Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 25, 1, 9-16, 2005
J. of Thermal Science and Technology
©2005 TIBTD Printed in Turkey
ISSBN 1300-3615

ÇEŞİTLİ METABOLİK AKTİVİTE DÜZEYLERİ İÇİN ISIL KONFOR VE ÜRETKENLİĞİN SÜREKLİ REJİM ENERJİ DENGESİ MODELİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

İbrahim ATMACA, Ömer KAYNAKLI ve Abdulvahap YİĞİT
Uludağ Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü,16059 Görükle Kampusü Bursa
atmaca@uludag.edu.tr, kaynakli@uludag.edu.tr, avahap@uludag.edu.tr

(Geliş Tarihi: 13. 08. 2004)

Özet: İş verimini ve üretkenliği etkileyen en önemli etkenlerden biri de şüphesiz ısıl konfordur. İnsan vücudu bulunduğu ortamda üretmiş bulunduğu metabolik enerjiyi atarak çevresiyle ısıl olarak denge konumuna geçer ve vücut iç bölme sıcaklığı korunmuş olur. Bu çalışmada, sürekli rejim enerji dengesi modeli ile oluşturulan simülasyon vasıtasıyla, belirli ortam koşullarında vücuttan atılan duyulur, gizli ve solunum ısı kayıpları tespit edilerek, vücut üzerindeki ısıl yük tespit edilmiş ve bu sayede çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde çalışan insanlar için tahmini ortalama oy (PMV) indeksi ile ısıl duyumun tahmini yapılmıştır. Bununla birlikte, ortamdan memnun olmayanların yüzdesi (PPD) tahmin edilmiş ve ortam koşullarının üretkenlik üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak istenilen ortam sıcaklığının çalışanın aktivite düzeyine göre değişkenlik gösterdiği, ısıl ortamın üretkenliği etkilediği ve artan ortam sıcaklığı ile vücuttan atılan gizli ısı ile solunum ısı kayıplarının toplam ısı kaybı içerisindeki oranının giderek yükseldiği tespit edilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Isıl konfor, Sürekli rejim enerji dengesi, Metabolik enerji, Üretkenlik

THE EVALUATION OF THERMAL COMFORT AND PRODUCTIVITY FOR VARIOUS METABOLIC ACTIVITY LEVELS WITH STEADY STATE ENERGY BALANCE MODEL

Abstract: Thermal comfort, without any doubt, is one of the most important factors effecting the labor efficiency and productivity. Human body keeps thermal balance with the surroundings, by dissipating the generated metabolic energy, and maintains the deep body temperatures. In this study, the steady – state energy balance method is implemented to a recently developed simulation program to determine the thermal load on the body with the estimation of sensible heat loss, latent heat loss and respiratory heat loss and so, thermal comfort for various workers' metabolic activity levels are evaluated with the predicted mean vote (PMV) index. Moreover, the predicted percentage of dissatisfied (PPD) is estimated and the effects of environmental parameters on productivity are investigated. Consequently, it is determined that the desired environment temperature changes with worker's metabolic activity level, productivity appeared to be affected by the thermal environment, and the percentage of latent and respiratory heat losses from the body increase gradually with increasing ambient air temperature.
Keywords: Thermal comfort, Steady–state energy balance, Metabolic energy, Productivity

SEMBOLLER

A_D	DuBois yüzey alanı, m^2
C	Taşınımla ısı kaybı oranı, W/m^2
E	Buharlaşma ile ısı kaybı oranı, W/m^2
f_{cl}	Giysi alan faktörü, [-]
h	Bileşik ısı geçiş katsayısı, W/m^2K
h_c	Taşınımla ısı geçiş katsayısı, W/m^2K
h_e	Buharlaşma ile ısı geçiş katsayısı, W/m^2K
h_r	Işınımla ısı geçiş katsayısı, W/m^2K
I_{cl}	Giysi ısıl direnci, clo
i_{cl}	Giysi ısıl geçirgenlik verimi, [-]
L	Vücut üzerindeki ısıl yük oranı, W/m^2
LR	Lewis oranı, °C/kPa
M	Metabolik enerji üretimi oranı, W/m^2
P	Üretkenlik, %
p_a	Ortam havası su buharı basıncı, kPa
$P_{deri,s}$	Deri sıcaklığındaki su buharının doyma basıncı, kPa
PMV	Tahmini ortalama oy indeksi, [-]
PPD	Memnuniyetsizlik yüzdesi, %
Q	Isı, W/m^2
R	Işınımla ısı kaybı oranı, W/m^2
R_{cl}	Giysi ısıl direnci, m^2K/W
$R_{e,cl}$	Giysi buharlaşma direnci, m^2kPa/W
t	Sıcaklık, °C

V Hava hızı, m/s
w Deri ıslaklığı, [-]
W Mekanik iş oranı, W/m^2

Alt Simgeler

a Çevre ortam
cl Giysi
duy Duyulur
g Gerekli
H Hafif
max Maksimum
o Operatif
O Orta
r Işınım
rsw Terleme ile olan
sol Solunum

GİRİŞ

İnsan vücudu, kullandığı besin ve teneffüs edilen oksijen ile düşük sıcaklıklı ısı yayan ve mekanik iş üreten termodinamik bir sistem gibi ele alınabilir. Vücut tarafından üretilen ve çevreye atılan ısı miktarı insanın boyutları ve cinsiyetine bağlı olduğu gibi aktivite düzeyine ve yaşına da bağlıdır. 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 36.9 °C de tutmak için kompleks fizyolojik denetim mekanizmalarına sahiptir. Eğer 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 (Butera, 1998; McQuiston ve Parker, 1994).

Isıl konfor "ısıl çevreden memnun olunan düşünce hali", ergonomi ise "insanların anatomik özelliklerini, antropometrik karakteristiklerini, fizyolojik kapasite ve toleranslarını göz önünde tutarak, endüstriyel iş ortamındaki tüm faktörlerin etkisi ile oluşabilecek, organik ve psikososyal stresler karşısında, sistem verimliliği ve insan – makine – çevre temel yasalarını ortaya koymaya çalışan çok disiplinli bir araştırma ve geliştirme alanı" olarak tanımlanmaktadır (ASHRAE, 1993; Erkan, 1997). Konfor bir düşünce hali olduğu için ve çalışılan ortamın ısıl koşulları insan verimliliğini etkilediği için ısıl konfor ergonominin bir konusu olarak da ele alınabilir ve incelenebilir. Çünkü konforlu olmayan bir ortamda çalışan insan üzerindeki pozitif veya negatif yöndeki ısıl yük, dikkatin dağılmasına ve neticesinde performansın düşmesine sebep olabilir.

İnsan vücudu ısıl dengesi ve böylece ısıl konforu etkileyen parametreleri çevresel ve kişisel parametreler olmak üzere iki grup altında toplayabiliriz. Çevresel parametreler; ortam sıcaklığı, bağıl nemi, ortamdaki hava hızı ve ortamdaki sıcak yüzeylerden kaynaklanan ortalama ışınım sıcaklığıdır. Kişisel parametreler ise giyinme durumu ve metabolik aktivite düzeyidir (Havenith vd., 2002; Holz vd., 1996; McQuiston ve Parker, 1994). İstenilen iç ortam şartlarının oluşturulması için günümüzde, çalışılan ortamlarda ve konutlarda iklimlendirme sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Havanın şartlandırılması işlemi, iç ortamda istenilen hava kalitesini, hava sirkülasyonunu, nemi ve sıcaklığı sağlamak açısından önemlidir. Günümüzde iç ortam şartlarında yaşayan ve çalışan insanlar için hem sağlıklı hem de konforlu iç ortam şartları oluşturmak iklimlendirme sistemleri dizayn eden mühendislerin ve üreticilerin ilgilendiği bir konudur.

Yine de belirli bir ortam şartında tüm insanların kendilerini tamamen konforlu hissetmedikleri bilinen bir konudur. Konforu etkileyen çevresel parametrelerden sıcaklık belirli bir ortamda kolaylıkla ölçülebilir. Yine ortam bağıl nemi ölçülerek veya ölçülebilen değişkenler yardımı ile psikometrik diyagramdan tespit edilebilir. Hava hızı ve ortalama ışınım sıcaklığı da yaygın olarak kullanılan anemometreler ve glob termometreleri vasıtasıyla elde edilebilir. Fakat kişisel parametrelerin tespiti kısmen daha zordur. Kişisel parametrelerden giysi yalıtım değerleri ısıtılmış mankenler veya insanlar üzerinde yapılan deneysel sonuçlardan elde edilebilmektedir. İnsan üzerinde bulunan giysi tabakası ve özellikleri hem duyulur ısı kaybı hesabında kullanılan ısıl direnci hem de gizli ısı kaybı hesabında kullanılan buharlaşma direncini ve dolayısıyla insan vücudu üzerindeki ısıl yükü önemli derecede etkilemektedir. Çeşitli giysilerin ve giysi gruplarının ısıl ve buharlaşma dirençleri ile çeşitli durumlarda bunların değişimi birçok kaynakta verilmektedir (ASHRAE, 1993; McCullough vd., 1995; Havenith vd., 2002). Genellikle yazlık hafif giyimde ısıl direnç yaklaşık 0.5 – 0.6 clo (1 clo=0.155 m^2-K/W), kışlık giyimde ise 1 – 1.3 clo arasında değişmektedir (ASHRAE, 1993; Havenith vd, 2002).

Kişinin aktivitesine göre metabolizmanın ürettiği enerji değişmektedir. Metabolik enerji üretimini ifade eden birim "met" olup, dinlenme halindeki bir insanın metabolik hızı olarak tanımlanmıştır (1 met=58.2 W/m^2). Çeşitli aktiviteler için metabolik enerji üretimi değerleri Tablo 1' de verilmiştir. Ortalama yetişkin bir insanın ısı transfer yüzey alanı (Dubois yüzey alanı) yaklaşık 1.8 m^2 dir ve yaklaşık 106 W enerji üretir. Ortamın konforlu hissedilmesi için bu 106 W çevreye ısı kaybı olarak atılmalıdır. Kişisel parametrelerden metabolik enerji üretiminin tespitinde kullanılan metotlar ISO 8996 standardında belirtilmiştir. 3 temel metod mevcuttur. Bunlardan ilki aktivitenin veya işin şekline göre metabolik enerji üretimini veren tabloların kullanımıdır. İkinci metotta kalbin atış sayısı ile üretilen metabolik ısı enerjisi arasındaki lineer ilişkiden yararlanılır. Üçüncü yöntem direkt ve dolaylı olmak üzere ikiye ayrılır. Direkt yöntemde üretilen ısı enerjisi kalorimetre ile ölçülürken, dolaylı yöntemde kişinin oksijen tüketimi oranından yararlanılır ki bu dolaylı kalorimetre olarak isimlendirilir (Olesen ve Parsons, 2002; Havenith vd., 2002; ASHRAE, 1993).

Tablo 1. Çeşitli Aktiviteler için Metabolik Enerji Üretimi Değerleri (ASHRAE, 1993; Butera, 1998; McQuiston vd. 1994; Srinavin ve Mohamed, 2003; Havenith vd., 2002).

Aktivite	Enerji Üretimi (W/m^2)
Büro İşleri	
Daktilo yazma	65
Dosyalama, ayakta	80
Gezinme	100
Kaldırma, paketleme	120
İnşaat İşleri	
Tuğla örme	190
Boyama	120
Dinlenme	
Uyuma	40
Uzanma	45
Oturma	60
Atölye İşleri	
Testere vb. kullanma	105
Elektrik işleri	115 – 140
Ağır iş	235

Isıl konfor ile ilgili son yıllarda çeşitli yönlerde birçok çalışma yapılmıştır. Butera (1998), ısıl konfora etki eden faktörler ile vücut ve çevresi arasındaki ısı ve kütle transferinde kullanılan denklemleri detaylı olarak ele almış, çeşitli çevresel ve kişisel parametrelere bağlı olarak PMV değerlerini grafikler halinde sunmuştur. Srinavin ve Mohamed (2003) ile Mohamed ve Srinavin (2002) PMV indeksi ile ısıl konfor ile üretkenlik arasındaki etkileşimi incelemiş, daha önce bu yönde yapılan çalışmaların sonuçlarını istatistiki olarak inceleyerek denklemler elde etmiş ve yapılan deneyler ile elde ettikleri istatistiki sonuçları karşılaştırmışlardır. Havenith vd (2002) ısıl konfora etki eden kişisel parametreleri incelemiş, özellikle vücudun hareketli olması veya hava hareketlerinin olması durumunda giysi yalıtımının nasıl değiştiğini ele almışlardır. Bahsedilen çalışmada metabolik enerji üretiminin tayininde kullanılan metotlar da detaylı olarak açıklanmıştır. Olesen ve Parsons (2002) ısıl konforla ilgili ISO standartlarını ve halen devam eden çalışmaları detaylı olarak ele almıştır. Yiğit (1999), yaptığı çalışmada vücudu 16 parçaya ayırarak iki boyutlu bir simülasyon hazırlamış ve çeşitli giyim durumları için vücuttan olan ısı kayıpları ile vücut parçası sıcaklıklarını tahmin etmeye çalışmıştır. Kaynaklı vd. (2003), insanın ayakta durma ve oturma pozisyonlarına bağlı olarak vücut kısımlarından olan ısı kayıplarını tespit etmiş ve ortam sıcaklığının PPD üzerine etkisini incelemiştir.

Bu çalışmada, sürekli rejim enerji dengesi metodu ile oluşturulan simülasyon vasıtasıyla belirli ortam koşullarında vücuttan atılan duyulur, gizli ısılar ile solunum ısı kaybı tespit edilerek vücut üzerindeki ısıl yük tespit edilmiş ve tahmini ortalama oy indeksi (PMV) ile ısıl ortamın değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmada çeşitli metabolik enerji üretimi değerlerine sahip büro işleri için ortam koşullarının PMV üzerine etkisi tespit edilmiş, ortamdan memnun olmayanların yüzdesi (PPD) tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca hafif ve orta düzey inşaat işlerinde, ısıl ortamın çalışanların üretkenliği üzerine tesiri de ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, istenilen ortam sıcaklığının aktivite düzeyine göre değiştiğini ve çalışanın üretkenliğini etkilediğini göstermesi bakımından oldukça önemlidir.

MATEMATİKSEL METOD

Sürekli rejim enerji dengesi modeli (Fanger Modeli) vücudun ısıl dengede olduğunu ve enerji depolamasının ihmal edilebileceğini kabul eden bir modeldir. Bu kabule göre Termodinamiğin I. kanunu yazılırsa;

$$M - W = Q_{duy} + Q_{gizli} + Q_{sol} = (C + R) + E_{deri} + (C_{sol} + E_{sol}) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Vücuttan olan duyulur ısı kaybı, deri sıcaklığı ve operatif sıcaklık ile giysi ısıl direnci ve bileşik ısı geçiş katsayısına bağlı olarak;

$$t_o = (h_r.t_r + h_c.t_a)/(h_r + h_c) \quad (2)$$

$$h = h_c + h_r \quad (3)$$

$$Q_{duy} = C + R = (t_{deri} - t_o)/[R_{cl} + (1/f_{cl}.h)] \quad (4)$$

şeklinde bulunabilir. Bu ifadelerde ışınımla ısı geçiş katsayısı iç ortam sıcaklıklarında hemen hemen sabittir ve değeri 4.7 W/m^2K olarak alınabilmektedir (ASHRAE, 1993). Isı taşınım katsayısı h_c;

Eğer $2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \rangle 12.1\sqrt{V}$ ise;

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad (5)$$

Eğer $2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \langle 12.1\sqrt{V}$ ise;

$$h_c = 12.1\sqrt{V} \quad (6)$$

bağıntıları ile tespit edilebilmektedir. Giysi alan faktörü ise;

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0.2I_{cl} & I_{cl} \langle 0.5clo \\ 1.05 + 0.1I_{cl} & I_{cl} \rangle 0.5clo \end{cases} \quad (7)$$

şeklinde tespit edilebilmektedir. Giysi yüzeyi sıcaklığı da;

$$t_{cl} = 35.7 - 0.0275(M - W) - R_{cl}\begin{bmatrix}(M-W)\\ -3.05[5.73 - 0.007(M-W) - p_a]\\ -0.42[(M-W) - 58.15]\\ -0.0173M(5.87 - p_a)\\ -0.0014M(34 - t_a)\end{bmatrix} \quad (8)$$

bağıntısı ile elde edilebilmektedir (ASHRAE, 1993; Holz vd.,1997; Butera, 1998).

Isıl olarak konforun sağlanması için gerekli deri sıcaklığı ve gerekli olan terleme nedeniyle gerçekleşen buharlaşma ısı kaybı şu şekilde ifade edilmektedir;

$$t_{deri,g} = 35.7 - 0.0275(M - W) \quad (9)$$

$$E_{rsw,g} = 0.42(M - W - 58.15) \quad (10)$$

Deriden buharlaşma ile olan gizli ısı kaybı ise deri yüzeyi ile çevre ortam arasındaki su buharı basıncı farkına, giysi tabakasının buharlaşma ile ısı geçiş direncine, buharlaşma ile ısı geçiş katsayısı ve deri ıslaklığına bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$Q_{gizli} = E_{deri} = \frac{w(p_{deri,s} - p_a)}{R_{e,cl} + 1/(f_{cl}.h_e)} \quad (11)$$

Bu ifadede deri ıslaklığı;

$$w = 0.06 + 0.94\frac{E_{rsw,g}}{E_{max}} \quad (12)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu ifadedeki maksimum buharlaşma ile ısı geçişi, derinin tamamen ıslak olması yani w=1 için denklem (11) den bulunan değere eşittir. Giysi tabakasının buharlaşma ile ısı geçişine direnci ve buharlaşma ile ısı geçiş katsayısı ise sırasıyla;

$$R_{e,cl} = R_{cl} / i_{cl}.LR \quad (13)$$

$$h_e = h_c.LR \quad (14)$$

ifadeleriyle tanımlanmaktadır. Bu ifadelerde Lewis Oranı (LR) iç ortam koşulları için yaklaşık 16.5 °C/kPa, giysilerin buhar geçirgenlik verimi i_{cl} ise iç ortamda kullanılan giysiler için 0.34 olarak alınabilmektedir (ASHRAE, 1993).

Solunum vasıtasıyla da vücuda giren havaya taşınım ve buharlaşma yoluyla duyulur ve gizli ısı transferi olur. Solunumla olan ısı kaybı oldukça önemlidir, çünkü çevre koşularında teneffüs edilen hava hemen hemen vücut kor sıcaklığında ve doymuş olarak dışarıya atılır. Solunum ile meydana gelen duyulur ve gizli ısı transferi miktarı;

$$C_{sol} + E_{sol} = \begin{bmatrix}0.0014M(34 - t_a)\\ +0.0173M(5.87 - p_a)\end{bmatrix} / A_D \quad (15)$$

ifadesiyle bulunabilir (ASHRAE, 1993).

Isıl konforun tayininde, bahsedilen 4 çevresel parametre ile 2 kişisel parametrenin etkisini göz önüne alarak tek bir değer ile değerlendirme yapabilmemizi sağlayan ortalama tahmini oy (PMV) indeksi kullanılmıştır. PMV indeksi 7 noktalı sayısal bir ölçektir ve bu noktalar şu şekilde ifade edilir;

PMV=+3	sıcak
PMV=+2	ılık
PMV=+1	ılıkça
PMV=0	nötr
PMV=-1	serince
PMV=-2	serin
PMV=-3	soğuk

$$PMV = [0.303\exp(-0.036M) + 0.028]L \quad (16)$$

Bu ifadede L değeri insan vücudu üzerindeki ısıl yükü göstermektedir ve sürekli rejim enerji dengesi (denklem 1) yardımıyla;

$$L = M - W - (Q_{duy} + Q_{gizli} + Q_{sol}) = M - W - \begin{pmatrix}C_{deri} + R_{deri} + E_{deri}\\ +C_{sol} + E_{sol}\end{pmatrix} \quad (17)$$

şeklinde tayin edilebilmektedir (ASHRAE, 1993; Holz vd., 1997; Srinavin ve Mohamed, 2003; Butera, 1998).

PMV indeksi geniş bir insan grubunu içeren deneysel çalışmalar sonucu tespit edilmiş olsa bile aynı ortam koşullarında farklı konfor algılarının ortaya çıktığı görülmüş ve ısıl ortamdan memnun olmayanların yüzdesi;

$$PPD = 100 - 95\exp\begin{bmatrix}-(0.03353PMV^4\\ +0.2179PMV^2)\end{bmatrix} \quad (18)$$

şeklinde tespit edilmiştir. Formülde görüldüğü üzere PMV nin nötr olduğu durumda bile ısıl ortamdan %5 lik bir memnuniyetsizlik söz konusudur (ASHRAE, 1993; Butera, 1998).

Srinavin ve Mohamed (2003) inşaat işçilerinin üretkenliğinin ısıl ortama bağlı olarak değişimini, çok çeşitli kaynaklardan topladığı deneysel sonuçların istatistiki analizi sonucu denklemlere dökmüştür. Hafif (M=120 W/m^2) ve orta düzey (M=190 W/m^2) işler için PMV ye bağlı olarak üretkenliğin değişimi bahsedilen çalışmada;

$$P_H = 100 - 0.79PMV - 1.84(PMV)^2 \quad (19)$$

$$P_O = 100 + 1.30PMV - 2.27(PMV)^2 \quad (20)$$

şeklinde tayin edilmiş ve regresyon katsayıları (r^2) sırasıyla 0.97 ve 0.94 olarak verilmiştir.

SİMÜLASYON ve ÇÖZÜM

Yazılım COMPAQ VISUAL FORTRAN 6 programı kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonda kullanılan çevresel ve kişisel parametreler Tablo 2' de özetlenmiştir. Bu tablodan da görüldüğü üzere ısıl ortam sıcaklığı 8 ile 34 °C arasında 2 °C aralıkla değiştirilmiş ve ortalama ışınım sıcaklığı da ortam sıcaklığına eşit kabul edilmiştir. Konforlu ortam sıcaklıkları ve bu bölgeye yakın sıcaklıklarda nemin konfor üzerine etkisi oldukça düşüktür (Butera, 1998; Olesen ve Parsons, 2002). EN ISO 7730 standardında kabul edilebilir bağıl nem için aralık %30 - %70 olarak verilmiştir (Olesen ve Parsons, 2002). Bu çalışmada bağıl nem %50 olarak kabul edilmiştir. İç ortamdaki hava hızı ise iklimlendirilen bir ortam için yaklaşık 0.2 m/s olarak kabul edilmiştir. Çalışmada yazlık hafif giysiler (pantolon ve kısa kollu gömlek) kullanıldığı kabul edilmiştir ve ısıl direnci yaklaşık 0.57 clo olarak alınmıştır (ASHRAE, 1993). Çalışmada büro ve inşaat çalışanları için inceleme yapılmış ve aktiviteye bağlı olarak simülasyonda kullanılan metabolik enerji üretimi değerleri Tablo 1' den alınmıştır. Yapılan mekanik iş ise üretilen metabolik enerjinin %10' u kadar alınmıştır (Butera, 1998; Srinavin ve Mohamed, 2003).

Simülasyon çeşitli giriş ve çıkış verilerinden oluşmaktadır. Giriş verilerini bahsedilen çevresel ve kişisel parametreler oluşturmaktadır. Çıkış verilerini ise hesap yöntemleri matematiksel metot kısmında verilen duyulur ve gizli ısı kayıpları ile solunum ısı kayıpları, tahmini ortalama oy (PMV), memnuniyetsizlik yüzdesi (PPD) ve elde edilebilen üretkenlik değerleri oluşturmaktadır.

Tablo 2. Simülasyonda kullanılan çevresel ve kişisel parametreler.

Parametre	Değer	Açıklama
Çevresel Parametreler		
Ortam Sıcaklığı	8-34 °C	2 °C aralıkla
Ort. Işınım Sıcaklığı	8-34 °C	$t_r=t_a$
Bağıl Nem	%50	sabit
Hava hızı	0.2 m/s	sabit
Kişisel Parametreler		
Giysi yalıtımı	0.57 clo	yazlık hafif giyim
Metabolik enerji üretimi	bkz. Tablo1	büro ve inşaat işleri

BULGULAR ve TARTIŞMA

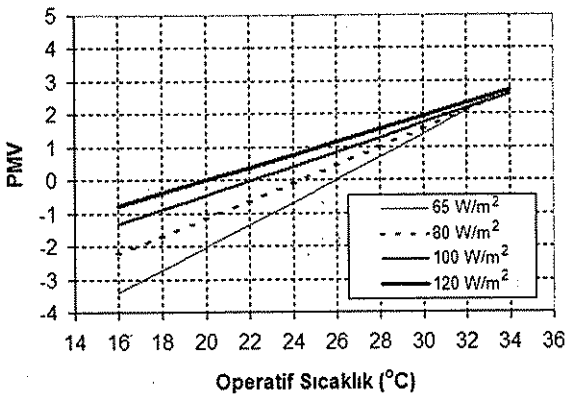
İlk inceleme çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde bulunan büro çalışanları için yapılmıştır. Çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde bulunan büro çalışanları için operatif sıcaklığa bağlı olarak PMV indeksinin değişimi Şekil 1' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi PMV' yi nötr yapan operatif sıcaklık değeri kişinin metabolik enerji üretimine bağlı olarak değişmektedir. Yine grafikten görülebileceği üzere artan metabolik enerji üretimine bağlı olarak eğrinin eğimi azalmaktadır. Yani aynı operatif sıcaklık aralığı için PMV değeri daha az bir değişim göstermektedir. 65 W/m^2 metabolik enerji üretimi için PMV değeri -4 ile +3 arasında değişirken, aynı operatif sıcaklık değeri aralığında 120 W/m^2 metabolik enerji üretimi durumunda PMV değeri -1 ile +3 arasında değişmektedir.

Tablo 3. Çeşitli metabolik aktivite düzeyleri için simülasyondan elde edilen sonuçlar.

Metabolik Enerji (W/m^2)	PMV	Sıcaklık (°C)	$Q_{duyulur}$ (W/m^2)	Q_{gizli} (W/m^2)	$Q_{solunum}$ (W/m^2)	Mekanik İş (W/m^2)	L (W/m^2)
	-1	23.0	62.54	10.67	3.34	6.5	-18.05
65	0	26.0	45.60	9.90	3.02	6.5	0
	+1	29.0	28.71	9.07	2.67	6.5	18.06
	-1	20.5	74.55	9.05	4.42	8.0	-23.21
80	0	24.4	52.60	15.4	3.93	8.0	0
	+1	28.0	32.25	14.41	3.43	8.0	21.91
	-1	17.5	88.67	23.51	5.96	10	-28.14
100	0	22.2	62.17	22.61	5.27	10	0
	+1	27.0	35.10	21.42	4.47	10	29.0
	-1	14.5	102.79	30.71	7.64	12	-33.14
120	0	20.0	71.7	29.70	6.72	12	0
	+1	25.5	40.77	28.56	5.68	12	33

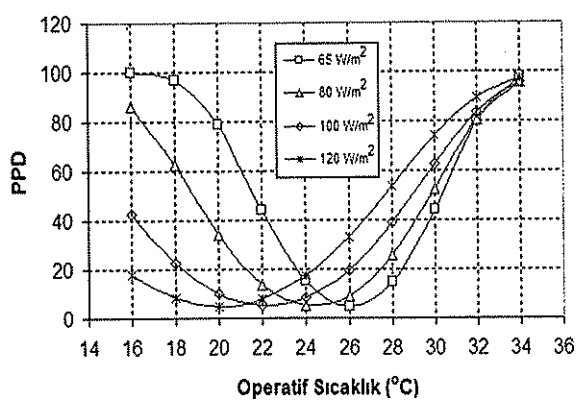
Çeşitli metabolik enerji üretimi için PMV değerini -1, 0 ve +1 yapan operatif sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıklarda vücuttan olan duyulur, gizli ve solunum ile olan ısı kayıpları ile vücut üzerindeki ısıl yük Tablo 3' de verilmiştir. Hem Şekil 1 hem de Tablo 3' den görülebileceği üzere PMV değerini nötr yapan ortam sıcaklığı değeri aktiviteye göre değişmektedir. 65 W/m^2 aktivite düzeyinde daktilo kullanan bir kişi için nötr ortam sıcaklığı yaklaşık 26 °C iken 120 W/m^2 gibi yüksek bir aktivite düzeyine sahip kaldırma ve

paketleme işi yapan bir büro çalışanı için nötr ortam sıcaklığı yaklaşık 20 °C' dir. Yine mevcut tablodan görülebileceği üzere metabolik ısı enerjisi üretimine bağlı olarak değişik sıcaklıklarda vücuttan atılan toplam ısı, üretilen ısıyı aşmakta ve vücut üzerindeki ısıl yük ve dolayısıyla PMV indeksi negatif değerler almakta veya bazı sıcaklıklarda ise vücutta üretilen ısı çevreye atılamamakta ve dolayısıyla vücut üzerindeki ısıl yük ve PMV indeksi pozitif değerler almaktadır.



Şekil 1. Çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde bulunan büro çalışanları için operatif sıcaklığa bağlı olarak PMV indeksinin değişimi.

Çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde bulunan büro çalışanları için operatif sıcaklığa bağlı olarak PPD' nin değişimi Şekil 2' de verilmiştir. PMV değerinin 0 olduğu nötr ortam şartlarında dahi kişisel farklılıklara bağlı olarak yaklaşık %5 civarında ortam şartlarından memnun olmayan bir yüzde söz konusudur. Yine metabolik aktivite düzeyine bağlı olarak nötr sıcaklıktan sapmalar başladıkça ortamdan memnun olmayanların yüzdesi artmaktadır.



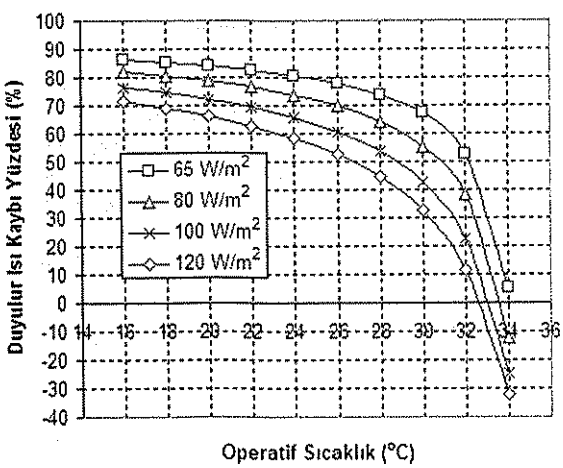
Şekil 2. Çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde bulunan büro çalışanları için operatif sıcaklığa bağlı olarak PPD nin değişimi.

Çeşitli metabolik enerji üretimi değerleri için operatif sıcaklığa bağlı olarak vücuttan olan toplam ısı kaybı değerleri Tablo 4' de verilmiştir. Tablodan görülebileceği üzere artan operatif sıcaklık ile vücuttan olan ısı kaybı ortam ve deri yüzey sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının azalmasına ve dolayısıyla duyulur ısı kaybının değerinin önemli mertebelerde düşmesine bağlı olarak azalmaktadır.

Tablo 4. Çeşitli metabolik enerji üretimi değerleri için operatif sıcaklığa bağlı olarak vücuttan olan toplam ısı kaybı değerleri.

	Vücuttan Atılan Toplam Isı (W/m²)			
Operatif Sıcaklık (°C)	M=65 W/m²	M=80 W/m²	M=100 W/m²	M=120 W/m²
16	118.00	121.88	127.05	132.23
18	106.23	110.05	115.16	120.29
20	94.39	98.18	103.24	107.9
22	82.52	86.26	91.25	96.25
24	70.57	74.27	79.20	84.14
26	58.58	62.22	67.08	71.94
28	46.51	50.09	54.88	59.69
30	34.36	37.90	42.61	47.33
32	22.31	25.24	30.21	34.89
34	9.824	13.23	17.78	22.35

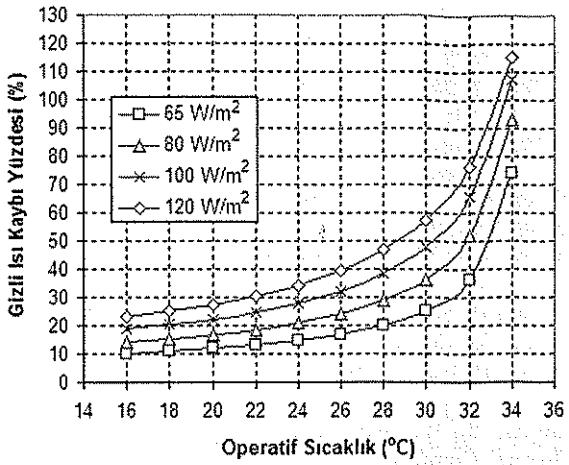
Vücuttan olan toplam ısı kaybı içerisindeki duyulur ısı kaybı yüzdesinin çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde operatif sıcaklık ile değişimi Şekil 3' de verilmiştir. Artan operatif sıcaklık ile bütün aktivite düzeylerinde duyulur ısı kaybı yüzdesinin düştüğü görülebilmektedir. Hatta yüksek operatif sıcaklıklarda vücut yüzey sıcaklığının ortam sıcaklığından düşük olması neticesinde duyulur ısı kaybının negatif çıktığı da Şekil 3' den görülebilmektedir.



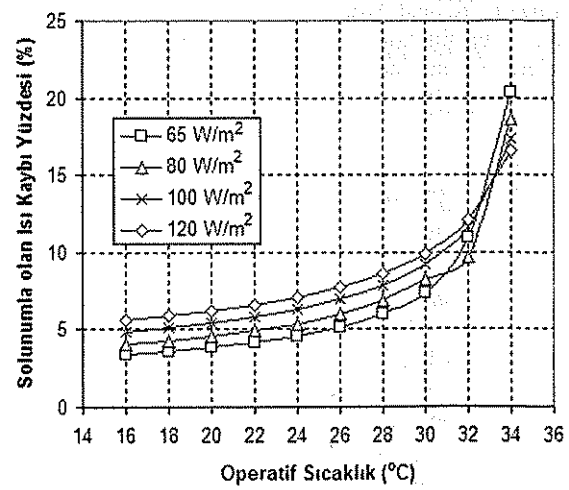
Şekil 3. Değişik metabolik aktivite düzeyleri ve operatif sıcaklıklarda vücuttan olan duyulur ısı kaybının toplam ısı kaybı içindeki yüzdesi.

Artan operatif sıcaklık ile vücuttan olan duyulur ısı kaybının azalması neticesinde gizli ve solunum ile olan ısı kaybı önem kazanmaktadır. Vücut, iç bölme sıcaklığını koruyabilmek için ter salgılamakta ve gizli ısı kaybını arttırmaktadır. Değişik metabolik aktivite düzeylerinde operatif sıcaklığa bağlı olarak vücuttan olan gizli ve solunum ile olan ısı transferinin toplam ısı kaybı içerisindeki yüzdesi sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5' de verilmektedir. Artan operatif sıcaklık ile bütün metabolik aktivite düzeylerinde vücuttan olan toplam ısı kaybı içerisindeki gizli ısı kaybı yüzdesinin önemli derecede arttığı Şekil 4' den görülebilmektedir. Yine

artan operatif sıcaklık ile denklem (15) ile hesaplanan solunum ısı kaybı değerine göre vücuttan olan toplam ısı kaybı içerisindeki solunum ısı kayıpları yüzdesi de bir miktar artmaktadır.



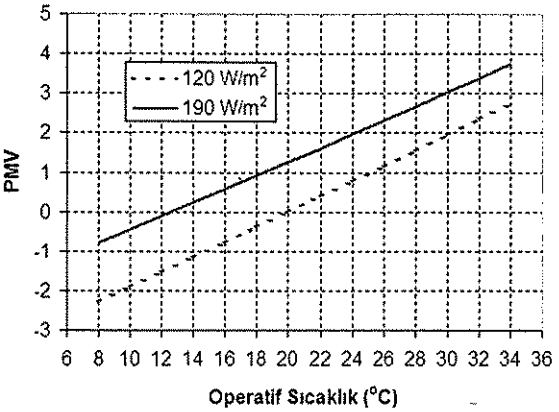
Şekil 4. Değişik metabolik aktivite düzeyleri ve operatif sıcaklıklarda vücuttan olan gizli ısı kaybının toplam ısı kaybı içindeki yüzdesi.



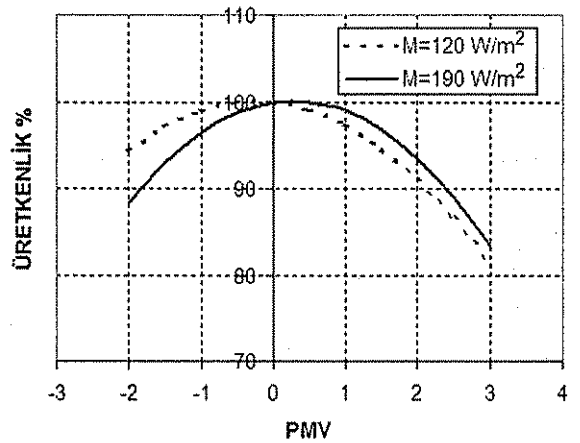
Şekil 5. Değişik metabolik aktivite düzeyleri ve operatif sıcaklıklarda vücuttan solunum ile olan ısı kaybının toplam ısı kaybı içindeki yüzdesi.

İkinci inceleme çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde çalışan inşaat çalışanları için yapılmıştır. Yaklaşık 190 W/m^2 metabolik enerji üretimi sağlayan tuğla örme işi ile 120 W/m^2 metabolik enerji üretimi sağlayan boyama işi göz önüne alınarak operatif sıcaklığa bağlı olarak PMV' nin değişimi Şekil 6' da verilmiştir. 120 W/m^2 metabolik aktivite düzeyinde çalışan için nötr ortam sıcaklığı yaklaşık 20 °C iken artan metabolik aktivite düzeyi ile nötr ortam sıcaklığının düştüğü, 190 W/m^2 metabolik aktivite düzeyi için nötr ortam sıcaklığının yaklaşık 12 °C olduğu Şekil 6' dan görülebilmektedir.

Denklem (19) ve denklem (20)' den elde edilen hafif (120 W/m^2) ve orta düzey (190 W/m^2) metabolik aktivite düzeyinde çalışanlar için PMV' ye bağlı olarak üretkenliğin yüzde olarak değişimi Şekil 7' de verilmiştir. PMV' nin nötr olması halinde maksimum üretkenliğin sağlandığı, nötr değerden pozitif ve negatif değerlere gidildikçe üretkenliğin yüzde olarak azaldığı ve ısıl ortam şartlarının üretkenliği önemli derecede etkilediği grafikten görülebilmektedir.



Şekil 6. Çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde bulunan inşaat çalışanları için operatif sıcaklığa bağlı olarak PMV indeksinin değişimi.



Şekil 7. Çeşitli metabolik aktivite düzeylerinde bulunan inşaat çalışanları için PMV indeksine bağlı olarak üretkenliğin değişimi.

SONUÇ VE İRDELEME

Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

1. Belirli bir ortam tüm insanlar için konforlu değildir. İnsanın yaptığı işe göre ürettiği metabolik ısı enerjisi konfor hissini önemli derecede etkilemektedir. PMV indeksini nötr yapan operatif sıcaklık değeri 65 W/m^2, 80 W/m^2, 100 W/m^2, 120 W/m^2 ve 190 W/m^2 metabolik enerji üretimi değerleri için sırasıyla yaklaşık 26 °C, 24.4 °C, 22.2 °C, 20 °C ve 12 °C olarak tespit edilmiştir. Bu sıcaklıklarda bile yaklaşık %5 lik bir yüzde ısıl ortam şartlarından memnuniyetsizlik duymaktadır.
2. Vücudun ısıl dengeyi sağlamasında atılan gizli ısı oldukça önemlidir. Özellikle yüksek operatif sıcaklıklarda vücut ile ortam arasındaki sıcaklık farkının düşmesi nedeni ile duyulur ısı kaybı

azalmakta ve dolayısıyla vücut çevresi ile ısıl dengeyi sağlayabilmek için fizyolojik denetim mekanizmalarını devreye sokarak ter salgılamakta ve atılan gizli ısı oranı toplam ısı kaybının önemli bir yüzdesini oluşturmaktadır. Artan operatif sıcaklık ile gizli ısı kaybının toplam ısı kaybı içerisindeki yüzdesi artmaktadır.

3. Isıl ortam şartları çalışanların üretkenliğini de önemli derecede etkilemektedir. PMV indeksinin nötr değerden sapması ile üretkenlik yüzdelerinde önemli derecede düşüşler meydana gelmektedir.

KAYNAKLAR

ASHRAE, Physiological Principles and Thermal Comfort, *ASHRAE Fundamentals*, pp39, 1993.

Butera, F. M., Chapter – 3 Principles of Thermal Comfort, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2, 39 – 66, 1998.

Erkan, N., *Ergonomi*, s.295, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları No: 373, Ankara, 1997.

Havenith, G., Holmer, I. and Parsons, K., Personal Factors in Thermal Comfort Assessment: Clothing Properties and Metabolic Heat Production, *Energy and Buildings*, 34, 581 – 591, 2002.

Holz, R., Hourigan, A., Sloop, R., Monkman, P. and Krarti, M., Effects of Standard Energy Conserving Measures on Thermal Comfort, *Building and Environment*, 32(1), 31 – 43, 1997.

Kaynakli, Ö., Unver, U. and Kilic, M., Evaluating Thermal Environments for Sitting and Standing Posture, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 30(8), 1179 – 1188, 2003.

McCullough, E. A., Jones, B. W. and Tamura, T., A Data Base for Determining the Evaporative Resistance of Clothing, *ASHRAE Transactions*, 94(1), 32 – 51, 1989.

McQuiston, F. C. and Parker, J. D., *Heating, Ventilating, and Air Conditioning Analysis and Design*, pp.742, John Wiley & Sons, New York, 1994.

Mohamed, S. and Srinavin, K., Thermal Environment effects on Construction Workers' productivity, *Work Study*, 51(6), 297 – 302, 2002.

Olesen, B. W. and Parsons K. C., Introduction to Thermal Comfort Standards and to the Proposed New Version of EN ISO 7730, *Energy and Buildings*, 34, 537 – 548, 2002.

Srinavin, K. and Mohamed, S., Thermal Environment and Construction Workers' Productivity: Some Evidence from Thailand, *Building and Environment*, 38, 339 – 345, 2003.

Yiğit, A., Combining Thermal Comfort Models, *ASHRAE Transactions*, 105(1), 149 – 158, 1999.