{sk,s}(i, \theta) - p_a] / R_{e,t}(i) \quad (11)$$

şeklinde yazılabilir.

Eşitlik (11)' den görüleceği üzere, buharlaşma ile olan ısı transferinin tespiti için ilk önce deri ıslaklığı w bulunmalıdır. Deri ıslaklığı, aynı bir verim ifadesi gibi, gerçek buharlaşma ile ısı transferinin (E_{sk}), aynı koşullar altında tamamen ıslak ($w=1$) deriden gerçekleşebilecek maksimum buharlaşma ile ısı transferine (E_{max}) oranı olarak tanımlanmaktadır ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$w = \frac{E_{sk}}{E_{max}} \quad (12)$$

Buharlaşma ile olan ısı kaybı (E_{sk}) iki şekilde gerçekleşir. Bunlar, vücuttan salgılanan terin buharlaşması (E_{rsw}) ve suyun deriden doğal difüzyonu (E_{dif}) olarak isimlendirilmektedir ve buharlaşma ile olan ısı transferi (E_{sk}) bu iki mekanizmanın toplamı ile;

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif} \quad (13)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Salgılanan terin buharlaşması ile meydana gelen ısı transferi (E_{rsw}):

$$E_{rsw} = m_{rsw} \cdot h_{fg} \quad (14)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada h_{fg} suyun buharlaşma gizli ısı (30 °C sıcaklıkta 2430 kJ/kg dır), m_{rsw} ise birim zamanda üretilen ter olarak tanımlanmaktadır. İfadeden görüleceği üzere, bu ısı transferi miktarı salgılanan ter miktarına bağlıdır. Birim zamanda salgılanan ter ile ilgili ifade ileriki bölümlerde sunulacaktır. Vücuttaki terin buharlaşması ile olan buharlaşma ısı kaybının vücuttan olan maksimum buharlaşma ile ısı kaybına ($w=1$ için olan buharlaşma ısı kaybı) oranı (w_{rsw}) ise;

$$w_{rsw} = \frac{E_{rsw}}{E_{max}} \quad (15)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Eğer vücutta terleme yok ise deri ıslaklığı difüzyona bağlı olarak 0.06 kadardır [1]. Aktif ter salgısı mevcut ise difüzyona bağlı ıslaklık değeri olan 0.06, sadece vücudun terli olmayan bölümüne uygulanır. Bu durumda difüzyona bağlı olarak gerçekleşen buharlaşma ısı kaybı;

$$E_{dif} = [1 - w_{rsw}] \cdot 0.06 \cdot E_{max} \quad (16)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Bu denklemler vasıtasıyla deri ıslaklığı (w) şu şekilde ifade edilebilir:

$$w = w_{rsw} + w_{dif} = w_{rsw} + 0.06(1 - w_{rsw}) = 0.06 + 0.94 \frac{E_{rsw}}{E_{max}} \quad (17)$$

Bu eşitlik 16 parçalı model için zamana bağlı olarak simülasyonda şu şekilde ifade edilmiştir:

$$w(i, \theta) = 0.06 + 0.94 \frac{E_{rsw}(i, \theta)}{E_{max}(i, \theta)} \quad (18)$$

Eşitlik (18)' e dikkat edilirse, terin buharlaşması ile gerçekleşen ısı kaybı (E_{rsw}), vücut parçasından bağımsız, sadece zamana bağlı olarak ifade edilmiştir. Çünkü bu kayıp birim zamanda salgılanan ter miktarına bağlıdır ve nasıl hesaplanacağı ileride sunulacaktır. Birim zamanda üretilen ter miktarının birimi [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] dir. Yani üretilen ter bütün vücuda üniform dağılımlıdır. Bu miktara bağlı olan E_{rsw} değerinin birimi de [W/m^2] dir. Yani, terin buharlaşması ile gerçekleşen ısı kaybı da vücut üzerinde üniform dağılımlıdır. Birim zamanda üretilen ter miktarı sıcaklık denetim sinyallerine bağlıdır ve bu sinyallerde tüm vücut için tanımlanmıştır. Bu nedenle salgılanan ter miktarı ve buna bağlı terleme ile olan buharlaşma kaybı vücut parçasından bağımsız olarak belirli bir zaman adımı için vücut ortalama kor ve deri sıcaklığı için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar ilerleyen kısımlarda detaylı olarak açıklanacaktır.

Deri ıslaklığı tespit edildikten sonra, deriden olan buharlaşma ile ısı transferi,

$$E_{sk}(i, \theta) = w(i, \theta).E_{\max}(i, \theta) \quad (19)$$

bağıntısından hesaplanabilmektedir.

Solunum ile vücuttan bulunduğu çevreye duyulur ve gizli olarak ısı transferi meydana gelir. Çünkü hava bulunulan ortam sıcaklığı ve neminde teneffüs edilir ve tekrar bulunulan ortama, hemen hemen vücut kor sıcaklığına çok yakın bir sıcaklıkta ve doymuş olarak geri verilir. Hem sıcaklık farkından dolayı duyulur, hem de buharlaşma ile gizli olarak meydana gelen toplam solunum ile gerçekleşen ısı transferi [1];

$$C_{res}(i, \theta) + E_{res}(i, \theta) = [0.0014.M.(34 - T_a) + 0.0173.M.(5.87 - p_a)] / A_D \quad (20)$$

şeklinde hesaplanabilir.

İnsan vücudu, bulunduğu ortam ile ısı dengeyi fizyolojik denetim mekanizmalarının minimum seviyede devreye girmesi ile sağlıyorsa vücut fizyolojik ısı nötr halindedir. Fizyolojik ısı eylemsizlik halinde insan vücudu bulunduğu ortamı sıcak veya soğuk hissetmediği bir denge sıcaklığındadır ve bu durumda fizyolojik denetim mekanizmaları devreye girmez. İnsan soğuk bir ortamda bulunursa deriden ortama olan ısı kaybı artar ve ısı eylemsizlik hali kaybolur. Bu durumda vücut, damarların kısılması (vazokonstriksiyon) ile deriye olan kan akışını azaltarak, deriyi ve deriye yakın dokuları soğuturken iç dokuların sıcaklığını korumuş olur. İnsan sıcak bir ortamda bulunursa ortama istenildiği düzeyde ısı transferi olmaz ve yine ısı eylemsizlik hali kaybolur. Bu durumda vücut, damarların genişlemesi (vazodilasyon) ile deriye olan kan akışını arttırarak, deri sıcaklığını kor sıcaklığına yaklaştırmış olur. ısı eylemsizlik halinin olduğu nötr vücut sıcaklıkları daha önce her bir vücut parçası için ve alan ağırlıklı ortalama olarak tüm vücut için Tablo 1' de sunulmuştu. Vücut sıcaklığının nötr değerden sapması ile deriden ve kor tabakasından gelen sıcaklık denetim sinyalleri ile vazomotor, terleme, titreme gibi sıcaklık denetim mekanizmalarının harekete geçme ve yönetilme şekillerini açıklayan bağıntılar laboratuvarlarda yapılan deneyler sonucu elde edilmiştir. Sıcaklık denetim mekanizmalarını beş sinyal başlatmaktadır [1]. Bu sinyaller,

$$WSIG_{cr}(\theta) = \begin{cases} 0 & T_{cr,m}(\theta) \leq T_{cr,n} \\ T_{cr,m}(\theta) - T_{cr,n} & T_{cr,m}(\theta) > T_{cr,n} \end{cases} \quad (21)$$

$$CSIG_{cr}(\theta) = \begin{cases} T_{cr,n} - T_{cr,m}(\theta) & T_{cr,m}(\theta) < T_{cr,n} \\ 0 & T_{cr,m}(\theta) \geq T_{cr,n} \end{cases} \quad (22)$$

$$WSIG_{sk}(\theta) = \begin{cases} 0 & T_{sk,m}(\theta) \leq T_{sk,n} \\ T_{sk,m}(\theta) - T_{sk,n} & T_{sk,m}(\theta) > T_{sk,n} \end{cases} \quad (23)$$

$$CSIG_{sk}(\theta) = \begin{cases} T_{sk,n} - T_{sk,m}(\theta) & T_{sk,m}(\theta) < T_{sk,n} \\ 0 & T_{sk,m}(\theta) \geq T_{sk,n} \end{cases} \quad (24)$$

$$WSIG_b(\theta) = \begin{cases} 0 & T_{b,m}(\theta) \leq T_{b,n} \\ T_{b,m}(\theta) - T_{b,n} & T_{b,m}(\theta) > T_{b,n} \end{cases} \quad (25)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada $WSIG_{cr}$ kordan gelen ılık sinyal, $CSIG_{cr}$ kordan gelen soğuk sinyal, $WSIG_{sk}$ deriden gelen ılık sinyal, $CSIG_{sk}$ deriden gelen soğuk sinyal ve $WSIG_b$ vücuttan gelen ılık sinyal şeklindedir ve bu sinyaller sadece pozitif değerler alırlar.

Deri ve kor sıcaklığının ağırlıklı ortalaması olarak vücut ortalama sıcaklığı zamana bağlı olarak,

$$T_{b,m}(\theta) = \alpha(\theta)T_{sk,m}(\theta) + [1 - \alpha(\theta)]T_{cr,m}(\theta) \quad (26)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir.

Vazomotor denetim mekanizması kor ve deri bölgesinden gelen sıcaklık sinyalleri ile meydana gelir. Kan akışı, kor ve deri bölgesi sıcaklıklarının nötr değerlerinden sapmalarından etkilenir ve kor ile deri tabakası arasındaki kan akış debisi şu şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{m}_{bl}(\theta) = [(6.3 + 200.WSIG_{cr}(\theta)) / (1 + 0.5.CSIG_{sk}(\theta))] / 3600 \quad (27)$$

Gagge modelinde, kor bölgesinden deri bölgesine vücut dokularından olan iletim ve kan akışı ile olan taşınım ile ısı geçişi, her bir vücut parçası için zamana bağlı olarak;

$$Q_{cr,sk}(i, \theta) = [K + c_{p,bl} \cdot \dot{m}_{bl}(\theta)] \cdot [T_{cr}(i, \theta) - T_{sk}(i, \theta)] \quad (28)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Bu bağıntıda,

$$\begin{aligned} K &= \text{kor ile deri arasındaki etkin iletim katsayısı (5.28 W/m}^2\text{K)} \\ c_{p,bl} &= \text{kanın özgül ısısı (4187 J/kg.K)} \end{aligned}$$

olarak ifade edilmektedir [1]. Vücut kütlelerinin deri bölgesinde bulunan oranı α , kan akış debisi \dot{m}_{bl} ' den etkilenir ve zamana bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\alpha(\theta) = 0.0418 + 0.475 / \left[3600 \dot{m}_{bl}(\theta) + 0.585 \right] \quad (29)$$

Terleme ile oluşan buharlaşma ısı kaybının hesaplanmasında birim zamanda üretilen ter miktarı önemlidir ve zamana bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{m}_{rsw}(\theta) = 4.7 \times 10^{-5} \cdot WSIG_b(\theta) \cdot \exp[WSIG_{sk}(\theta) / 10.7] \quad (30)$$

Üretilen ter miktarının hesaplanmasından sonra deri ıslaklığının tespitinde önemli olan terin buharlaşması ile meydana gelen ısı kaybı 16 parçalı modelde zamana bağlı olarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$E_{rsw}(\theta) = \dot{m}_{rsw}(\theta) \cdot h_{fg} \quad (31)$$

Çok soğuk ortamlarda vücudun ısı dengesini korumak için vazokonstriksiyona göre daha etkili olan titreme yolu ile metabolik enerji, dinlenme durumuna göre üç kat kadar yükselebilir. Titreme ile metabolik enerji üretimi,

$$M_{shiv}(\theta) = 19.4[CSIG_{sk}(\theta).CSIG_{cr}(\theta)] \quad (32)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Toplam metabolik enerji M , vücudun olağan hareketi ile üretilen M_{act} ile titreme enerjisi M_{shiv} ' in toplamına eşittir.

$$M(\theta) = M_{act} + M_{shiv}(\theta) \quad (33)$$

Vücudun olağan hareketi ile üretilen ısı miktarları çok çeşitli aktiviteler için kaynaklarda mevcuttur [1,10,11].

16 parçalı modelde her bir vücut parçası bağımsız olarak ele alındığı için, duyulur ısı kaybının tespitinde, bu parçaların her birini etkileyen toplam ısı direncin hesaplanması gereklidir. Her bir vücut parçasını etkileyen toplam ısı direnç, giysi tabakasını oluşturan kumaşların iletim dirençleri (R_f), giysi tabakaları arasında kalan durgun havanın iletim ve ışınım direnci (R_{al}) ve dış ortam hava tabakası taşınım ve ışınım direncinden (R_a) oluşur. Toplam ısı direnç;

$$R_t(i) = R_a(i) \cdot \frac{r(i,0)}{r(i,nl)} + \sum_{j=1}^{nl} \left[R_{al}(i,j) \cdot \frac{r(i,0)}{r(i,j-1)} + R_f(i,j) \cdot \frac{r(i,0)}{r(i,j)} \right] \quad (34)$$

şeklinde her bir vücut parçası için zamandan bağımsız olarak hesaplanabilmektedir [12]. Bu ifadede,

- i = direnç hesabı yapılacak olan vücut parçası
- j = giysi tabakası
- nl = vücut parçasını kaplayan giysi tabakası sayısı
- r = yarıçap

olarak verilmiştir. Giysi takımlarını oluşturan kumaşların ısı ve buharlaşma dirençleri McCullough ve ark. [12] tarafından tablo halinde verilmiştir. Geliştirilen model ile oluşturulan simülasyonda kumaşların ısı ve buharlaşma dirençleri [44,2] boyutunda bir matris olarak mevcuttur.

Vücut parçalarından olan buharlaşma ile ısı kaybının bulunması için ise giysi toplam buharlaşma direncinin hesaplanması gereklidir. Aynı ısı dirençte olduğu gibi toplam buharlaşma direnci de 3 farklı direnci içermektedir. Bunlar giysi takımını oluşturan kumaşların buharlaşma direnci ($R_{e,t}$), giysi katmanları arasında kalan durgun havanın buharlaşma direnci ($R_{e,al}$) ve dış ortam hava tabakası buharlaşma direnci ($R_{e,a}$) olarak sıralanabilir. Her bir vücut parçası için toplam buharlaşma direnci;

$$R_{e,t}(i) = R_{e,a}(i) \cdot \frac{r(i,0)}{r(i,nl)} + \sum_{j=1}^{nl} \left[R_{e,al}(i,j) \cdot \frac{r(i,0)}{r(i,j-1)} + R_{e,f}(i,j) \cdot \frac{r(i,0)}{r(i,j)} \right] \quad (35)$$

şeklinde ısı dirence benzer olarak zamandan bağımsız hesaplanabilmektedir [12].

Isıl konfor veya konforsuzluğun tespiti için ise PMV indeksi kullanılmıştır. PMV geniş bir insan grubunun ısı ortama verdiği tepkiyi ortalama olarak tahmin edebilen 7 noktalı ölçeğe dayalı bir ısı duyum indisidir. Bu ölçek şu şekildedir: 0 Nötr, ±1 biraz ılık / biraz serin, ±2 ılık / serin, ±3 sıcak / soğuk. PMV indeksinin hesap metodu ISO 7730 [11]' de sunulmaktadır. Hesaplamalarda geçici rejim enerji dengesi metodu (ya da Gagge model) kullanıldığı için zamana bağlı değişimler de göz önünde bulundurulmuş, ISO 7730 [11]' e göre, 1 saat için zaman ağırlıklı ortalama PMV değeri dikkate alınmıştır. İlk olarak, her bir vücut parçası için ısı yük (L) belirlenmiş ve daha sonra vücut üzerindeki toplam yük hesaplanmıştır:

$$L(i) = M - W - [C(i) + R(i) + E_{sk}(i) + C_{res}(i) + E_{res}(i)] \quad (36)$$

$$L_{total} = \sum_{i=1}^{16} L(i) \quad (37)$$

Daha sonra, zamana bağlı PMV indeksi bulunmuş ve 1 saatlik periyot için zaman ağırlıklı ortalama PMV değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [7]:

$$PMV(\theta) = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] L_{total} \quad (38)$$

$$PMV_{total} = \sum_{\theta=1}^{3600} PMV(\theta) \quad (39)$$

$$PMV = PMV_{total} / 3600 \quad (40)$$

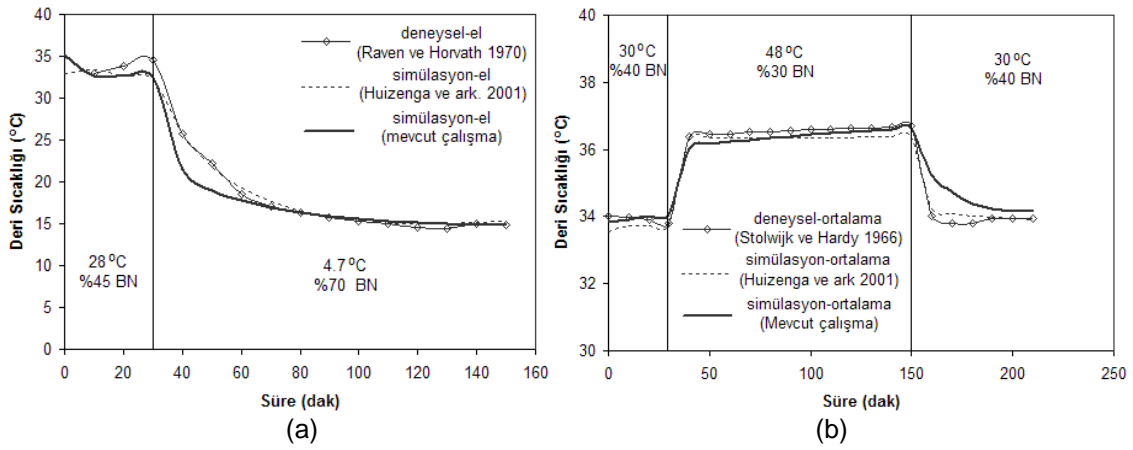
Detaylı olarak açıklanan 16 parçalı 2 bölmeli Gagge modeli vasıtasıyla geliştirilen simülasyon ile insanın bulunduğu ısı ortama verdiği tepkiler tayin edilmeye çalışılmıştır. Yazılım Compaq Visual Fortran 6 programı kullanılarak yapılmıştır.

3. KONFOR MODELİNİN GEÇERLİLİĞİ

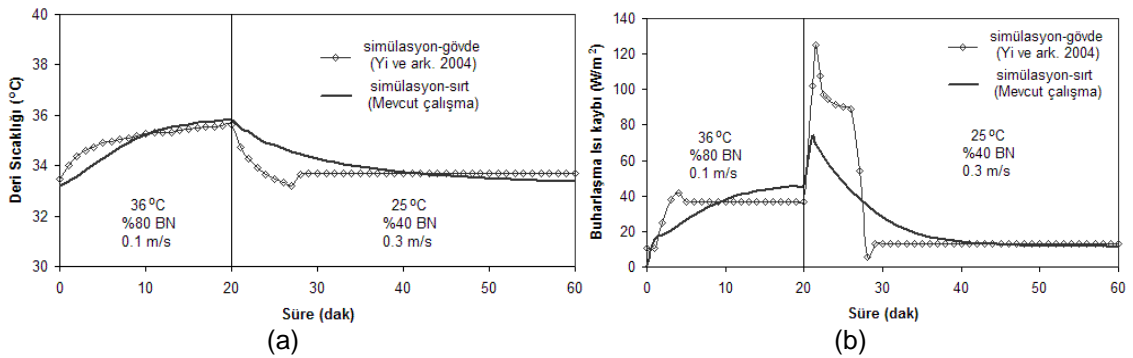
16 parçalı 2 bölmeli Gagge modelinden elde edilen sonuçların güvenilirliğini göstermek için, modelden elde edilen sonuçlar literatürde mevcut deneysel veriler ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Raven ve Horvath [13], yaptıkları çalışmada, insanların soğuk etkiye verdikleri cevabı deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada 11 gönüllü erkek denek kullanılmıştır. Denekler 28 ± 1 °C sıcaklık, $\%45 \pm \%2$ nem seviyesindeki odadan 5 ± 1 °C sıcaklıktaki, $\%70 \pm \%2$ nem durumunda bulunan odaya geçirilmiş, çeşitli vücut parçalarının deri ve kor sıcaklıkları ölçülmüştür. Denekler deneyler esnasında sadece şort giymiş ve naylon bir yatak üzerinde sırt üstü yatmış pozisyonda bulunmuşlardır. Solwijk ve Hardy [14] tarafından da ortam sıcaklık artışı için deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada da 3 denek kullanılmış ve deneklerin 20 °C sıcaklık $\%40$ bağıl nem durumunda bir ortamdan, 48 °C sıcaklık $\%30$ bağıl nemde bulunan başka bir ortama geçişi durumunda vücudun vermiş olduğu tepkiler tayin edilmiştir. Denekler deney esnasında sadece şort giymişlerdir. Sıcaklık artışı durumu için 10 ayrı vücut parçasının ortalaması olarak, ortalama deri sıcaklığının zamanla değişimi bahsedilen çalışmada sunulmaktadır. Huizenga ve ark. [15], Stolwijk ısı denge modeline dayalı Berkeley konfor modelini oluşturmuş ve çeşitli ortam şartları için tahminler elde etmiştir. Bahsedilen bu 3 çalışma sonucu ile mevcut modelden elde edilen sonuçlar Şekil 1-a ve Şekil 1-b' de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her 2 şekilden de görülebileceği üzere mevcut çalışma kapsamında oluşturulan modelden elde edilen sonuçlar ile diğer çalışma sonuçları arasında bazı zaman adımlarında farklılıklar mevcuttur. Karşılaştırma yapılan çalışmalarda, incelenen durum için, metabolik aktivite düzeyi ve giysi yalıtım değerleri tam olarak ifade edilmemiştir. Yine de çalışmalarda kullanılan insan giysi takımının farklı olduğunu burada vurgulamak gerekmektedir. Raven ve Horvath [13] tarafından yapılan deneylerde insan sadece şort giymiş halde hamak üzerinde dinlenirken sonuçlar alınmıştır. Fakat bu giysi takımının özellikleri verilmemiş ve ayrıca aktivite düzeyi için de sayısal değerler çalışmada sunulmamıştır. Hâlbuki bizim simülasyonumuzda insan yazlık erkek giyim olarak tanımlanan hafif pantolon, gömlek ve iç çamaşırı giymiş varsayılmaktadır. Bulunan farklılıklar farklı giyim sebebi ile olabilir. Çıplak olan el parçası için sonuçlar daha uyumlu çıkmaktadır. Grafiklerden görülebileceği üzere özellikle rejim halinde sonuçlar oldukça uyumludur.

Vücut sırt parçası için, mevcut simülasyon sonuçları Yi ve ark. [16] tarafından verilen simülasyon sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Yi ve ark. [16] ısı ortamının 36 °C sıcaklık $\%80$ bağıl nem, 0.1 m/s hava hızı ile 25 °C sıcaklık, $\%40$ bağıl nem, 0.3 m/s hava hızı arasında değişimi sürecinde vücut gövde bölgesi deri sıcaklığı ve vücut gövde bölgesinden olan buharlaşma ısı kayıplarının değişimini ele almıştır. Yi ve ark. [16], çalışmada vücudu 6 parça üzerinden incelemiş ve sırt ile göğüs bölümünü gövde olarak isimlendirmiştir. Bahsedilen çalışmada verilen sonuçlar mevcut çalışmada elde edilen

sırt deri sıcaklığı ile Şekil 2-a' da ve sırt bölgesinden olan buharlaşma kayıpları ile Şekil 2-b' de karşılaştırılmış, her iki çalışma sonucunun birbirine oldukça yakın olduğu gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalarda uyum görülmeyen kısım, hem sırt deri sıcaklığı hem de sırttan olan buharlaşma ısı kaybı için 20 ile 30 dakika aralığıdır. Karşılaştırma yapılan Yi ve ark. [16]' de giysi takımının ısı ve buharlaşma dirençleri verilmemektedir. Bahsedilen aralıktaki uyumsuzluğun muhtemel nedeni kullanılan giysi takımı ısı ve buharlaşma dirençleri arasındaki farklılıklardır. Mevcut grafiklerden görülebileceği üzere, 20 ile 30 dakika aralığında, Yi ve ark. [16] tarafından oluşturulan simülasyon sonuçları, sırt deri sıcaklığı için daha hızlı bir düşüş, sırt bölgesinden olan buharlaşma ısı kaybı için ise daha hızlı bir yükseliş göstermektedir. Bu durum, Yi ve ark. [16] tarafından kullanılan giysi takımı buharlaşma direncinin daha düşük olduğu sonucunu doğurmaktadır. Çünkü 36 °C ortam sıcaklığı %80 bağıl nem seviyesinde bulunan 20 dakikalık bir periyot sonrasında vücut ıslaklığı oldukça yükselmekte, aniden 25 °C ortam sıcaklığı, %40 bağıl nem ortamına girilince de bu terin buharlaşması ile sırt bölgesi deri sıcaklığı, artan buharlaşma kaybı ile aniden düşmektedir. Grafiklerden görüleceği gibi, Yi ve ark. [16] tarafından elde edilen sonuçlarda 20 ile 30 dakika aralığında sırt bölgesinden olan buharlaşma kaybındaki artış ve dolayısıyla deri sıcaklığındaki düşüş daha yüksek olmaktadır ki bunun da muhtemel sebebi giysi buharlaşma direncinin mevcut çalışmada kullanılan giysi buharlaşma direncine göre düşük olmasıdır.



Şekil 1. 16 Parçalı Gagge Modeli İle Elde Edilen Sonuçların Benzer Çalışmalar İle Karşılaştırılması: (a) El İçin Deri Sıcaklığı, (b) Ortalama Deri Sıcaklığı.



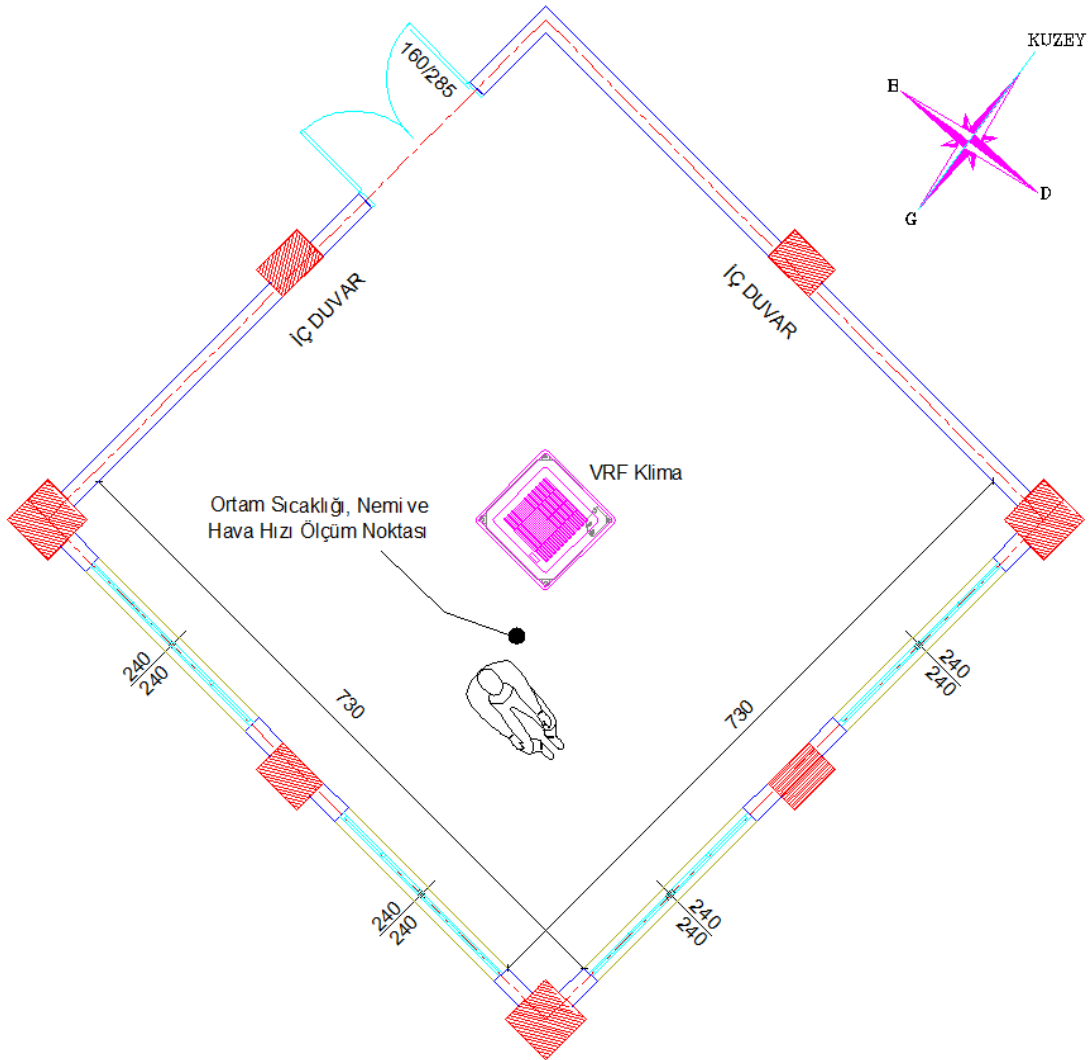
Şekil 2. 16 Parçalı Gagge Modeli İle Elde Edilen Sonuçların Benzer Çalışmalar İle Karşılaştırılması: (a) Sırt İçin Deri Sıcaklığı, (b) Sırttan Olan Buharlaşma Isı Kaybı.

Literatürde mevcut deneysel veriler ve simülasyon sonuçları ile yapılan karşılaştırmalar, mevcut modelin insanın ısı ortama verdiği tepkileri tahmin etmede güvenilir olduğunu açıkça göstermektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar Şekil 3.' de verilen yaklaşık 55 m² alana sahip şartlandırma odasında, ışınım sıcaklığının farklı vücut parçalarında oluşturduğu etkinin gözlenmesi amacıyla yapılmıştır. Şartlandırma odasında 2 adet iç duvar ile 2 adet geniş yüzey alanlarına haiz pencerelerin bulunduğu dış duvar bulunmaktadır. Her bir pencerenin yüzey alanı yaklaşık 5.8 m² dir. Deneyler öğlene yakın saatlerde gerçekleştirilmiş, böylece özellikle güney duvar ve pencereler ile ortam ışınım sıcaklığının yüksek olması hedeflenmiştir. Şartlandırma odasında iç ortam şartları VRF klima sistemi ile sabitlenmiş, deneklerin ortama verdikleri ısıl tepkiler tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneklerin odadaki konumu, ışınım sıcaklığından etkilenecek şekilde pencerelere yakın seçilirken, direkt güneş ışınımına maruz kalmamalarına dikkat edilmiştir.

Denekler sıcaklık, nem ve hava hızı kontrolü sağlanan şartlandırma odasında 20 dakika bekletilerek vücutlarının ısıl dengeye gelmesi sağlanmış ve termal kamera ile vücut sıcaklıkları tespit edilerek, ışınım asimetrisinin vücut parçası sıcaklıkları üzerine etkisi gözlemlenmiştir. Deneyler sırasında ortam sıcaklığı, nemi, hava hızı ile ortam ışınım sıcaklığı Şekil 4.' de verilen ısıl konfor ölçüm seti ile sürekli ölçülerek kaydedilmiştir. Ölçümler Şekil 3.' de gösterildiği gibi deneye yakın bir noktadan sürekli olarak alınmıştır.



Şekil 3. Şartlandırma Odası, İnsanın Konumu ve Ölçüm Noktalarının Şematik Görünümü.



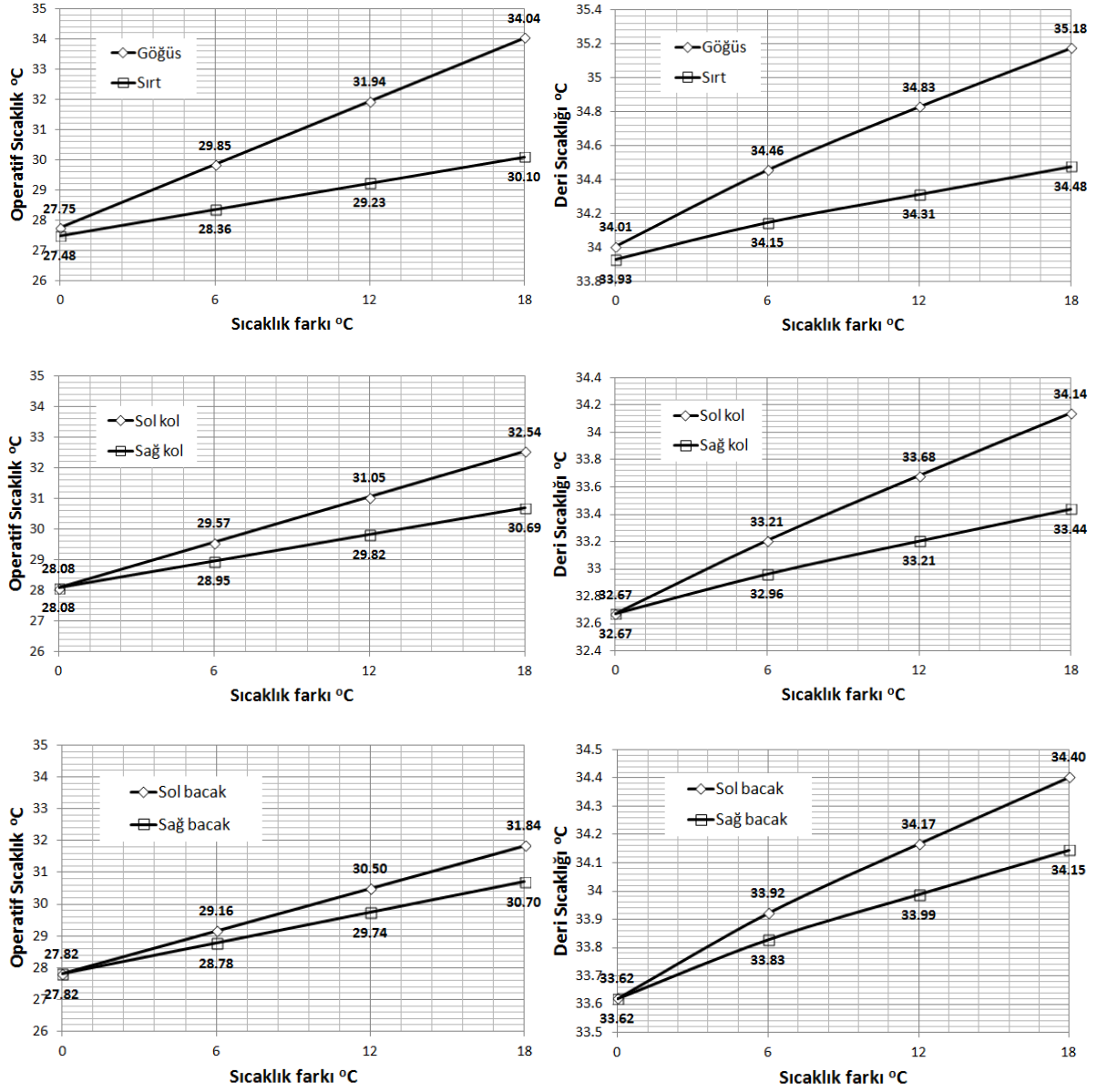
Şekil 4. Isıl Konfor Ölçüm Seti.

5. SİMÜLASYON BULGULARI

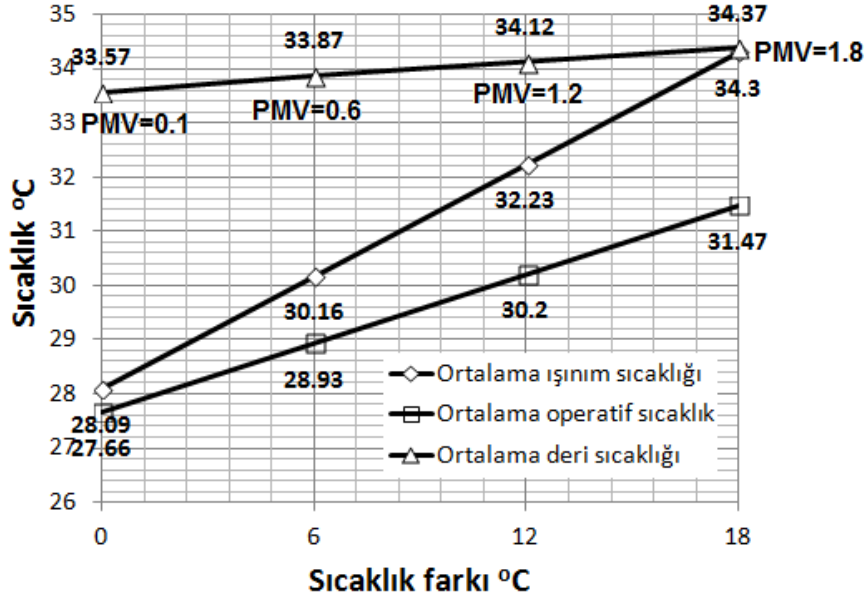
Bu bölümde, yüksek ışınım sıcaklığı sebebiyle vücut parçaları arasında oluşan lokal farklılıklar simülasyon ile incelenmiştir. Simülasyonda hesaplamalar hafif yazlık giyim (0.57 clo) halindeki insan için yapılmıştır. Metabolik aktivite seviyesi 60 W/m^2 alınırken, iç ortam hava hızının 0.2 m/s de sabit olduğu kabul edilmiştir. İç ortam bağıl nemi ise %50 olarak sabitlenmiştir. İç ortam hava sıcaklığı ISO 7730 da PMV için nötr değer veren $27 \text{ }^\circ\text{C}$ de sabit olarak kabul edilmiştir. Işınım sıcaklığının etkisini incelemek için tavan ile insanın solundaki ve önündeki duvarların iç ortam sıcaklığından $6, 12$ ve $18 \text{ }^\circ\text{C}$ daha yüksek olduğu varsayılmıştır. Böylece modelde açıklandığı üzere farklı vücut parçalarını etkileyen ışınım sıcaklıkları ve dolayısıyla operatif sıcaklıklar değiştirilerek, söz konusu koşulların vücut parçaları sıcaklıklarına etkisi simülasyon ile elde edilmiştir. İç ortam ile iç yüzeyler arasındaki sıcaklık farkının, operatif sıcaklık ve deri sıcaklığı üzerine etkisi değişik vücut parçalarına bağlı olarak Şekil 5.' de sunulmuştur. Sıcaklık farkındaki artış ile vücut parçalarını etkileyen operatif sıcaklığın yükseldiği grafiklerden açıkça görülmektedir. Yüksek sıcaklığa sahip ön ve sol duvara yakın vücut parçalarının ışınım sıcaklığından daha çok etkilendiği ve bu parçaların sıcaklıklarının daha yüksek değerler aldığı da grafiklerden açıkça görülebilmektedir. Göğüs parçası sırta göre, sol kol sağ kola göre ve sol bacak sağ bacağa göre daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmektedir. Bu durumun özellikle sıcak yüzeylere yakın vücut parçalarında lokal konforsuzluğa yol açabileceği açıktır.

Şekil 6.' da ise iç yüzeyler ile iç ortam sıcaklık farkının ortalama ışınım sıcaklığı, ortalama operatif sıcaklık ve ortalama deri sıcaklığı üzerine etkisi verilmiştir. Aynı grafikte farklı sıcaklık durumlarının PMV indeksi üzerine etkisi de sunulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere artan sıcaklık farkı ile ışınım sıcaklığı ve operatif sıcaklığın artışına bağlı olarak ortalama deri sıcaklığı artmakta ve ısı hissiyatı PMV de nötr değerden sapmaktadır. Yani iç ortam sıcaklığı standartlarca tavsiye edilen $27 \text{ }^\circ\text{C}$ de olsa bile, ortamdaki sıcak yüzeyler nedeniyle artan operatif sıcaklık PMV indeksinin artmasına yani ortamın sıcak hissedilmesine sebebiyet verebilmektedir. Sonuç olarak, ortamdaki yüksek sıcaklıklı

yüzeyler vücut parçaları üzerinde lokal konforsuzluğa yol açabileceği gibi ortamın beklenenden daha sıcak hissedilmesine de sebebiyet verebileceklerdir.



Şekil 5. İç Ortam İle İç Yüzeyler Arasındaki Sıcaklık Farkının Değişik Vücut Bölümleri İçin Operatif Sıcaklık ve Deri Sıcaklığı Üzerine Etkisi.



Şekil 6. İç Ortam İle İç Yüzeyler Arasındaki Sıcaklık Farkının Ortalama Işınım, Ortalama Operatif ve Ortalama Deri Sıcaklıkları İle PMV İndeksi Üzerine Etkisi.

6. DENEYSEL BULGULAR

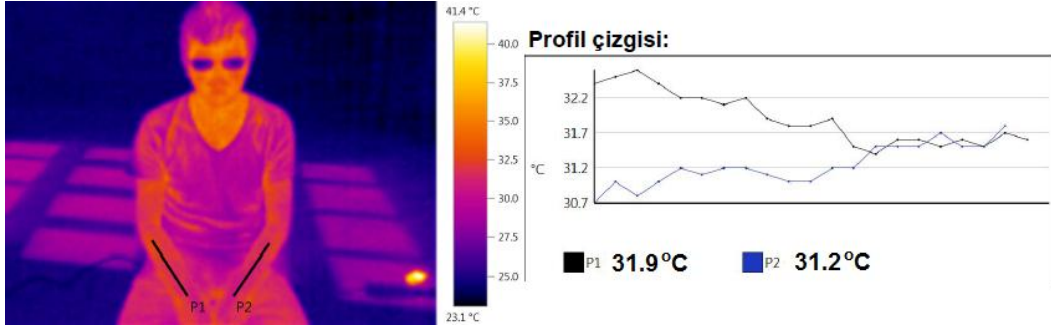
Bu kısımda 5 farklı denek ile yapılan deneylerden elde edilen bulgular tartışılmıştır. Deneyler, yaşları 25 ile 35 arası değişen erkek denekler ile gerçekleştirilmiştir. Denekler klasik hafif yazlık giyim (0.57 clo) ile şartlandırma odasına alınmış ve bir tabure üzerinde 20 dakika süresince sakin oturma konumunda bulunmuşlardır. Deneyler sırasında ortam sıcaklığı 23.5 °C ile 24.5 °C arasında, bağıl nem %45 ile %50 arasında, hava hızı ise 0.08 m/s ile 0.22 m/s arasında değişimler göstermiştir. Ölçülen ortam ışınlama sıcaklıkları ise 34 °C ile 35 °C arasında değişmiştir. 5 farklı deney sırasında şartlandırma odasının ortalama iç ortam şartları Tablo 3.' de özetlenmiştir.

Tablo 3. Deneyler İçin Şartlandırma Odasının İç Ortam Şartları.

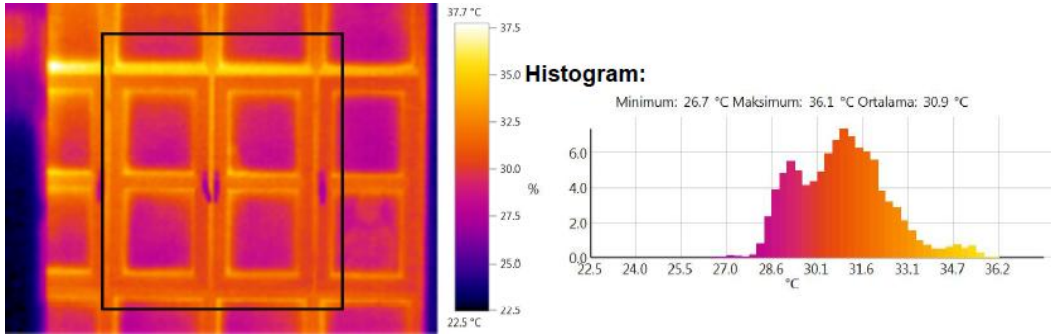
	Denek 1	Denek 2	Denek 3	Denek 4	Denek 5
İç ortam sıcaklığı (°C)	24.1	23.5	23.6	24.0	23.8
Işınım Sıcaklığı (°C)	34.3	34.4	34.5	34.4	34.5
Bağıl nem (%)	47.2	47.9	48.5	47.8	47.4
Hava hızı (m/s)	0.15	0.17	0.16	0.18	0.10

Şekil 7.' de denek 1 üzerinden termal kamera ile alınan sıcaklık ölçümü verilmiştir. Karşılaştırmanın kolaylığı açısından çıplak vücut parçası olan sol ve sağ kol üzerindeki sıcaklıklar belirlenmiştir. Şekilden de görüleceği gibi simetrik vücut parçasında lokal sıcaklık farkları meydana gelmiştir. Bu durumun nedeni ortamdaki farklı yüzeylerin sıcaklıkları incelendiğinde kolaylıkla açıklanabilmektedir.

Şekil 8.' de denek 1 için alınan ölçümler sırasında deneğin sağ tarafında bulunan güney pencerenin termal kamera kaydı görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi yüzeyin bazı noktaları 36.1 °C sıcaklıklara kadar yükselebilmektedir. Bu yüzeyin ortalama sıcaklığı ise 30.9 °C dir. Deneğin sağ tarafında bulunan bu yüksek sıcaklıklardaki yüzey deneğin sağ kol sıcaklığının diğer kola göre yüksek olmasına yani lokal farklılıklara sebebiyet vermektedir. Deneğin sol tarafındaki duvar ise hem bir iç duvar olması hem de deneğin konumuna uzak kalması sebebiyle sol kol sıcaklığı üzerine etken değildir.

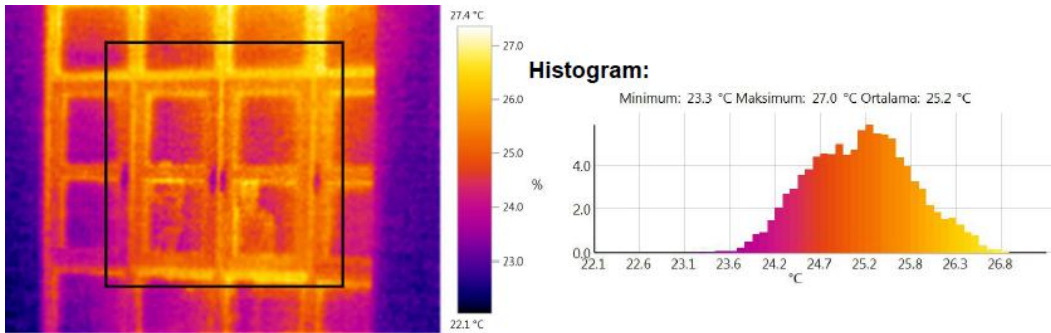


Şekil 7. Denek 1 İçin Termal Kamera Görüntüsü



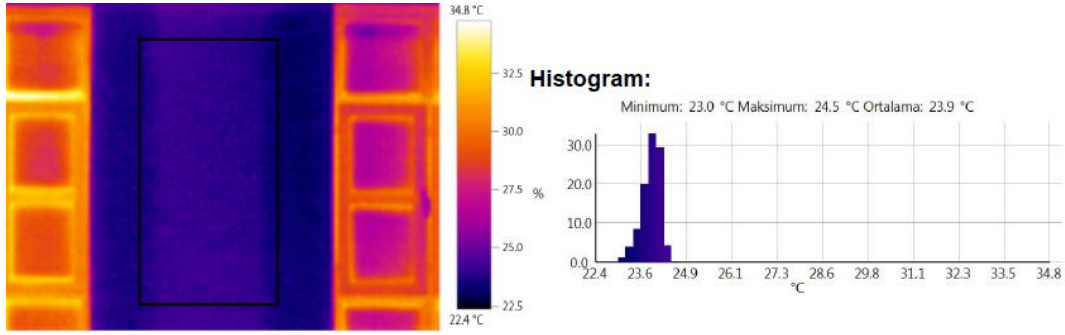
Şekil 8. Denek 1 İçin Alınan Ölçümler Sırasında Deneğin Sağ Tarafında Bulunan Güney Pencerenin Termal Kamera Kaydı.

Denek 1 ölçümleri sırasında iç ortam ışıma sıcaklığının 34.3°C olduğu Tablo 3.' den görülmektedir. Bu yüksek ışıma sıcaklığının en önemli sebebi güney duvardaki pencereler iken diğer sebebi de deneğin önünde bulunan doğu duvardaki pencerelerin ortam sıcaklığına göre yüksek olan sıcaklıklarıdır. Doğru duvarda deneğin hemen önünde bulunan pencerenin termal kamera kaydı ise Şekil 9.' da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere iç ortam sıcaklığı yaklaşık 24.1°C iken bu pencerede bazı noktaların sıcaklığı 27°C değerine kadar yükselmiştir.



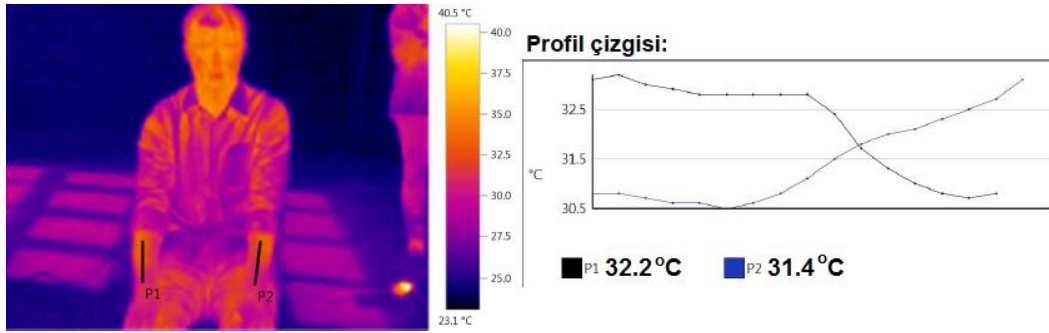
Şekil 9. Denek 1 İçin Alınan Ölçümler Sırasında Deneğin Ön Tarafında Bulunan Doğru Pencerenin Termal Kamera Kaydı.

Şartlandırma odasındaki gerek dış gerekse iç duvarların sıcaklıkları ise iç ortam sıcaklığı ile hemen hemen aynıdır. Örnek olarak güney taraftaki duvarın termal kamera kaydı Şekil 10.' da sunulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere duvar sıcaklığı 23°C ile 24.5°C arasında değişirken ortalama sıcaklığı 23.9°C dir. Yani ortamdaki yüksek ışıma sıcaklığının sebebi pencerelerdeki yüksek sıcaklıklar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu da söz konusu yüzeylere yakın vücut parçalarında yüksek deri sıcaklığına sebebiyet verebilmektedir.

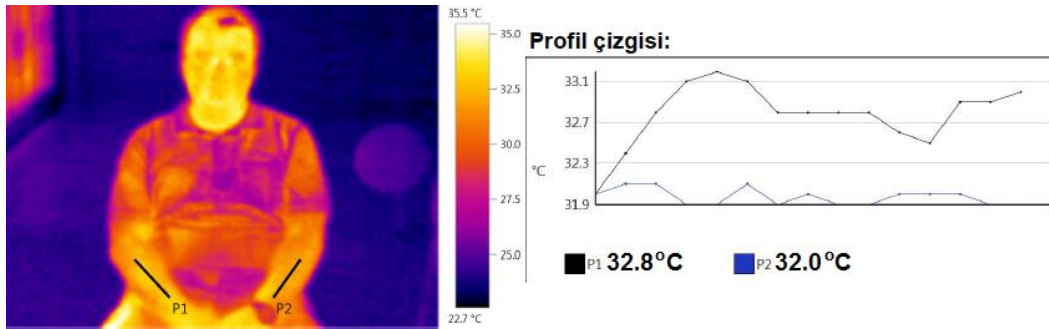


Şekil 10. Denek 1 için Alınan Ölçümler Sırasında Deneğin Sağ Tarafında Bulunan Güney Duvarın Termal Kamera Kaydı.

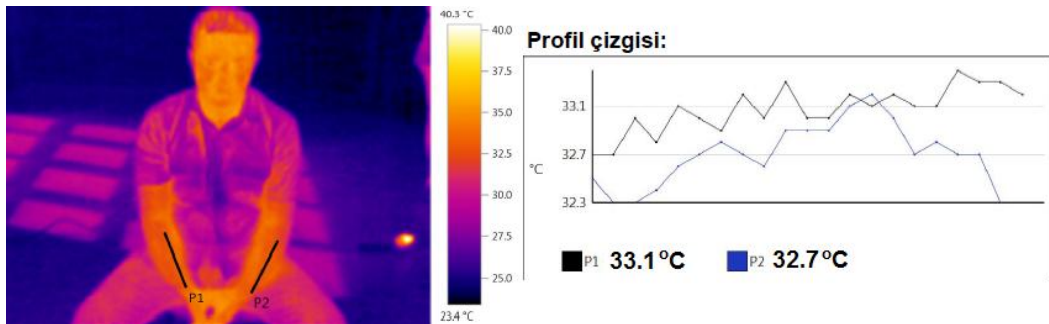
Diğer denekler ile yapılan deneylerde de benzer analizler yapılmış ve deneklerin yüzey sıcaklıklarına ait termal kamera kayıtları Şekil 11, 12, 13 ve 14.' de verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere deneklerin sağ kollarına ait deri sıcaklıkları denek 1 de olduğu gibi simetrik kola göre daha yüksektir.



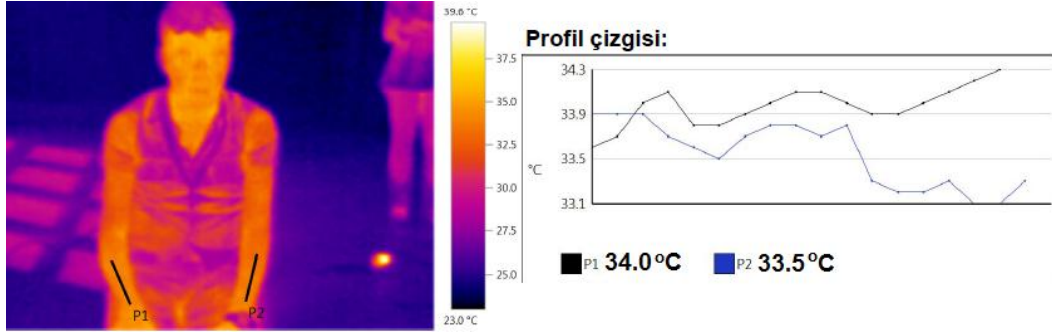
Şekil 11. Denek 2 için Termal Kamera Görüntüsü



Şekil 12. Denek 3 için Termal Kamera Görüntüsü



Şekil 13. Denek 4 için Termal Kamera Görüntüsü



Şekil 14. Denek 5 İçin Termal Kamera Görüntüsü

SONUÇ

Bu çalışmada, insan ile ısı çevresi arasındaki ısı etkileşim 2 noktalı Gagge modelinin bütün vücuttan ziyade 16 farklı vücut parçasına uygulanması ile simüle edilmiştir. Böylece ortam ışınım sıcaklığının farklı vücut parçaları üzerine etkisi belirlenmiştir. Simülasyon ile ışınım sıcaklığının farklı vücut parçaları üzerinde lokal sıcaklık farkına yol açtığı açıkça ortaya konulmuştur. Benzer sonuçlar deneysel olarak da elde edilmiş, termal kamera görüntüleri ile lokal sıcaklık farklılıkları gösterilmiştir. Çalışma, ortam ışınım sıcaklığının, ortam kuru termometre sıcaklığından farklı olması durumunda konforsuzluk oluşumuna sebebiyet verebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

SEMBOLLER

a	:Katsayı (m^2kPa/W)
A_D	:DuBois yüzey alanı (m^2)
b	:Katsayı (mm)
C	:Taşınım ile olan ısı transferi (W/m^2)
$C_{p,b}$:Vücudün özgül ısısı ($kJ/kg.K$)
$C_{p,bl}$:Kanın özgül ısısı ($kJ/kg.K$)
C_{res}	:Solunum ile olan taşınım ile ısı transferi (W/m^2)
$CSIG_{cr}$:Kordan gelen soğuk sinyal (boyutsuz)
$CSIG_{sk}$:Deriden gelen soğuk sinyal (boyutsuz)
E_{dif}	:Difüzyon ile olan buharlaşma ısı kaybı (W/m^2)
E_{max}	:Maksimum buharlaşma ile ısı transferi (W/m^2)
E_{res}	:Solunumla olan buharlaşma ile ısı geçişi (W/m^2)
E_{rsw}	:Terleme ile olan buharlaşma ısı kaybı (W/m^2)
E_{sk}	:Deriden toplam buharlaşma ısı kaybı (W/m^2)
F	:Görüş faktörü (boyutsuz)
h_c	:Taşınım ile ısı geçiş katsayısı (W/m^2K)
h_{ig}	:Suyun buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)
h_r	:Işınım ile ısı geçiş katsayısı (W/m^2K)
i	:Vücut parçası numarası (boyutsuz)
j	:Giysi katmanı numarası (boyutsuz)
k	:Giysi tabakaları arasındaki havanın ısı iletim katsayısı ($mm.W/m^2K$)
K	:İç vücut ile deri arasındaki etkin iletim sayısı (W/m^2K)
LR	:Lewis oranı ($^{\circ}C/kPa$)
M	:Toplam metabolik ısı üretimi (W/m^2)
m	:Vücut kütlesi (kg)
M_{act}	:Aktiviteye bağlı metabolik ısı üretimi (W/m^2)

m_{bl}	:Kan akışı debisi ($kg/m^2.s$)
m_{rsw}	:Birim zamanda üretilen ter miktarı ($kg/m^2.s$)
M_{shiv}	:Titreme ile oluşan metabolik ısı üretimi (W/m^2)
nl	:Toplam giysi tabakaları sayısı (boyutsuz)
P_a	:Ortam havasının su buharı basıncı (kPa)
PMV	: Isıl duyum indisi (boyutsuz)
$P_{sk,m}$:Ortalama deri sıcaklığındaki su buharı basıncı (kPa)
$P_{sk,s}$:Derideki su buharı basıncı (kPa)
$Q_{cr,sk}$:Kordan deriye olan toplam ısı transferi (W/m^2)
Q_{duy}	:Vücuttan olan toplam duyulur ısı transferi (W)
Q_{gizli}	:Vücuttan olan toplam gizli ısı transferi (W)
Q_{res}	:Solunum ile olan toplam ısı kaybı (W/m^2)
Q_{sk}	:Deriden olan toplam ısı kaybı (W/m^2)
R	:Işınım ile olan ısı transferi (W/m^2)
r	:Yarıçap (m)
R_a	:Dış hava tabakası ısı direnci ($m^{20}C/W$)
R_{al}	:Giysi tabakalarının arasındaki havanın ısı direnci ($m^{20}C/W$)
R_{cl}	:Giysi takımının ısı direnci ($m^{20}C/W$)
$R_{e,a}$:Dış hava tabakası buharlaşma direnci (m^2kPa/W)
$R_{e,al}$:Giysi tabakalarının arasındaki havanın buharlaşma direnci (m^2kPa/W)
$R_{e,cl}$:Giysi takımının buharlaşma direnci (m^2kPa/W)
$R_{e,f}$:Kumaşın buharlaşma direnci (m^2kPa/W)
$R_{e,t}$:Toplam buharlaşma direnci (m^2kPa/W)
R_f	:Kumaşın ısı direnci ($m^{20}C/W$)
R_t	:Toplam ısı direnci ($m^{20}C/W$)
S_{cr}	:Korda depolanan ısı enerjisi (W/m^2)
S_{sk}	:Deride depolanan ısı enerjisi (W/m^2)
t	:Giysi katmanları arasındaki hava tabakası kalınlığı (mm)
T_a	:Ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{b,m}$:Vücut ortalama sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{b,n}$:Vücut ortalama nötr sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{cr}	:Kor tabakası sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{cr,m}$:Ortalama kor tabakası sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{cr,n}$:Nötr kor tabakası sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_o	:Operatif sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_r	:Işınım sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{sk}	:Deri tabakasının sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{sk,m}$:Vücut ortalama deri tabakası sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{sk,n}$:Nötr deri tabakası sıcaklığı ($^{\circ}C$)
V	:Hava hızı (m/s)
w	:Deri ıslaklığı (boyutsuz)
W	:Yapılan iş (W/m^2)
w_{dif}	:Difüzyon kaynaklı deri ıslaklığı (boyutsuz)
w_m	:Vücut ortalama deri ıslaklığı (boyutsuz)
w_{rsw}	:Terin buharlaşması için gerekli olan deri ıslaklığı (boyutsuz)
$WSIG_b$:Vücuttan gelen ılık sinyal (boyutsuz)
$WSIG_{cr}$:Kordan gelen ılık sinyal (boyutsuz)
$WSIG_{sk}$:Deriden gelen ılık sinyal (boyutsuz)
α	:Deri bölgesinde bulunan vücut kütlesi (boyutsuz)
θ	:Zaman (s)

KAYNAKLAR

- [1] ASHRAE handbook – Fundamentals, chapter 8., Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers. 29p., 1993.

- [2] BUTERA, F.M., “Chapter 3 – Principles of Thermal Comfort”, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2: 39 – 66, 1998.
- [3] GAGGE, A.P., STOLWIJK, J.A.J., NISHI, Y., “An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response”, ASHRAE Transactions, 77 (1): 247 – 257, 1971.
- [4] GAGGE, A.P., FOBELETS, A.P., BERGLUND, L.G., “A standard predictive index of human response to the thermal environment”, ASHRAE Transactions, 92 (2B): 709 – 731, 1986.
- [5] ATMACA, İ., “Isıl konfor parametrelerinin insan üzerine etkisinin incelenmesi”, Doktora tezi, Bursa, 2006.
- [6] ATMACA, İ., YİĞİT, A., “Predicting the effect of relative humidity on skin temperature and skin wettedness”, Journal of Thermal Biology, 31: 442 – 452, 2006.
- [7] ATMACA, İ., KAYNAKLI, Ö., YİĞİT, A., “Effects of radiant temperature on thermal comfort”, Building and Environment, 42: 3210 – 3220, 2007.
- [8] TANABE, S., KOBAYASHI, K., NAKANO, J., OZEKI, Y., KONISHI, M., “Evaluation of Thermal Comfort Using Combined Multi – node Thermoregulation (65 MN) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD)”, Energy and Buildings, 34: 637 – 646, 2002.
- [9] SORENSEN D.N., “Radiation between segments of the seated human body”, 8th International Conference on Air Distribution in Rooms 2002, Copenhagen, Denmark.
- [10] ANSI / ASHRAE Standard 55 – 2004, “Thermal environmental conditions for human occupancy”, 2004.
- [11] ISO 7730, “Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort” International Organization for Standardization, 1994.
- [12] McCULLOUGH, E.A., JONES, B.W., TAMURA, T., A Database for Determining the Evaporative Resistance of Clothing. ASHRAE Transactions, 95(2): 316 – 328, 1989.
- [13] RAVEN, P.R., HORVATH, S.M., Variability of physiological parameters of unacclimatized males during a two-hour cold stress of 5 °C. International Journal of Biometeorology, 14(3): 309-320, 1970.
- [14] STOLWIJK J.A.J., HARDY, J.D., Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients. Journal of Applied Physiology, 21 (3): 967 – 977, 1966.
- [15] HUIZENGA, C., HUI, Z., ARENS, E., A Model of Human Physiology and Comfort for Assessing Complex Thermal Environments. Building and Environment, 36: 691 – 699, 2001.
- [16] YI, L., FENGZHI, L., YINGXI, L., ZHONGXUAN, L., An Integrated Model for Simulating Interactive Thermal Processes Human – Clothing System. Journal of Thermal Biology, 29: 567 – 575, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim ATMACA

1979 yılı Antalya doğumludur. 1999 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Lisans, 2002 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalından yüksek lisans ve 2006 yılında aynı Enstitüden Doktora derecelerini aldı. 2007 yılında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim dalına Yardımcı Doçent olarak atandı. Halen Akdeniz Üniversitesinde bölüm başkan yardımcısı olarak görevini sürdürmektedir. Aynı zamanda MMO Antalya şube yönetim kurulu üyesidir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

Sezgi KOÇAK

1985 Ankara doğumludur. 2009 yılında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bölüm ikincisi olarak eğitimini tamamladı. Aynı yıl Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimini 2012 yılında tamamladı. 2009 yılından 2010 yılına kadar özel sektörde çalıştıktan sonra 2010 yılının Haziran ayında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen aynı görevi sürdürerek Termodinamik Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine devam etmektedir.