

VAZODİLATASYONUN İNSAN FİZYOLOJİSİNE ETKİSİ VE TERLEME İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Ömer KAYNAKLI*

Muhsin KILIÇ*

Özet: İnsan sıcak bir ortama girdiğinde vücut ısı dengesini sağlamak için bazı tepkiler verir. Vücut sıcaklığının istenilen aralıkta kalması ve ısı konforun sağlanabilmesi için verilen bu tepkiler vazodilatasyon ve terlemedir. Bu çalışmada, vücudun sığağa karşı doğal korunma mekanizmalarından olan vazodilatasyon ve terlemenin vücut fizyolojisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla vücutla çevre arasındaki ısı-kütle geçişinin ve fizyolojik tepkilerin simülasyonu oluşturularak Delphi 7 programlama dili ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Geliştirilen yazılımla; 1) terleme ve vazodilatasyon etkilerinin olduğu, 2) terleme etkilerinin olmadığı, 3) vazodilatasyon etkilerinin olmadığı ve 4) her iki etkinin de olmadığı durumlar olmak üzere dört farklı koşul altında çözümleme yapılmıştır. Her durum için vücutun denetim mekanizmalarının tepkileri incelenerek, vazodilatasyon ve terlemenin vücuttan olan ısı kayıplarını, iç bölme ve deri tabakası sıcaklıklarını ve ısı duyumu hangi ölçüde etkilediği karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isıl Konfor, Sıcaklık denetim mekanizması, Terleme, Vazodilatasyon.

Effect of Vasodilatation on Human Physiology and Comparison with Sweating

Abstract: When the human enters a warm ambient, body reacts in different ways to maintain heat balance. These reactions to maintain body temperature in the required range and the thermal comfort are called vasodilatation and sweating. In this study, effects of vasodilatation and sweating, which are natural control mechanisms of the body to protect from hot conditions, on the human physiology have been investigated. For this reason, heat and mass transfer between the body and environment and physiological reactions have been simulated and transferred to computer media with Delphi 7 programming language. By the developed model, four different conditions were considered in the analysis as: 1) both sweating and vasodilatation effects exist together, 2) no sweating effect, 3) no vasodilatation effect, and 4) none of the sweating and vasodilatation effects exist. For each condition, reactions of the body control mechanism were examined, the effects of vasodilatation and sweating on heat loss, the core and skin temperatures and thermal sensation are comparatively presented and analyzed.

Keywords: Thermal comfort, Thermoregulatory control mechanism, Sweating, Vasodilatation.

SEMBOLLER

A_D	Çıplak vücut için DuBois yüzey alanı, m^2
c_p	Sabit basınçta özgül ısı, (J/kg.K)
CSIG	Soğuk sinyal
f	Giysi alan faktörü
h	Isı geçiş katsayısı, $W/(m^2.K)$
h_{fg}	Suyun buharlaşma gizli ısısı, J/kg
i	Buhar geçirgenlik verimi
K	İç vücut ile deri arasında etkin iletim katsayısı, $W/(m^2.K)$
LR	Lewis oranı, $^{\circ}C/Pa$
m	Vücut kütlesi, kg
M	Toplam metabolik ısı üretim oranı, W/m^2
\dot{m}	Kütleli debi, $kg/(s.m^2)$

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 16059, Görükle, Bursa.

p	Su buharının kısmi basıncı, kPa
Q	Birim zamanda ısı geçişi, W/m ²
R	Giysinin ısı ve buharlaşma direnci, (m ² .K)/W ve (m ² .kPa)/W
S	Birim zamanda depolanan ısı enerjisi, W/m ²
t	Zaman, saniye
T	Sıcaklık, °C
\bar{T}	Ortalama sıcaklık, °C
TSENS	Isıl duyum
w	Deri ıslaklığı
W	Yapılan dış iş oranı, W/m ²
WSIG	Sıcak sinyal
α	Toplam vücut kütesinin deride olan bölümü
η	Buharlaşma verimi

Alt simgeler

a	ortam, hava
b	vücut
bl	kan
c	soğuk
cl	giysi
cr	iç bölme
cv	taşınım
dif	difüzyon
e	buharlaşma
h	sıcak
max	maksimum
n	nötr
o	operatif
rd	ışınım
res	solunum
rsw	salgılanan ter
s	duyulur
sk	deri
t	toplam

1. GİRİŞ

Isıl konfor, bir mahalde sıcaklık ve diğer hava şartlarından ileri gelen bir rahatsızlığın olmaması durumu veya iç vücut sıcaklığının düzenlenmesi için minimum fizyolojik çabaya gerek duyulması hali olarak tanımlanabilmektedir^{1,2}. Isıl konforun sağlanması temel olarak iki koşula bağlıdır. Birincisi, vücutla çevre arasındaki ısı dengesidir. Vücutta metabolik aktivitelerle üretilen ısı enerjisi vücuttan çevreye olan ısı kayıplarına eşit olmalıdır. Isıl konfor için ikinci koşul, deri ve iç bölme sıcaklık kombinasyonunun ısı olarak nötr olma durumunu sağlamasıdır. Çünkü ısı dengesinin sağlanabileceği çok geniş çevre koşulları vardır. Ancak bu geniş aralığın dar bir bölgesinde ısı konfor sağlanmaktadır. Vücutla çevre arasındaki ısı dengesinin sağlandığı koşullarda bile deri sıcaklığı ve üretilen ter miktarı, kişinin konforunu etkiler. Bu nedenle, konfor şartlarından söz ederken ısı dengesiyle birlikte bu parametreler de göz önünde bulundurulmalıdır^{3,4}.

Vücutla çevre arasındaki ısıl etkileşim sırasında vücudun birtakım fizyolojik denetim mekanizmaları harekete geçer. Ortam koşullarına göre değişen ve temelde vücut iç sıcaklığını korumaya yönelik olan bu tepkiler damarların kısılması (vazokonstriksiyon), genişlemesi (vazodilatasyon), titreme ve terleme şeklinde gerçekleşir. Vazokonstriksiyon ve titreme vücudu soğuğa karşı koruyan mekanizmalardır. Vücut kas gerilmesi, titreme veya bireyin hareket etmesi gibi işlemlerle ısı üretir. Hareket sonucunda üretilen enerji çevreye olan ısı geçişlerini (deriden duyulur ve gizli + solunum kayıplarını) dengelerse, vücut iç sıcaklığı korunmuş olur⁵. Vücudu sıcaklık artışından koruyan mekanizmalar ise vazodilatasyon ve terlemedir. Bu çalışmada, bu ısıl düzenleme mekanizmaları üzerinde durulmuştur. İlk olarak vücut fizyolojisi ve denetimi hakkında temel bilgiler verilmiş daha sonra hazırlanan simülasyon yardımıyla sıcak bir ortamda vücuttan olan ısı kayıpları, ter miktarı, deri ıslaklığı, iç bölme ve deri sıcaklıkları hesaplanarak denetim mekanizmalarının etkileri dört farklı durum için karşılaştırılmıştır.

2. VÜCUDUN SICAĞA KARŞI KORUNMA MEKANİZMALARI

Normal sağlıklı bir insanın vücut sıcaklığı son derece kararlı olup değişimler nadiren 0.5°C'yi aşmaktadır. Ortam sıcaklığı ne olursa olsun vücut sıcaklığı belirli dar bir aralıkta tutulması gerekir. Hareketsiz bir yetişkinin iç vücut sıcaklığı ortalama 37°C iken deri sıcaklığı 31°C'den 25°C'ye kadar değişiklik göstermektedir¹. Vücut sıcaklıklarının düzenlenmesi hipotalamus tarafından kontrol edilir. Hipotalamus, diencephalonun yani orta beyin bir parçasıdır ve yaklaşık 4 g ağırlığında olup beyin hacminin %0.3-0.5'ini teşkil eder. Hipotalamusun ön kısmında ısı kayıplarını sağlayan (vücudu sıcaklık artışından koruyan), arka kısmında ise ısı üretimini sağlayan (sıcaklık düşümünden koruyan) birer merkez vardır⁶⁻⁸.

Çevreye istenilen düzeyde ısı geçişi olmadığında, vücudun sicağa karşı korunma mekanizmaları yani vazodilatasyon ve terleme devreye girer. Vazodilatasyonla deriye olan kan akışı artırılır ve bu şekilde iç bölgelerden dış dokulara olan ısı geçişinde nötr duruma oranla iki ile üç kat artış olur. Normal koşullarda ve dinlenme durumunda yetişkin bir insanda kalp debisinin %5-10'u kadar kan deride bulunur. Sıcaklığın artmasıyla derideki kan akışı da artar. Sıcaklığın aşırı artması halinde kalpteki kan debisinin %50-60'ı deriye gönderilir. Eğer buna rağmen iç vücut sıcaklığı hala artmaya devam ederse vücut ter salgılayarak buharlaşma ile ısı geçişini devreye sokar. Ancak deriden suyun buharlaşmasını engelleyici herhangi bir çevresel faktör, önemli bir soğutma şekli olan terlemeyle denetimi etkiler. Bunlar arasında ortam havası içerisindeki su buharının kısmi basıncının artması, hava dolaşımının azalması ve giysiler sayılabilir. İç vücut sıcaklığını korumak için gösterilen fizyolojik çabaların yanında bireylerin gösterdiği davranışsal tepkiler de vardır. Bunlar daha ince giysilerin giyilmesi, hareketlilik düzeyinin azaltılması ve daha serin ortam koşulların aranması şeklinde ortaya çıkar^{1,3,9,10}.

Fizyolojik ısıl düzenleme mekanizmalarının işleyebilmesi için vücutta sıcaklığın yüksek ya da düşük olduğunu bildirecek algılayıcıların bulunması gerekir. Algılayıcılardan gelen sinyaller doğrultusunda hipotalamus vücut sıcaklığını düşürmek veya yükseltmek için gerekli işlemleri başlatır. Tablo 1'de vücuttaki sıcaklık algılayıcılarının dağılımı verilmiştir.

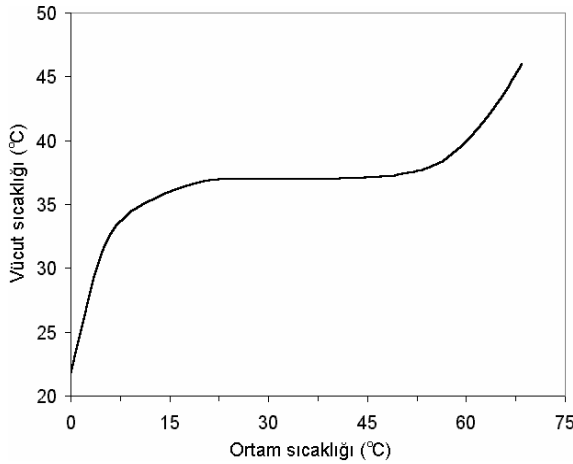
Tablo 1.
Sıcaklık algılayıcılarının vücuttaki dağılımı¹¹

Bölge	Algılayıcı oranı (%)
Baş	21
Gövde	38
Kollar	13
Eller	5
Uyluk	15
Baldır ve ayaklar	8

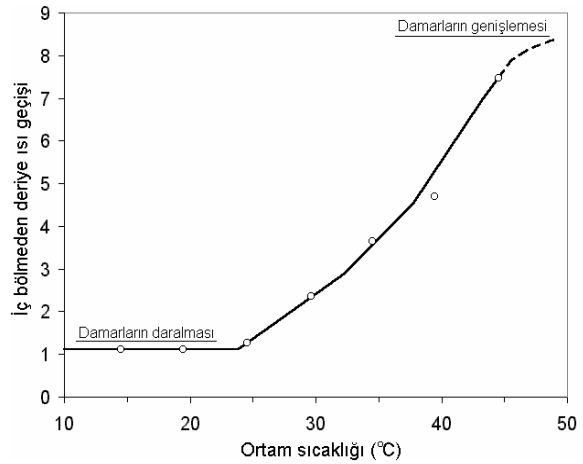
Vücudun deri tabakası sıcaklığı iç bölmeye nazaran daha geniş bir aralıkta değişebilir. Deri tabakası sıcaklığındaki değişim 25 ile 34°C arasında iken iç bölmede $\pm 0.5^\circ\text{C}$ aralığındadır. İç vücut sıcaklığında 1°C'lik artış kalbin dakikada 35 kez daha fazla çarpmasına neden olur^{12,13}.

Soğuk nedeniyle vücut iç sıcaklığı azalmaya devam ettiği durumlarda adrenal ve noradrenalin hormon salgısı artar. Bu hormonlar vücuttaki kimyevi olayları hızlandırarak, metabolizma hızını ve dolayısıyla enerji üretimini artırır. İç vücut sıcaklığında 2°C'lik bir düşüş, çevreye daha fazla ısı kaybını önlemek için vücudun çabalarını en üst düzeye çıkarmasına ve had safhada titremeye neden olur. İç vücut sıcaklığında daha fazla düşüş ile birlikte vücudun kendini koruma çabalarında azalma görülür, bu durum ise sıcaklık düşümündeki hızı ivmelendirir. Yaklaşık 2°C'den daha fazla düşüş, vücudun kendi kontrolünü kaybetmeye başlamasını beraberinde getirir ve bu durum hipotermi olarak adlandırılır^{3,14}. Bunun aksi durumu yani vücut sıcaklığının aşırı yükselmesi hipertermidir ve hipotermi ile hipertermi durumları arasında deri bölgesindeki kan akışı açısından yaklaşık 4 kat fark vardır¹⁵. Hipertermi, vücut sıcaklığının yaklaşık 41°C'nin üzerine çıkması durumunda gerçekleşir ve bu koşullar altında merkezi sinir sisteminin işlevleri bozulur¹.

Ortamın vücut sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 1'de görülmektedir. Doğal olarak ortam sıcaklığı arttıkça vücut sıcaklığı da artmaktadır. Çok yüksek veya düşük ortam sıcaklıklarında vücut, fizyolojik denetim sistemleriyle ısı dengesini kuramadığından vücut sıcaklıklarında aşırı yükselme veya düşme olur. Vücut sıcaklıklarındaki artışla kan akış hızının yükselmesi vücudun iç bölmesinden deriye olan ısı akışını etkin bir biçimde artırır. Şekil 2'de ortam sıcaklığı ile iç bölmeden deri tabakasına olan ısı geçişinin değişimi tam vazokonstriksiyon durumu referans alınarak verilmiştir. Tam bir vazokonstriksiyon ile vazodilatasyon durumları arasında ısı geçişinin yaklaşık 8 kat değiştiği görülmektedir.



Şekil 1.
Ortam sıcaklığı ile vücut sıcaklığının değişimi¹⁶



Şekil 2.
Ortam sıcaklığı ile vücudun iç bölmesinden deriye olan ısı geçişinin değişimi¹⁶

3. VÜCUTLA ÇEVRE ARASINDAKİ ISIL ETKİLEŞİM

3.1. Enerji Dengesi ve Isı Kayıpları

İki bölmeli modelde iç bölme ve deri tabakası için enerji dengesi, birbirine bağlı iki denklemle ifade edilir^{3,17,18}.

$$S_{cr} = M - W - (Q_{s,res} + Q_{e,res}) - Q_{cr,sk} \quad (1)$$

$$S_{sk} = Q_{cr,sk} - (Q_{cv} + Q_{rd} + Q_{e,sk}) \quad (2)$$

Vücutta üretilen enerjiyle çevreye olan ısı kayıpları arasında fark olması durumunda vücutta ısıl yük birikimi olur. İç bölme ve deride depolanan ısıl enerjiler bu bölmelerin sıcaklıklarının değişmesine neden olur. Bu etki aşağıda verilen denklemlerle verilir.

$$\frac{dT_{cr}}{dt} = \frac{S_{cr} A_D}{((1 - \alpha) m c_{p,b})} \quad (3)$$

$$\frac{dT_{sk}}{dt} = \frac{S_{sk} A_D}{(\alpha mc_{p,b})} \quad (4)$$

Eşitlik (2) yer alan ($Q_{cv} + Q_{rd}$) terimi deriden olan toplam duyulur ısı kaybını vermekte ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_{cv} + Q_{rd} = \frac{(T_{sk} - T_o)}{R_t} \quad (5)$$

Burada, T_o operatif sıcaklık olup taşınım ve ışınım etkileri birleştirilerek bu parametre ile tanımlanabilir.

$$T_o = \frac{h_{rd} \bar{T}_{rd} + h_{cv} T_a}{h_{rd} + h_{cv}} \quad (6)$$

Giysilerden ve çevre havasından kaynaklanan toplam ısıl ve buharlaşma direnci ise;

$$R_t = R_{cl} + \frac{1}{(h_{rd} + h_{cv}) f_{cl}} \quad (7)$$

$$R_{e,t} = \frac{R_{cl}}{i_{cl} LR} + \frac{1}{h_{cv} f_{cl} LR} \quad (8)$$

denklemleriyle hesaplanır. Burada, i_{cl} giysinin buhar geçirgenlik verimi, LR Lewis oranıdır. i_{cl} değeri iç ortamlarda kullanılan giysiler için ortalama olarak 0.34, LR ise tipik iç ortam koşullarında 16.5°C/kPa alınabilir^{3,19}. Deriden maksimum buharlaşma potansiyeli $Q_{e,max}$, deri yüzeyi ile ortam arasındaki su buharının kısmi basınç farkına ve giysinin buharlaşmayla olan ısı geçişine gösterdiği dirence bağlı olarak,

$$Q_{e,max} = \frac{(p_{sk} - p_a)}{R_{e,t}} \quad (9)$$

yazılabilir. Vücut üzerindeki toplam deri ıslaklığı (w), sıcaklık denetim sistemlerinin etkisi ile salgılanan (w_{rsw}) ve terin deriden doğal difüzyonu (w_{dif}) sonucu oluşan ıslaklıkları içerir. w_{rsw} ve w_{dif} aşağıda verilen eşitliklerle hesaplanabilir.

$$w_{rsw} = \frac{\dot{m}_{rsw} h_{fg}}{Q_{e,max}} \quad (10)$$

$$w_{dif} = 0.06(1 - w_{rsw}) \quad (11)$$

$$w = w_{rsw} + w_{dif} \quad (12)$$

Bu durumda deriden toplam gizli ısı kaybı ($Q_{e,sk}$), deri ıslaklıklarına ve maksimum buharlaşma potansiyeline bağlı olarak aşağıda verilen eşitlikle hesaplanabilir.

$$Q_{e,rsw} = w_{rsw} Q_{e,max} \quad (13)$$

$$Q_{e,dif} = w_{dif} Q_{e,max} \quad (14)$$

$$Q_{e,sk} = Q_{e,rsw} + Q_{e,dif} = w Q_{e,max} \quad (15)$$

İnsan vücudunun ısıl dengesi, çevre ile ısıl etkileşimleri ifade eden yarı kuramsal yarı ampirik bir yaklaşım içerir. Duyulur ve gizli ısı geçiş mekanizmalarını ifade etmek için temel ısı geçiş denklemleri, ısı geçişini etkileyen katsayıların belirlenmesi için ise deneysel bağıntılar kullanılır. Ayrıca yine deneysel denklemlerden fizyolojik denetim mekanizmalarını iç ve deri sıcaklığının fonksiyonu olarak ifade etmek için yararlanılır.

3.2. Sıcaklık Denetim Mekanizması ve Tepkiler

Vücudun sıcaklık denetim mekanizmaları (vazodilatasyon, vazokonstriksiyon, terleme, titreme), deriden ve iç bölgeden gelen sinyaller ile harekete geçmektedir. İşlemleri beş sinyal başlatmaktadır. Bu sinyaller; iç bölgeden gelen sıcak sinyal ($WSIG_{cr}$), iç bölgeden gelen soğuk sinyal ($CSIG_{cr}$), deriden gelen

sıcak sinyal ($WSIG_{sk}$), deriden gelen soğuk sinyal ($CSIG_{sk}$) ve vücuttan gelen sıcak sinyal ($WSIG_b$). Bu sinyaller tabakaların nötr sıcaklıkları ile gerçek sıcaklıkları arasındaki fark olarak tanımlanmıştır ve sadece pozitif değerler alabilirler.

Vücudun toplam kütesinin deri bölmesinde bulunan kısmı α olmak üzere, vücudun ortalama sıcaklığı, deri ve iç vücut sıcaklıklarının ağırlıklı ortalaması alınarak aşağıda verilen denklem yardımıyla bulunabilir.

$$T_b = \alpha T_{sk} + (1 - \alpha)T_{cr} \quad (16)$$

Vücut, soğuğa karşı korunmak için deri ve deriye yakın dokulara vazokonstriksiyon işlemleriyle kan akışını azaltır. Bu tepki deriyi ve ona yakın dokuları soğutmasına karşın iç dokuların sıcaklığını korur. Vazokonstriksiyon, deriden gelen soğuk sinyallerle denetlenir. İç vücuttan gelen soğuk sinyaller de vazokonstriksiyona neden olur ancak etkisi deriden gelen soğuk sinyaller kadar önemli değildir³. İç vücut ve deri sıcaklıklarının nötr değerden sapmalarının kan akışı üzerindeki etkileri matematiksel olarak aşağıda verilen denklem ile ifade edilmiştir.

$$\dot{m}_{bl} = [(6.3 + 200 WSIG_{cr}) / (1 + 0.5 CSIG_{sk})] / 3600 \quad (17)$$

Eşitlik (17) ile verilen kan debisindeki değişimler, deri ve iç vücut bölmelerinin etkin kütlelerini değiştirecektir. Vücudun toplam kütesinin deri bölmesinde bulunan kısmını simgeleyen α değeri aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir³.

$$\alpha = 0.0418 + \frac{0.745}{(3600\dot{m}_{bl} + 0.585)} \quad (18)$$

İki bölmeli anlık enerji dengesi modelinde iç bölme ile deri arasındaki ısı geçişi, K iç vücut ile deri arasındaki etkin iletim katsayısı olmak üzere, aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir.

$$Q_{cr,sk} = (K + c_{p,bl} \dot{m}_{bl})(T_{cr} - T_{sk}) \quad (19)$$

Vücudun birim zamanda ürettiği ter miktarı eşitlik (20) ile hesaplanabilir. Buradan bulunan \dot{m}_{rsw} değeri eşitlik (10) ile verilen deri ıslaklığı ve eşitlik (13) ile verilen gizli ısı kaybının hesaplamak için kullanılır.

$$\dot{m}_{rsw} = 4.7 \times 10^{-5} WSIG_b \exp(WSIG_{sk} / 10.7) \quad (20)$$

İki bölmeli modelde yaygın olarak kullanılan ısı konfor ölçütlerinden ısı duyum indeksi ($TSENS$), soğuk ve sıcak ortamlar için -5 ile $+5$ arasında değişen toplam 11 noktalı sayısal ölçeğe dayanmaktadır. $TSENS$ değeri, aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplandıktan sonra Tablo 2’de verilen ölçeğe göre değerlendirilir.

$$TSENS = 0.4685(T_b - T_{b,c}) \quad T_b < T_{b,c} \quad (21)$$

$$TSENS = \frac{4.7\eta_e(T_b - T_{b,c})}{(T_{b,h} - T_{b,c})} \quad T_{b,c} \leq T_b \leq T_{b,h} \quad (22)$$

$$TSENS = 4.7\eta_e + 0.685(T_b - T_{b,h}) \quad T_{b,h} < T_b \quad (23)$$

Buharlaştırma ile denetim bölgesinin alt ve üst sınır eşik noktaları $T_{b,c}$ ve $T_{b,h}$ olmak üzere;

$$T_{b,c} = (0.194 / 58.15)(M - W) + 36.301 \quad (24)$$

$$T_{b,h} = (0.347 / 58.15)(M - W) + 36.669 \quad (25)$$

denklemleriyle hesaplanır.

Tablo 2.
Isıl duyum ($TSENS$) ölçeği

0	nötr			
- 1	serince	+	1	ılıkça
- 2	serin	+	2	ılık
- 3	soğuk	+	3	sıcak
- 4	çok soğuk	+	4	çok sıcak
- 5	dayanılmaz ölçüde soğuk	+	5	dayanılmaz ölçüde sıcak

4. METOT

Bu çalışmada, 30°C sıcaklık, %60 bağıl nem koşullarına sahip bir ortamda sakin bir pozisyonda (vücudun ürettiği enerji oranı yaklaşık 65 W/m²) ve yazlık giysili (~0.6 clo) bir insanın deriden olan duyulur ve gizli ısı kayıpları, solunum yoluyla olan ısı kayıpları, iç bölme ve deri sıcaklıklarında meydana gelen değişimler ve bu değişimlere vücut denetim mekanizmalarının verdiği tepkiler incelenmiştir. Sıcağa karşı denetim mekanizmalarından vazodilatasyon ve terlemenin vücudun iç bölme ve deri tabakası sıcaklıklarını ne ölçüde etkilediği karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaların yapılabilmesi için insan vücudu 4 durumda incelenmiştir. I. durumda, vazodilatasyon ve terleme etkileri göz önüne alınmış; II. durumda, terleme etkileri ihmal edilmiş; III. durumda, vazodilatasyon etkileri ihmal edilmiş; IV. durumda, hem vazodilatasyon hem de terleme etkileri ihmal edilmiştir. Her durum için, deri ve iç bölme sıcaklıkları, iç bölmeden deri tabakasına ve vücuttan çevreye olan toplam ısı kayıpları, kan debisi ve ısı duyumu indisinin değişimi tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

Sürecin başlangıcında vücut nötr koşullarda ($T_{sk,n} = 33.7^{\circ}\text{C}$, $T_{cr,n} = 36.8^{\circ}\text{C}$) kabul edilerek dört durum için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamaların ilk aşamasında, çevresel koşullardan hareketle operatif sıcaklık (T_o) ve bu koşullara ilave olarak vücut üzerindeki giysilerin direnciyle toplam ısı ve buharlaşma dirençleri (R_t ve $R_{e,t}$) bulunmuştur. Eşitlik (5) ve (15) kullanılarak deriden toplam duyulur ve gizli ısı kayıpları, deri ve iç bölme sıcaklıklarından hareketle denetim sinyalleri, eşitlik (17) ile (20) arasında verilen ifadelerle vücudun fizyolojik denetim mekanizmalarının gösterdiği tepkiler ve eşitlik (21) ile (25) arasındaki ifadelerle ısı duyumu hesaplanmıştır. İç bölme ve derinin enerji dengesini gösteren sırasıyla eşitlik (1) ve (2) ile bu bölmelerde birim zamanda depolanan enerjiler, eşitlik (3) ve (4) ile sıcaklık değişimleri belirlenmiştir. Tüm bu işlemler her zaman adımı için yapılarak vücut sıcaklıkları, ısı kayıpları ve fizyolojik parametrelerin değişimi elde edilmiştir.

5. ÇALIŞMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tablo 3’de terleme ve vazodilatasyon etkilerinin göz önüne alındığı I. durum için ortalama vücut sıcaklığı, deri ıslaklığı, iç bölme ile deri tabakası arasındaki ısı etkileşim, deriden duyulur ve gizli ısı kayıpları ve ısı duyumu indeksinin değişimi verilmiştir. Tablo 4, 5 ve 6’da ise sırasıyla II., III. ve IV. durumlar için simülasyondan elde edilen veriler yer almaktadır. I. durumda vücudu sıcağa karşı koruyan denetim mekanizmalarının her ikisi de göz önüne alındığından ortalama vücut sıcaklığı 36.84°C’ye çıkarken terleme etkilerinin ihmal edildiği II. durum için 37.89°C’ye yükselmiştir. Deri ve iç bölme sıcaklıklarının tüm durumlar için değişimi Şekil 3 ve 4’de verilmiştir. I. durumda iç bölme sıcaklığı 36.93°C’ye, deri sıcaklığı 35.53°C’ye, II. durumda ise bu sıcaklıklar sırasıyla 37.91°C ve 37.53°C değerlerine çıkmaktadır. II. durumda terlemeden kaynaklanan ısı kaybının olmayışı vücudun iç ve deri bölmesi sıcaklıklarının daha fazla artmasına neden olmuştur. T_b değeri, vücut iç bölme deri sıcaklıklarının yanısıra deri kütlelerinin oranı (α) ile de ilişkilidir.

$Q_{e,sk}$ ve $Q_{s,sk}$ sırasıyla deriden gizli (difüzyon + buharlaşma) ve duyulur (taşınım + ışınım) ısı kayıplarını ifade etmektedir. Ortam sıcaklığının yüksek olması, terlemeyi devreye sokarak gizli ısı kayıplarının artmasına neden olmaktadır. I. durumda, vücudun ürettiği ter miktarı 1. dakikada 5 g/h iken 120. dakikada 87 g/h’dir. Üretilen ter miktarıyla orantılı olarak deri ıslaklığı da 0.09’dan başlayarak 0.45 değerine kadar çıkmaktadır. Bu esnada deri sıcaklığı bir miktar arttığından ortam ile deri arasındaki sıcaklık farkı artmakta ve duyulur ısı kaybı 17.3’den 25.4 W/m² değerine çıkmaktadır.

I. durumda iç bölme ile deri sıcaklıkları arasındaki fark süreç ilerledikçe azalmasına rağmen iç bölmeden deriye olan ısı geçişi ($Q_{cr,sk}$) artmaktadır. Çünkü deriye gönderilen kan akışı artmaktadır. İç bölme sıcaklığını korumaya yönelik olan bu tepki, sıcak sinyallerle harekete geçmekte ve vazodilatasyon etkileriyle kan akışını artırmakta, α değerini azaltmaktadır. Bu şekilde T_{cr} sıcaklığının aşırı yükselmesi önlenerek vücudun hayati fonksiyonlarının devamı sağlanır.

Tablo 3.

Terleme ve vazodilatasyon etkilerinin olduğu I. durum için vücut fizyolojisindeki değişimler

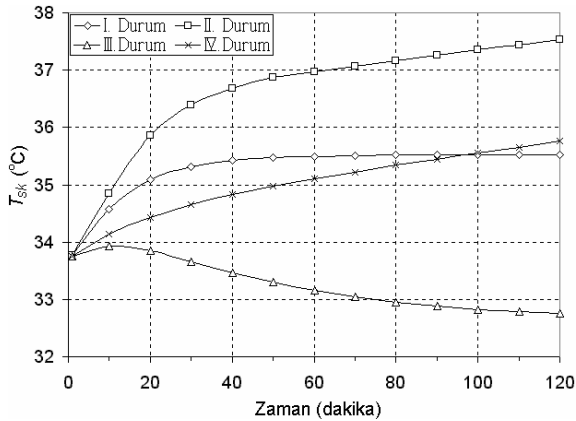
Zaman (dakika)	T_b (°C)	w	$Q_{cr,sk}$ (W/m ²)	$Q_{e,sk}$ (W/m ²)	$Q_{s,sk}$ (W/m ²)	TSENS
1	36.42	0.09	45.0	5.7	17.3	0.00
10	36.65	0.26	53.9	18.2	21.0	0.98
20	36.74	0.35	55.1	26.1	23.4	1.68
30	36.79	0.39	57.0	30.3	24.4	2.02
40	36.81	0.42	58.5	32.6	24.9	2.20
50	36.83	0.43	59.5	33.9	25.1	2.29
60	36.83	0.44	60.0	34.5	25.2	2.34
70	36.84	0.44	60.4	34.9	25.3	2.37
80	36.84	0.45	60.5	35.1	25.3	2.38
90	36.84	0.45	60.6	35.2	25.3	2.39
100	36.84	0.45	60.7	35.3	25.4	2.39
110	36.84	0.45	60.7	35.3	25.4	2.40
120	36.84	0.45	60.7	35.3	25.4	2.40

Tablo 4.

Terleme etkilerinin ihmal edildiği II. durum için vücut fizyolojisindeki değişimler

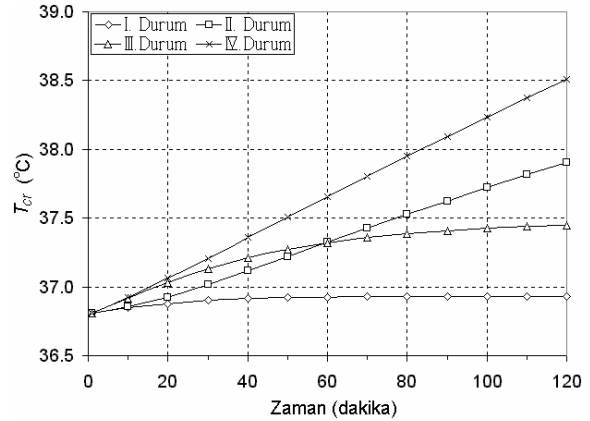
Zaman (dakika)	T_b (°C)	w	$Q_{cr,sk}$ (W/m ²)	$Q_{e,sk}$ (W/m ²)	$Q_{s,sk}$ (W/m ²)	TSENS
1	36.42	0.06	44.9	3.9	17.3	0.00
10	36.69	0.06	50.2	4.4	22.3	1.25
20	36.85	0.06	42.9	4.9	26.9	2.48
30	36.98	0.06	39.1	5.1	29.3	3.43
40	37.10	0.06	38.6	5.3	30.6	4.02
50	37.20	0.06	38.6	5.4	31.5	4.10
60	37.31	0.06	38.6	5.4	32.0	4.17
70	37.41	0.06	39.0	5.5	32.5	4.24
80	37.51	0.06	39.5	5.5	32.9	4.31
90	37.61	0.06	39.9	5.6	33.3	4.37
100	37.70	0.06	40.4	5.6	33.7	4.44
110	37.80	0.06	40.8	5.7	34.2	4.50
120	37.89	0.06	41.2	5.7	34.6	4.56

Terleme etkilerinin ihmal edildiği II. durumda vücudun ortalama deri ıslaklığı minimum mertebede yani difüzyondan kaynaklanan 0.06 değerindedir. Deriden gizli ısı kayıpları, terin buharlaşması ve difüzyonu olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Ter üretimi olmadığından gizli ısı kayıpları da ilk duruma göre çok düşük değerlerdedir. Gizli ısı kayıpları sadece terin deriden doğal difüzyonundan kaynaklanmaktadır. Doğal olarak bu da buharlaşma kayıplarına göre oldukça düşük bir mertebededir. Vücut yeteri kadar ısı atamadığından, deri sıcaklığı I. duruma göre daha hızlı artmakta ve duyulur ısı kayıpları daha büyük çıkmaktadır. Aynı zamanda, II. durumda terleme ile denetim olmadığından vazodilatasyon etkileri daha şiddetlidir. I. durumda incelenen 2 saatlik süreçte deriye gönderilen kan akışı hiçbir zaman üst sınır olan 25 g/(s.m²) değerine ulaşmazken II. durumda 49. dakikada bu değere ulaşmaktadır.



Şekil 3.

Deri sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 4.

İç bölme sıcaklığının zamanla değişimi

Tablo 5.
Vazodilatasyon etkilerinin ihmal edildiği III. durum için vücut fizyolojisindeki değişimler

Zaman (dakika)	T_b (°C)	w	$Q_{cr,sk}$ (W/m ²)	$Q_{e,sk}$ (W/m ²)	$Q_{s,sk}$ (W/m ²)	TSENS
1	36.35	0.09	38.6	5.8	17.2	0.00
10	36.47	0.28	37.6	19.0	18.1	0.00
20	36.56	0.42	40.2	27.9	17.7	0.28
30	36.61	0.52	43.7	33.5	16.8	0.69
40	36.65	0.59	47.2	37.6	15.9	0.97
50	36.68	0.65	50.1	40.4	15.1	1.18
60	36.70	0.69	52.6	42.5	14.5	1.32
70	36.71	0.73	54.5	44.0	13.9	1.43
80	36.72	0.75	56.0	45.1	13.5	1.51
90	36.73	0.77	57.1	45.9	13.2	1.57
100	36.74	0.79	58.0	46.6	13.0	1.61
110	36.74	0.80	58.6	47.0	12.8	1.65
120	36.74	0.81	59.1	47.4	12.7	1.67

Vazodilatasyon etkisinin ihmal edildiği III. durumda vücut sıcaklığının korunabilmesi için ilk dakikadan itibaren terleme mekanizması devreye girmekte ve I. duruma göre daha hızlı olarak artmaktadır. 2 saatin sonunda vücudun ürettiği ter miktarı 124.4 g/h'dir ve I. durumda üretilen ter miktarının yaklaşık 1.5 katıdır. Bu şekilde T_{sk} ve T_{cr} sıcaklıklarındaki aşırı artış önlenmiştir. Ancak ter üretiminin yüksek olması nedeniyle vücudun çok daha büyük bir bölümü ter tabakası ile kaplıdır. I. durumda deri ıslaklığı maksimum 0.45 iken III. durumda bu değer 0.81'e ulaşmıştır. Deri ıslaklığı, vücut üzerindeki ısı yükünü iyi bir göstergesidir ve konforsuzluk veya hoşnutsuzluk duygusu üzerinde, sıcaklıktan daha etkilidir³. III. durumdaki ısı kayıpları incelendiğinde, duyulur ısı kayıplarının azalırken gizli ısı kayıplarının arttığı görülmektedir (Tablo 5). Yüksek terleme miktarı nedeniyle doğal olarak gizli ısı kayıpları artmaktadır. Bununla birlikte deri sıcaklığının azalması, deri ile ortam arasındaki sıcaklık farkını düşürmekte ve duyulur ısı kayıplarını azaltmaktadır.

IV. durumda, vücudun sığağa koruma mekanizmalarından hiçbiri devrede olmadığından T_{cr} tüm durumlar arasında en yüksek sıcaklığa yani 38.51°C'ye çıkmıştır. T_{sk} sıcaklığı, II. duruma göre biraz daha düşüktür. Bunun nedeni, II. durumda vazodilatasyon etkisiyle T_{cr} sıcaklığının korunabilmesi için dış bölmeye kan akışının artırılmış olmasıdır. Kan akışının artmasıyla deri sıcaklığı da artmaktadır. I. ve II. durumlarda da aynı etkiden dolayı iç bölmeden deri bölmesine olan ısı transferi IV. duruma göre daha büyüktür. IV. durumda terleme etkileri ihmal edildiğinden $Q_{e,sk}$ bu nedenle de Q_{top} diğer durumlara göre küçük değerlerdedir. Benzer sebep-sonuç ilişkisi II. durumda da söz konusudur.

Tablo 6.
Terleme ve vazodilatasyon etkilerinin ihmal edildiği IV. durum için vücut fizyolojisindeki değişimler

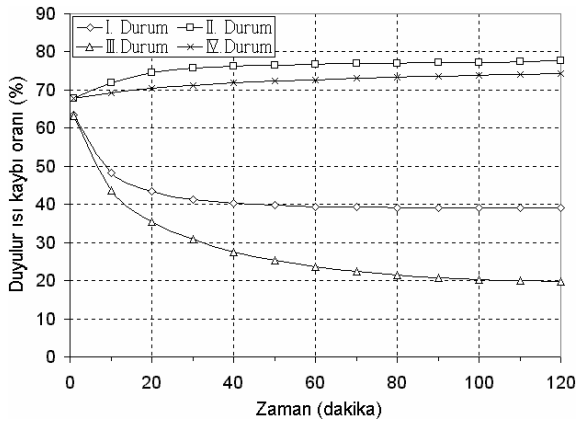
Zaman (dakika)	T_b (°C)	w	$Q_{cr,sk}$ (W/m ²)	$Q_{e,sk}$ (W/m ²)	$Q_{s,sk}$ (W/m ²)	TSENS
1	36.35	0.06	38.6	3.9	17.2	0.00
10	36.51	0.06	35.1	4.1	19.0	0.00
20	36.67	0.06	33.1	4.2	20.4	1.12
30	36.83	0.06	32.2	4.3	21.4	2.28
40	36.98	0.06	31.9	4.4	22.2	3.41
50	37.13	0.06	31.9	4.5	22.8	4.04
60	37.27	0.06	32.2	4.5	23.4	4.14
70	37.42	0.06	32.5	4.6	24.0	4.24
80	37.56	0.06	32.9	4.6	24.5	4.34
90	37.70	0.06	33.4	4.7	25.0	4.43
100	37.83	0.06	33.8	4.7	25.5	4.53
110	37.97	0.06	34.2	4.8	26.0	4.62
120	38.10	0.06	34.7	4.8	26.4	4.71

Isıl konfor ölçütlerinden olan TSENS ise, I., II. ve IV. durumlarda sırasıyla 2.40, 4.56 ve 4.71 değerlerine ulaşmaktadır. Yani, insanın böyle bir ortamda ya daha kısa süreli kalması ya da daha ince giysiler giymesi veya aktivite düzeyini düşürerek metabolik ısı üretimini azaltması gerekmektedir. III. durumda deri sıcaklığının düşük olması, TSENS değerinin diğer durumlara göre daha küçük çıkmasına neden olmuş-

tur. Ancak III. durumda yüksek deri ıslaklığı konforu büyük ölçüde olumsuz yönde etkilemekte ancak TSENS vücut sıcaklıklarını referans alan bir ısıl konfor ölçüt olduğundan bu hoşnutsuzluk tam olarak yansıtılamamaktadır. Bu nedenle, vücut sıcaklıklarıyla birlikte deri ıslaklığından kaynaklanan rahatsızlığı da göz önünde bulundurarak ısıl konfor değerlendirilmelidir.

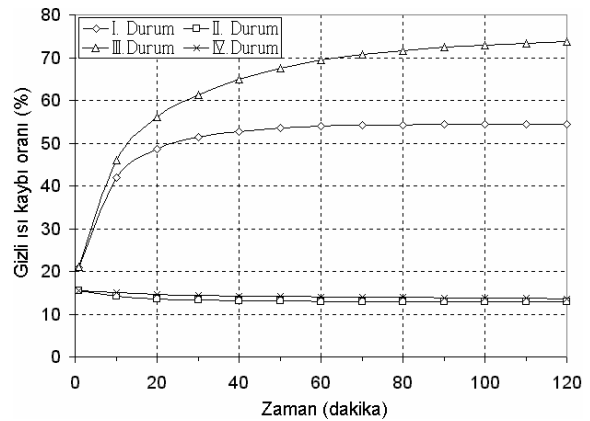
T_{cr} sıcaklığı vücudun hayati organlarının (karaciğer, dalak gibi) işlevlerini aksatmadan yerine getirebilmesi için son derece önemli bir büyüklüktür. Vücuttaki hayati fonksiyonların düzenli olarak devam edebilmesi için vücut iç sıcaklığın $37\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ mertebesinde olması gerektiği literatürde belirtilmektedir^{1,12}. Terleme etkilerinin ihmal edildiği II. ve IV. durumlarda iç vücut sıcaklığı sırasıyla 37.91°C ve 38.51°C değerlerine kadar çıkıp kritik değeri aşmaktadır. Bu iki durumdan terlemenin vücut için çok önemli bir denetim mekanizması olduğu görülmektedir.

Şekil 5 ve 6'da deriden olan duyulur ve gizli ısı kayıplarının vücuttan toplam ısı kaybına oranının değişimi verilmiştir. II. ve IV. durumlarda terleme olmadığından deri sıcaklığı yüksek değerlerdedir ve bu nedenle taşınım ve ışınım ile olan ısı kayıpları diğer durumlara göre daha fazladır. I. ve III. durumlarda ise, süreç ilerledikçe terleme miktarı arttığından deriden buharlaşmayla olan gizli ısı kayıplarının toplam ısı kayıpları içindeki önemi artmaktadır. Özellikle III. durumda vazodilatasyon etkilerinin olmaması vücudu terleme mekanizması ile korumaya yöneltmiştir. Bu nedenle süreç sonunda gizli ısı kaybı toplam ısı kaybının %74'ünü oluşturmaktadır. Vücuttan olan toplam (deriden duyulur ve gizli + solunum) ısı kayıplarının değişimi ise Şekil 7'de görülmektedir. Tüm fizyolojik etkilerin aktif halde olduğu I. durumda vücuttan olan toplam ısı kayıpları, sürekli olarak diğer durumlara göre daha fazladır. Buna en yakın değerler sadece terlemenin göz önüne alındığı III. durumda olmuştur. Ancak burada da deri ıslaklığı değerlerinin çok yüksek olduğu unutulmamalıdır. Sadece vazodilatasyon etkilerinin göz önüne alındığı II. ve tüm etkilerin ihmal edildiği IV. durum için vücuttan olan ısı kayıpları oldukça düşük mertebelerde kalmıştır. Hatta IV. durum için süreç sonunda toplam ısı kaybı 35.6 W/m^2 'dir ki bu değer vücutta üretilen enerjinin neredeyse yarısına eşittir. Yani vücutta üretilen ısıl enerjinin ancak yarısı çevreye atılabilmektedir. I. ile IV. durum arasındaki fark denetim mekanizmalarının etkisini daha açık olarak ortaya koymaktadır.



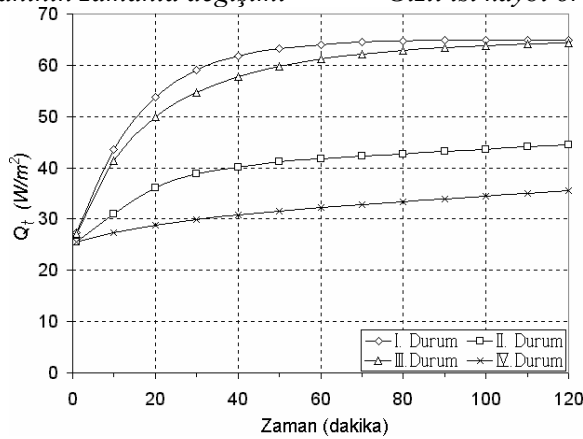
Şekil 5.

Duyulur ısı kaybı oranının zamanla değişimi



Şekil 6.

Gizli ısı kaybı oranının zamanla değişimi



Şekil 7.

Vücuttan olan toplam ısı kaybının zamanla değişimi

6. SONUÇ

Deriden çevreye olan ısı geçişinin azaldığı durumlarda vücut, vazodilatasyon (damarların genişlemesi) işlemleriyle deriye olan kan akışını artırır. Vücut sıcaklıklarının nötr değerlerinin üstüne çıkması durumunda ise terlemeyle ilave ısı kaybı yoluna gidilir. Her iki işlem de temelde vücut iç sıcaklığını belirli değerler arasında tutmaya yöneliktir.

İnsan vücudunun ısı düzenleme mekanizmalarının anlaşılması, ısıtma ve soğutma sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesinde önemli rol oynar. Bu nedenle, bu çalışmada fizyolojik kontrol mekanizmalarından vazodilatasyon ve terleme ele alınarak vücut iç bölme, ortalama ve deri tabakası sıcaklıkları, deri ıslaklığı, vücuttan olan ısı kayıpları ve ısı duyumu nasıl ve ne ölçüde etkilediği üzerinde durulmuştur. Çalışmada varılan sonuçlar özetle şunlardır;

- Terleme ile önemli ölçüde ilave ısı kaybı olduğundan vücut sıcaklıklarında en az artış I. ve III. durumlarda gerçekleşmiştir.
- III. durumda buharlaşma yoluyla olan ısı kayıplarının yanısıra vazodilatasyon etkilerinin olmaması T_{sk} sıcaklığının diğer durumlara göre daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Ancak, T_{sk} sıcaklığının düşük olması nedeniyle duyulur ısı kayıpları en az bu durumda olmaktadır.
- Vazodilatasyon işlemi deri bölgesine kan akışını artırarak α değerini azalttığından derinin iç vücutla ilişkisini artırmaktadır. Bu işlem, T_{cr} sıcaklığındaki aşırı yükselmeyi önlemek için yapılır. Fakat T_{cr} sıcaklığını istenilen değerde tutması açısından terleme kadar etkili değildir. Terlemenin ihmal edildiği II. ve IV. durumlarda bu etki görülmektedir. Bu şartlarda T_{cr} sıcaklığı diğer durumlara göre daha büyük çıkmıştır.
- Vazodilatasyon etkisinin ihmal edildiği III. durumda, vücudun sığağa karşı tek korunma mekanizması terleme olduğundan, terleme I. duruma göre daha çabuk devreye girmekte ve şiddeti çok hızlı olarak artmaktadır.
- Vazodilatasyon özellikle iç bölmeden gelen sıcak sinyallerle aktive edilir. I. durumda terleme olmasına rağmen iç bölmeden gelen sıcak sinyaller doğrultusunda vazodilatasyon ile kan debisi yaklaşık 5.2 kat artırılmıştır. Sadece vazodilatasyon etkilerinin olduğu II. durumda ise bu oran yaklaşık 13.3 kattır.
- Terleme etkisinin ihmal edildiği (II. ve IV.) durumlarda, T_{sk} ve T_{cr} sıcaklıklarında daha hızlı artış olmaktadır. Bu sonuç vücudun ısı dengesini koruması açısından terlemenin, damarlarda vazodilatasyona oranla daha etkili bir mekanizma olduğunu göstermektedir.

7. KAYNAKLAR

1. ASHRAE, (1993). ASHRAE handbook – Fundamentals, chapter 37, Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
2. Aybers, N. (1978). *Isıtma, havalandırma ve iklim tesisleri*. Uçer Matbaacılık, 9-25s.
3. ASHRAE, (1989). ASHRAE handbook – Fundamentals, chapter 8, Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
4. <http://www.innova.dk/files/pdf/Thermal%20Booklet.pdf>
5. Kaynaklı, Ö., Kılıç, M. (2003). Titremenin insan fizyolojisine etkisi ve vazokonstriksiyon ile karşılaştırılması. *Mühendis ve Makina Dergisi*, Cilt 44, Sayı 527, s.30-40.
6. Chaffee, E.E., Greisheimer, E.M. (1964). *Basic Physiology and Anatomy*. J.B. Lippincott Comp., Philadelphia, Montreal.
7. <http://www.gata.edu.tr/temelbilimler/biyokimya/seminer/hipotalamus.doc>
8. <http://www.genetikbilimi.com/gen/hipofiz.htm>
9. http://saglik.tr.net/genel_saglik_yaz_kalp.shtml
10. <http://www.isnet.net.tr/saglik/guncel/derimiz.asp>
11. <http://www.ott.doe.gov/coolcar/strategies.html>
12. Butera, F.M. (1998). Chapter 3- Principles of thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.2, pp.39-66.

13. Candas, V. (1999). The thermal environment and its effects on human. *Assessment of Thermal Climate in Operator's Cab*. Seminar in Florence, November 18-19, pp.7-13.
14. <http://www.sualti.net/yazilar/hipotermi.htm>
15. Aizawa, S., Cabanac, M. (2000). Temperature gradient across the skin's layer has no influence on local skin vasomotor responses. *Journal of Thermal Biology*, Vol.25, pp.313-316.
16. <http://www.cmpg.unibe.ch/pdf/Adaptation%202%2004.pdf>
17. Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological response-Part 1. *ASHRAE Transactions*, Vol.77, pp.247-262.
18. Kaynaklı, Ö., Ünver, Ü., Kılıç, M. (2003). Evaluating thermal environments for sitting and standing posture. *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, Vol.30, Issue 8, pp. 1179-1188.
19. McCullough, E.A., Jones, B.W., Tamura, T. (1989). A data base for determining the evaporative resistance of clothing. *ASHRAE Transactions*, Vol.95, No.2, pp.316-328.