

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSAN DERİSİ VE İTFAİYECİ GİYSİSİNDEN
OLUŞAN SİSTEMİN ISIL MODELLENMESİ**

Deniz YILMAZ

Haziran, 2018

İZMİR

İNSAN DERİSİ VE İTFAİYECİ GİYSİSİNDEN OLUŞAN SİSTEMİN ISIL MODELLENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Termodinamik Yüksek Lisans Programı

Deniz YILMAZ

Haziran, 2018

İZMİR

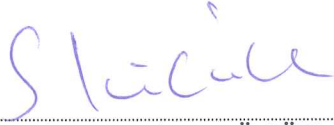
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

DENİZ YILMAZ, tarafından DOÇ. DR. CAN ÖZGÜR ÇOLPAN yönetiminde hazırlanan “İNSAN DERİSİ VE İTFAİYECİ GİYSİSİNDEN OLUŞAN SİSTEMİN ISIL MODELLENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN

Yönetici



Prof. Dr. Serhan KÜÇÜKA

Jüri Üyesi



Dr. Öğr. Üye Hadi GANJEHSARABI

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Latif SALUM

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince her zaman yanımda olan, benden bilgilerini ve tecrübelerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN'a teşekkür ederim.

Tez süresince benden yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. M. Serhan KÜÇÜKA'ya teşekkür ederim.

En önemlisi, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen anne ve babama, özellikle de erkek kardeşim Ozan YILMAZ'a sonsuz destekleri için minnettarım.

Deniz YILMAZ

İNSAN DERİSİ VE İTFAİYECİ GİYSİSİNDEKİ OLUŞAN SİSTEMİN ISIL MODELLENMESİ

ÖZ

Bu çalışmada insan derisindeki ve itfaiyeci giysisindeki ısı ve nem geçişi incelenmiştir. Öncelikle dört katmandan oluşan insan derisi için, farklı çevresel koşullar altındaki sıcaklık dağılımı bulunmuştur. Bu modelde deri yüzeyinden ışıınım, taşınım ve terleme mekanizmaları ile ısı geçişi olmaktadır. Bulunan sıcaklık dağılımına göre dokulardaki hasar oranı incelenmiştir. Sonrasında oluşturulan bu modele nem geçişi de eklenerek model genişletilmiştir. Sıcaklık dağılımı ve derişim dağılımı bulunmuştur. Ayrıca ısı parametrelerinin ve çevre sıcaklığının değiştirilmesi ile cilt içerisindeki sıcaklık ve derişim dağılımının etkilerini incelemek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yapılan üçüncü modelde ise insan derisi için oluşturulan modele üç katmandan oluşan bir itfaiyeci giysisi eklenmiştir. Giysi katmanları arasında ve insan derisi yüzeyi ile giysi arasında hava katmanı bulunmaktadır. Modelde sıcak gazlara maruz kalınması durumundaki ısı geçişi ele alınmıştır. Yüksek ısı ve alev maruziyeti sırasında dokuda oluşacak hasar oranı Arrhenius yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada ayrıca çeşitli parametrelerin (kıyafet arasındaki hava boşluğu genişliği, gaz sıcaklığı) etkileri incelenmiştir.

Sayısal çözümleme ticari bir yazılım paketi olan COMSOL Multiphysics programı kullanılarak yapılmıştır. Öncelikle programda geometri oluşturulmuş sonrasında başlangıç ve sınır koşulları tanımlanmıştır. İnsan derisindeki ısı geçişinin hesaplanmasında Pennes biyo-ısı denklemi kullanılmıştır. Programın ‘Heat Transfer in Solid’ ve ‘Transport of Diluted Species’ modülünden yararlanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapılmıştır. Oluşturulan modellerde dokuda oluşabilecek olan yanık yaralanmalarının derecesinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: : Biyo-ısı, sıcaklık dağılımı, derişim dağılımı, Pennes biyo-ısı denklemi, termal koruyucu kıyafet, hasar oranı

THERMAL MODELING OF THE SYSTEM CONSISTING OF HUMAN SKIN AND FIREFIGHTER CLOTHING

ABSTRACT

In this study, heat and moisture transfer in human skin and in firefighter clothing are examined. Firstly, for the human skin consisting of four layers, temperature distribution under different environmental conditions was found. In this model, there is a heat transfer from the skin surface to the radiation, convection and sweating mechanisms. The damage function in the tissue according to the temperature distribution was investigated. This model, created later, was expanded by adding moisture transport. Temperature distribution and concentration distribution were found. In addition, a parametric study was carried out to examine the effect of temperature and concentration distribution in the skin by changing the thermal parameters and ambient temperature. In the third model, a firefighter garment consisting of three layers of models created for human skin was added. There is an air gap between the garment layers and between the human skin surface and the garment. The heat transfer in case of exposure to hot gases is considered in the model. The damage function in the tissue during high temperature and flame exposure is calculated by the Arrhenius approach. In this study, the effects of various parameters (air gap width, gas temperature) were investigated.

Numerical solution was performed using the COMSOL Multiphysics program. First, the geometry is created in the program and the initial and boundary conditions are defined. The Pennes bio-heat equation was used to calculate the heat transfer in the human skin. The program was analyzed using the finite element method using the 'Heat Transfer in Solid' module and the 'Transport of Diluted Species' module. It is aimed to estimate the number of burn injuries that may occur in the tissue in the created models.

Keywords: Bio-heat, temperature distribution, concentration distribution, Pennes bio-heat equation, thermal protective clothing, damage function

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Taraması.....	2
1.1.1 Biyo-ısı Geçişi Üzerine Yapılan Çalışmalar	2
1.1.2 İtfaiyeci Giysisi İçin Transport Olgusu Üzerine Yapılan Çalışmalar	7
1.2 Amaç ve Motivasyon	9
BÖLÜM İKİ - DERİ DOKUSUNUN YAPISI VE BİYO-ISI MODELLERİ.....	10
2.1 İnsan Deri Dokusunun Yapısı	10
2.2 Biyo-Isı Modelleri.....	11
2.2.1 Pennes Biyo-Isı Modeli.....	11
2.2.2 Wulff Süreklilik Modeli.....	13
2.2.3 Chen-Holmes(CH) Süreklilik Modeli.....	14
2.2.4 Weinbaum, Jiji ve Lemons (WJL) Biyo-ısı Modeli.....	16
2.3 Doku Hasar Tespiti	17

BÖLÜM ÜÇ - TERMAL KORUYUCU GIYSİLERİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ 19

3.1 Termal Koruyucu Giysisinin Yapısı	19
3.1.1 Dış Katman	21
3.1.2 Nem Bariyeri.....	21
3.1.3 Termal Astar	21
3.2 Koruyucu Giysilerde Kullanılan Lifler	22
3.3 Test Metotları.....	23
3.3.1 Tam Ölçek Manken Testleri.....	24
3.3.2 Tezgâh Ölçek Testleri	26

BÖLÜM DÖRT - İNSAN DERİSİ VE İTFAİYECİ GIYSİSİ İÇİN OLUŞTURULAN SAYISAL MODELLER 28

4.1 İnsan Derisindeki Isı Geçişi Modeli.....	28
4.1.1 Problemin Tanımı	28
4.1.2 Matematiksel Model Denklemleri.....	30
4.1.3 Sayısal Çözüm.....	32
4.2 İnsan Derisindeki Isı ve Nem Geçişi.....	32
4.2.1 Problemin Tanımı	33
4.2.2 Matematiksel Model Denklemleri.....	34
4.2.3 Sayısal Çözüm.....	38
4.3 İtfaiyeci Giysisi ve İnsan Derisindeki Isı Geçişi.....	38
4.3.1 Problemin Tanımı	38
4.3.2 Matematiksel Model Denklemleri.....	40
4.3.2.1 Kumaş Katmanındaki Isı Geçişi.....	40

4.3.2.2 Hava Boşluklarındaki Isı Geçişi.....	42
4.3.2.3 İnsan Derisindeki Isı Geçişi	43
4.3.3 Sayısal Çözüm.....	44
BÖLÜM BEŞ - BULGULAR VE TARTIŞMA	45
5.1 İnsan Derisindeki Isı Geçişi	45
5.2 İnsan Derisindeki Isı ve Nem Geçişi.....	49
5.3 İtfaiyeci Giysisi ve İnsan Derisindeki Isı Geçişi.....	53
BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR	60
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Wissler'in altı elemandan oluşan modeli	4
Şekil 1.2 Dört katmanlı Atkins ve Wyndham modeli.....	5
Şekil 1.3 Gordon'un modelinin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.1 İnsan derisinin yapısı	10
Şekil 2.2 Chen ve Holmes modelindeki doku hacminin şematik gösterimi	15
Şekil 3.1 Örnek bir itfaiyeci giysisi.....	20
Şekil 3.2 Termal koruyucu kıyafetin yapısı	21
Şekil 3.3 Giysilerin termal koruyucu performansını ölçmek için yapılan manken testi	26
Şekil 3.4 Tezgâh ölçek test düzeneğinin şematik gösterimi	27
Şekil 4.1 Çok katmanlı cilt dokusunun şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.2 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelinin şematik gösterimi	34
Şekil 4.3 Çok katmanlı kıyafet sisteminin şematik gösterimi.....	39
Şekil 5.1 İnsan derisindeki ısı geçişi modelindeki zamana göre sıcaklık değişimi ...	46
Şekil 5.2 İnsan derisindeki ısı geçişi modelinde cilt dokularının zamana göre sıcaklık değişimi	46
Şekil 5.3 Cilt dokudaki zamanla hasar oranının değişimi.....	47
Şekil 5.4 Cilt dokularındaki zamana göre hasar derecesi oluşumu.....	48
Şekil 5.5 İnsan derisindeki ısı geçişi modeli için doğrulama grafiği.....	49
Şekil 5.6 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelindeki cilt dokularında oluşan sıcaklık dağılımı	50
Şekil 5.7 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelindeki cilt dokularında oluşan nem derişimi dağılımı.....	50
Şekil 5.8 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelindeki zamana göre cilt dokulardaki sıcaklık değişimi	51
Şekil 5.9 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelindeki zamana göre cilt dokulardaki nem derişiminin değişimi	52
Şekil 5.10 İtfaiyeci giysisi ve insan derisindeki ısı geçişi modelindeki sıcaklık dağılımı.....	53

Şekil 5.11 Giysi katmanlarındaki zamana göre sıcaklık değişimi.....	54
Şekil 5.12 İtfaiyeci giysisi ve insan derisindeki ısı geçişi modelindeki zamana göre cilt dokularındaki sıcaklık değişimi.....	55
Şekil 5.13 İtfaiyeci giysisi ve insan derisindeki ısı geçişi modeli için doğrulama grafiği.....	56
Şekil 5.14 Giysi katmanları arasındaki hava boşluğu genişliklerinin cilt katmanlarındaki sıcaklığa etkisi a)Epidermis yüzey sıcaklığı, b)Bazal katman sıcaklığı, c) Dermal katman sıcaklığı.....	57
Şekil 5.15 Ortamdaki farklı gaz sıcaklıklarının deri katmanları üzerindeki etkisi a) Epidermis yüzey sıcaklığı, b) Bazal katman sıcaklığı, c)Dermal katman sıcaklığı.....	59

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Termal koruyucu giysilerde kullanılan lifler	22
Tablo 4.1 Doku katmanlarının termofiziksel özellikleri	29
Tablo 4.2 Bağıntılarda kullanılan parametrelerin sayısal değerleri	32
Tablo 4.3 Denklemlerde kullanılan parametrelerin değerleri	35
Tablo 4.4 Giysi katmanlarının termofiziksel özellikleri.....	42
Tablo 4.5 Deri tabakalarının termofiziksel özellikleri	44



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüzde çeşitli endüstrilerde ve sanayide çalışan işçilerin tehlikeli koşullar altında çalıştığı bilinmektedir. Bu yüzden işçilerin çalışmaları sırasında oluşabilecek risklere karşı vücutlarını koruma altına almaları gerekmektedir. Yüksek risk içeren işlerde çalışanların, yaralanmaları ve meslek hastalıklarını önlemek için kişisel koruyucu donanımlar kullanmaları gerekmektedir. Oluşabilecek tehlikelerden biri, çeşitli nedenlerden kaynaklanabilecek olan yangınlardır. İtfaiyeciler de çalışma koşullarından dolayı yüksek sıcaklık ve yoğun radyasyona maruz kalmaktadırlar. Böyle bir ortamda çalışmak, yanık yaralanmalarına neden olmakta ve çalışanın hayatını tehlikeye sokabilmektedir. Her yıl yangın sonucu birçok itfaiyeci yaralanmaktadır. Yanık yaralanmalarını en aza indirmek için koruyucu kıyafetin tasarımı önemli olmaktadır.

Tipik bir termal koruyucu giysisi çok katlı kumaş tabakalarından oluşmaktadır. Bu tabakalar dış katman, nem bariyeri ve termal astardır. İleriki bölümlerde daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Ortamdaki ısı kaynakları dolayısı ile koruyucu giysiden insan derisine doğru bir enerji geçişi olmaktadır. Bu nedenle insan derisi ve giysideki ısı ve nem geçişi modellenmektedir. Sıcaklık ve derişim dağılımının elde edilmesi ile dokuda oluşabilecek olan yanık yaralanmaları öngörülebilmekte, deride oluşabilecek ikinci ve üçüncü dereceden yanıkların tahmininde kullanılmaktadır. Bu sebeple sıcaklık ve derişim dağılımının bulunması doku içerisinde oluşabilecek hasarlara karşı bize bilgi sunmaktadır.

Bu çalışma insan derisi ve itfaiyeci giysisi için oluşturulan matematiksel modeli vermektedir. Bu bölümde bilim insanlarının yapmış olduğu, biyo-ısı üzerine olan ve itfaiyeci giysisi için olan önemli çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmadaki amaç ve motivasyon verilmektedir.

Bölüm 2’de insan derisi dokusunun yapısı ve özellikleri verilmiştir. Ayrıca önemli biyo-ısı modelleri tanıtılmıştır.

Bölüm 3’te termal koruyucu kıyafetin yapısı tanıtılmıştır. Bu kıyafetlerde kullanılan lifler ve özelliklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca test metotları hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

Bölüm 4’te insan derisi ve itfaiyeci giysisi için oluşturulan matematiksel modeller tanıtılmaktadır. İlk olarak insan derisi sistemi için ısı geçişi modellenmiştir. Sonrasında insan derisi için ısı geçişi modeline nem geçişi de eklenerek model genişletilmiştir. İtfaiyeci giysisi ve insan derisini birleştiren bir model oluşturulmuştur. Bu modelde sıcak gazların etkisi altında insan derisindeki ve giysideki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Bölüm 5’te oluşturulan modellerin bulguları verilmiş ve tartışılmıştır.

Bölüm 6’da oluşturulan modeller için sonuçlar kısaca özetlenmiştir.

1.1 Literatür Taraması

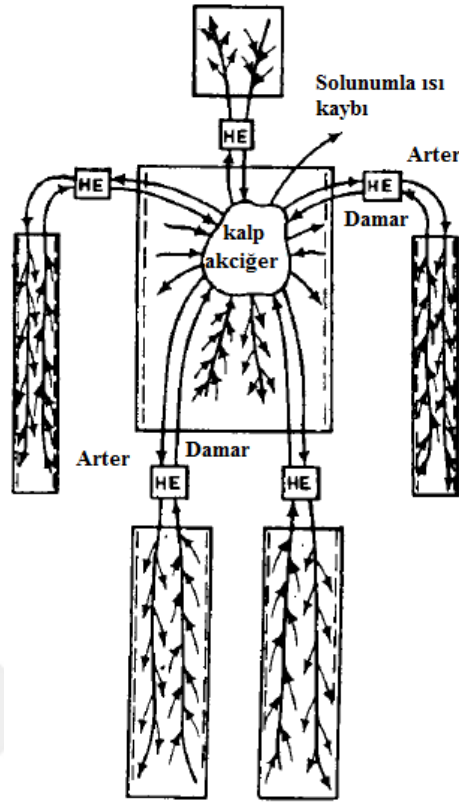
1.1.1 Biyo-ısı Geçişi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Canlı dokularda ısı transferi karmaşık bir süreçtir. Dokularda ısı iletiminin, konveksiyonun, kan perfüzyonunun ve metabolik ısı üretiminin bir birleşimini içermektedir. Farklı çevresel koşullarda insan vücudunun nasıl davranacağını bilmek önemlidir. Bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle insanın ısı davranışlarını simüle etmek daha da basitleşmiştir. Yıllar içinde, canlı biyolojik dokularda ısı geçişini tanımlamak için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, kanser tedavisi, lazer cerrahisi, termal konfor ve diğer birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan biyo-ısı modeli 1948 yılında Pennes tarafından tanıtılmıştır. Pennes, kan perfüzyonunun ve metabolik ısı oluşumunun canlı bir dokuda ısı geçişine etkisini tanımlamak için basitleştirilmiş biyo-ısı modeli

önermiştir (Zolfaghari ve Maerefat, 2011). Modelde insan ön kolunu bir silindir olarak modellemiştir. Model, silindirin radyal yönde ısı iletimini, dokudaki metabolik ısı oluşumunu, dolaşımdaki kanın ısıyı iletmesini, konveksiyon, radyasyon ve buharlaşma ile cildin yüzeyinden ısı kaybını içermektedir.

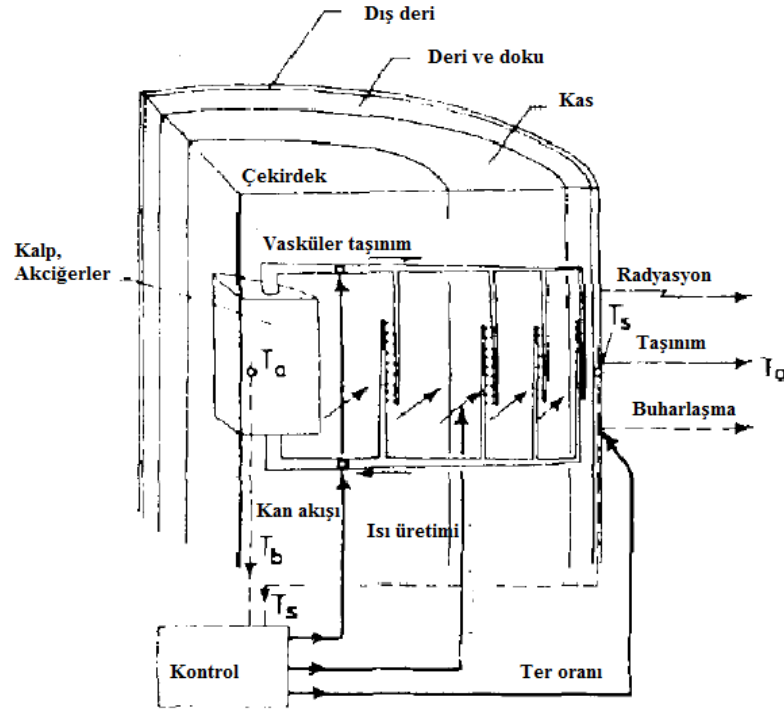
1960’lardan beri araştırmacılar insan bedenini modellemeye başlamışlardır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insan vücudunun çok katmanlı olarak daha ayrıntılı modellenmesi yapılabilmektedir.

1963 yılında Wissler tarafından geliştirilen modelin amacı erkeklerdeki sıcaklık dağılımını yorumlamaktır. Modelde yerel ısı üretimi, doku tabakaları arasındaki ısı iletimi, yağ katmanları nedeniyle dolaşımdaki kan ısı yalıtımı ile ısı transferi; komşu arterler ve damarlar arasındaki ısı değişimi, solunum yolu ile ısı kaybı, terleme, titreme ile oluşan ısı, ısı depolama ve termal değişimlere dâhil olan çevresel faktörleri tanıtmıştır. Gövdeyi altı elemanla temsil etmiştir. Bunlar, gövde, kafa, iki kol ve iki bacakdan oluşmaktadır. Her bir elementin, bir yağ ve deri tabakasıyla kaplı, homojen bir kemik ve doku silindiri olduğu varsayılmaktadır (Cena ve Clark, 1981).



Şekil 1.1 Wissler'in altı elemandan oluşan modeli (Cena ve Clark, 1981)

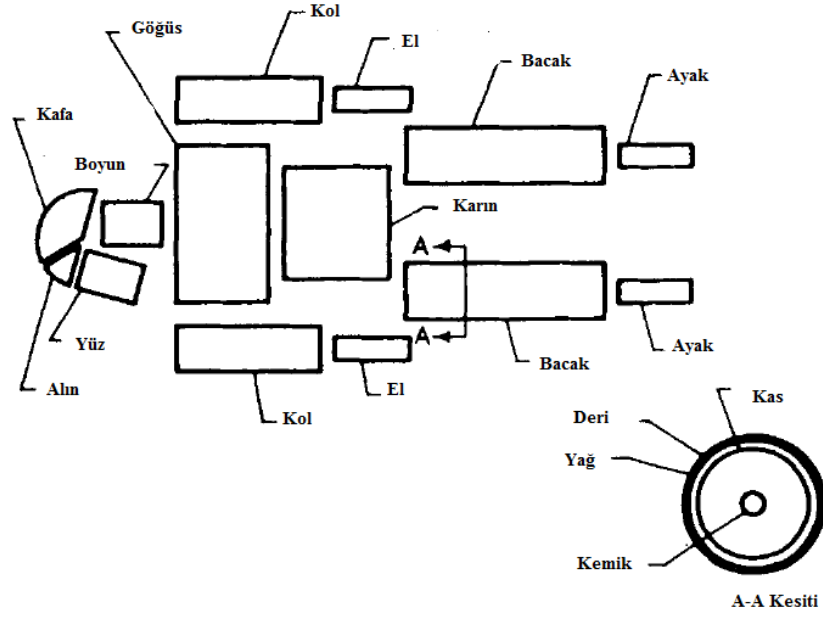
Atkins ve Wyndham modelinde (1969), gövde dört eşmerkezli katman içeren bir silindire temsil edilmiştir. Bunlar çekirdek, kaslar, derinin derin kısmı ve cildin dermis ve epidermis katmanlarıdır. Çözüm yöntemi olarak sonlu fark tekniğini kullanmışlardır. Analog bir bilgisayar kullanarak çözüm elde etmişlerdir. Yüzeyde çevreye ısı kaybı oranını konveksiyon, radyasyon ve buharlaşma nedeniyle oluşan ısı kaybının toplamı olarak tanımlamışlardır (Cena ve Clark, 1981).



Şekil 1.2 Dört katmanlı Atkins ve Wyndham modeli (Cena ve Clark, 1981)

Stolwijk 1970 yılında, vücudu beş bölüme ayıran bir model geliştirmiştir. Bu bölümleri silindirik birer eleman olarak düşünmüştür. Her eleman, çekirdek, kas, yağ ve deri dokusu katmanlarını temsil etmektedir. Enerji dengesi, her doku tabakası için yazılan bir dizi denklem ile verilmiştir. Tüm doku enerji dengesinde ısı depolama etkileri, komşu doku katmanları ile iletken ısı transferi, kan akışına bağlı konvektif ısı geçişi ve bazal metabolik ısı üretimi yer almaktadır. Tüm cilt enerji dengesi denklemleri, konveksiyon, radyasyon ve vücut yüzeyindeki nemin buharlaşmasından kaynaklanan ısı kayıplarını içerir (Yıldırım, 2005).

1977'de Gordon ve arkadaşları özellikle insanın soğuk algınlığına maruz kaldığındaki fizyolojik tepkilerini tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir. Gövde, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi 14 silindirik segmente bölünmüştür. Her segment, örneğin karın için 5 (çekirdek, kemik, kas, yağ, deri), kollar ve ayaklar için sadece 4 (kemik, kas, yağ, deri) olmak üzere çeşitli eşmerkezli doku katmanlarından oluşmaktadır. Her bir doku tabakası, halka biçimli kabuklara bölünmüştür.



Şekil 1.3 Gordon'un modelinin şematik gösterimi (Cena ve Clark, 1981)

Fiala ve arkadaşları 1999 yılında insan termal sistemi için pasif bir model geliştirmiştir. İnsan vücudunu 15 silindirik ve küresel gövde elemanı olarak ele almıştır. Modelde iletim, kan dolaşımı, konveksiyon, radyasyon, solunum, giysi ve ısı geçişini dikkate almıştır. Denklemleri çözmek için sonlu fark yöntemi kullanmışlardır.

2002 yılında Jiang ve arkadaşları yüksek sıcaklıkta bir ısı kaynağının cildin yüzeyine uygulanmasından kaynaklanan cilt yanması sürecini karakterize etmek için tek boyutlu çok tabakalı bir model sunmuşlardır. Pennes denklemini çözmek için sonlu farklar yöntemini kullanmışlardır. Sonrasında yanık hasarını belirten bir hasar fonksiyonunu Arrhenius denklemini kullanılarak hesaplamışlardır. Sonuçlar, epidermis ve dermis kalınlıklarının sıcaklık ve yanık yaralanmalarının dağılımlarını önemli derecede etkilediğini, başlangıç sıcaklıklarındaki ve kan perfüzyonundaki değişikliklerin çok az etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir.

Fu ve arkadaşları 2014'te ısı kaynağı uzaklaştırıldıktan sonra kan perfüzyonunun, su difüzyonunun ve buharlaşmanın doku sıcaklığı ve cilt yanması üzerindeki etkilerini araştırmak için ısı ve kütle geçişi üzerine çok katmanlı bir cilt modeli sunmuştur. Isı kaynağı çıkarıldıktan sonra deri geometrisi ve ısı parametrelerin ve başlangıçtaki doku

sıcaklığının cilt sıcaklığı dağılımı ve yanık yaralanmalarına etkilerini araştırmak için bir parametrik çalışma yapmışlardır. Modelin sayısal sonuçlarını daha önceki deneysel sonuçlarla karşılaştırıp, sonucunda su buharlaştırma ve su difüzyonuna bağlı ısı kaybı ile epidermisi soğutabildiğini, ancak kan perfüzyonu ve su difüzyonunun deri altı dokuyu ısıttığını ve cildi tahrip ettiğini görmüşlerdir.

Güneş ışınımının deri yüzeyindeki sıcaklığa ve doku hasarına olan etkisini 2016 yılında Küçüka ve arkadaşları incelemişlerdir. Matematiksel bir model geliştirip sayısal çözümlemesini Comsol Multiphysics programında yapmışlardır. Elde ettikleri sıcaklık dağılımı ile dokudaki hasar oranını Arrhenius yaklaşımına göre hesaplamışlardır. Sonucunda dermis katmanındaki sıcaklığın 321 K'e çıktığını görmüşlerdir.

1.1.2 İtfaiyeci Giysisi İçin Transport Olgusu Üzerine Yapılan Çalışmalar

Tipik bir termal koruyucu giysi sistemi tek veya çok katmanlı, yangına dayanıklı bir kumaştan ve insan derisinden ve hava boşluklarından oluşmaktadır. Yangına dayanıklı kumaşlardan yapılmış koruyucu giysiler birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Doku yanıklarının önlenmesinde veya en aza indirilmesinde koruyucu giysi performansını değerlendirmek için, giysinin ısıl davranışlarının yanı sıra, hava boşluğunun ve derinin etkisi de göz önüne alınmalıdır. Koruyucu kıyafetlerin termal performansının modellenmesi ile ilgili çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Örneğin kumaş modellemesi ile ilgili 1999 yılında Torvi ve arkadaşları tek katlı yangına dayanıklı kumaşa aleve maruz kalma testleri yapmışlardır. Hava boşluğu genişliğinin tezgâh üstü testlerde tek tabakalı yangına dayanıklı bir kumaşın koruyucu performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Mell ve arkadaşları itfaiyecilerin koruyucu kıyafetleri için ısı geçişi modelinin geliştirilmesinde ilk aşamayı sunmak için 1999 yılında bir model geliştirmişlerdir. . Radyasyona maruz kalma süresi boyunca koruyucu giysideki ısı geçişini modellediler ve yanık yaralanması açısından koruma derecesini araştırmışlardır. Koruyucu kumaşların kuru olduğunu varsaymışlardır. Kumaş katmanlarında tek boyutlu ısı

geçiş olmaktadır. Modelin doğruluğunu tipik bir kumaş tertibatı için, zamana bağlı sıcaklıkların deneysel olarak elde edilenlerle karşılaştırılmasıyla test etmişlerdir. Genel olarak model, özellikle deney ve simülasyon arasındaki sıcaklık farkının 5°C 'nin altında olduğu giysinin iç kısmında iyi performans göstermiştir. Giysinin dış kabuğundaki tahmini sıcaklık, deneysel değerlerden farklı çıkmıştır (24°C 'ye kadar). Bunun nedeninin, model girdisi için kullanılan kumaşa özgü optik özelliklerin farklı olması ile ilgili olduğunu görmüşlerdir.

2004 yılında Chitrphiromsi ve Kuznetsov, itfaiyeci koruyucu giysilerinde ateşe maruz kalma sırasında ısı ve nem taşınması modelini sunmuşlardır. Çalışmalarının amacı, ısı ve nem aktarımının giysinin koruyucu performansı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Hesaplama sonuçları, flaş ateşine maruz kalmanın yanı sıra soğuma süresi boyunca kumaştaki sıcaklık ve nem içeriğinin dağılımını göstermektedir. Yangın-kumaş-hava boşluğu-cilt sistemi için komple bir model sunmuşlardır.

Zhu ve Zhang ısıya dayanıklı kumaşların radyan ısı akısına maruz kaldıklarında kumaştaki ısı bozunmayı göz önüne alan bir ısı geçiş modeli önermişlerdir. Sayısal modelin sonuçları, yüksek ısı akısı koşulları altında ısıya dayanıklı kumaşlardaki ısı aktarım sürecinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuştur.

2010 yılında, koruyucu bir giyim sisteminde geçici ısı geçişini simüle etmek için Ghazy ve Bergstrom sonlu bir hacim modeli geliştirilmişlerdir. Model ateşe dayanıklı bir kumaştan, insan derisinden ve kumaş ile deri arasındaki hava boşluğundan oluşmaktadır. Ghazy ve Bergstrom' un modeli, hava aralığının daha önceki modellere göre daha karmaşık bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Hava aralığındaki kombine iletim ısı transferini hesaba katmışlardır. Kumaşın, cildin ve hava boşluğundaki sıcaklık ve ısı akı dağılımları için zamanın bir fonksiyonu olarak ve ayrıca cilt yanıklarına maruz kalma süreleri için tahminler elde etmişlerdir. Sayısal model koruyucu giysilerdeki ısı geçişinin fiziğini araştırmak için kullanılmıştır.

Ghazy ve Bergstrom 2012 yılında yaptıkları başka bir çalışmalarında, üç kat ateşe dayanıklı kumaş, cilt ve hava boşluklarını içeren bir sonlu hacim modeli

geliştirmişlerdir. Hava boşluğunun giyim performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

1.2 Amaç ve Motivasyon

Sanayide ve tehlikeli ortam şartlarında çalışan personel için kişisel koruyucu donanımların kullanımının önemi bilinmektedir. İtfaiyeciler için de termal koruyucu giysiler hayati önem taşımaktadır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalma durumlarında giysinin bozunmadığı durumlarda dahi deri dokularında yanık yaralanmaları oluşabilmektedir. Bu yaralanmaları tahmin etmek için sayısal modeller geliştirilmektedir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen sıcaklık ve derişim dağılımlarını bulmak, oluşabilecek yaralanmalar hakkında bize bilgi sunmaktadır.

Geliştirilen modellerde kıyafet ve cilt için çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmadaki motivasyon itfaiyeci giysisi ve insan derisi sistemini birleştirerek ısı geçişini incelemek için detaylı bir model oluşturmaktır. Diğer modellerden farklı olarak derinin farklı katmanlarının etkileri ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Çalışmadaki amaç, itfaiyeci giysilerindeki ısı geçişinin sayısal olarak incelenerek, dokuda oluşabilecek olan yanıkları tahmin etmektir.

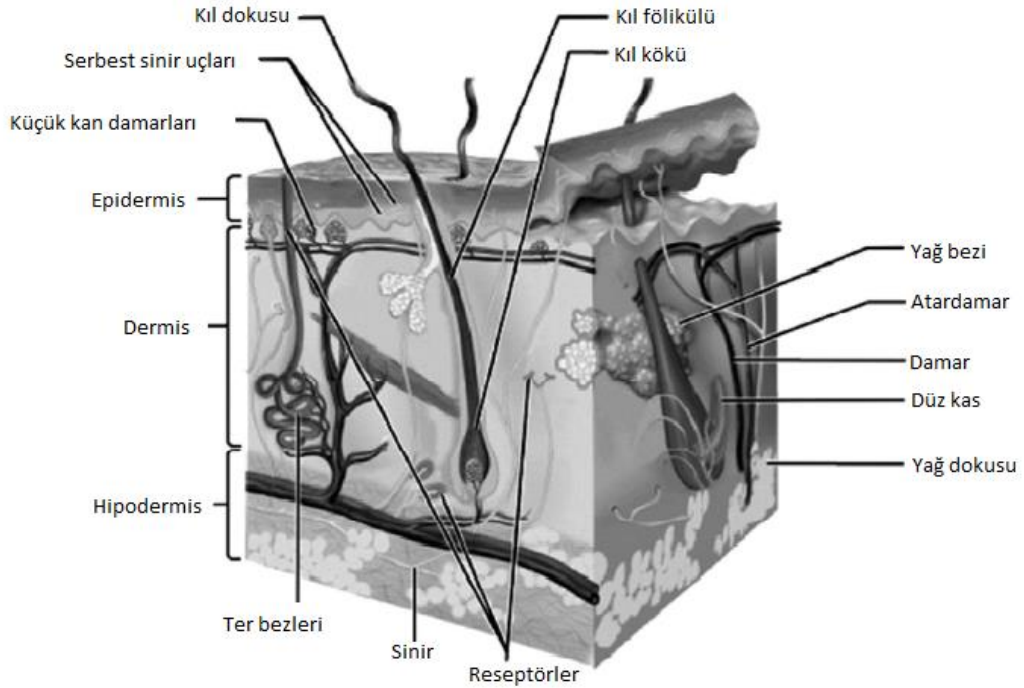
BÖLÜM İKİ

DERİ DOKUSUNUN YAPISI VE BİYO-ISI MODELLERİ

2.1 İnsan Deri Dokusunun Yapısı

Cilt, vücut yüzeyini kaplayan bir örtü olmasının yanı sıra vücudun en büyük organıdır ve çeşitli önemli rolleri vardır. Bunlardan biri duyu organı olarak görev yapmasıdır. Ağrı, ısı, soğuk, basınç, dokunma gibi duylar için bir duyu organı olarak görev yapar. Diğer bir görevi savunmadır. Mikroorganizmalar gibi yabancı cisimlerin girişini önler ve mekanik, ısı, soğuk, biyolojik yaralanmalar gibi farklı yaralanmalardan dokuları korur.

Deri genellikle dört katmandan oluşur: epidermis, dermis yağ dokusu ve kas dokusu. Bu tabakaların kalınlığı, cildin konumuna bağlı olarak değişmektedir. İnsan derisinin genel yapısı Şekil 2.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.1 İnsan derisinin yapısı (Florin Filipoiu, 2010)

Epidermis, hem canlı hem de ölü hücreleri içeren derinin dış tabakasıdır ve kalınlığı farklı bölgelere göre yaklaşık olarak 75-150 μm arasında değişmektedir.

Dermis, insan derisinin büyük bir kısmını oluşturur. Epidermise göre daha kalındır ve 1mm ile 4 mm arasında kalınlığa sahiptir. Dermis kan damarları, sinirler, lenf damarları ve kollajen ile bir arada tutulan kıl kökleri ve küçük kıl kasları, yağ bezleri ve ter bezleri gibi deri uzantılarından oluşmaktadır (Xu ve Lu, 2010).

2.2 Biyo-Isı Modelleri

Tüm biyolojik bedenler, mekânsal olarak heterojen sıcaklıkların termal ortamında yaşarlar. Isı transferi bu nedenle sıcaklığı etkileyen bir birincil mekanizmadır.

Termal enerjinin canlı dokuya taşınması, iletim, konveksiyon, radyasyon, metabolizma, buharlaşma ve faz değişimi gibi birçok mekanizmayı içeren karmaşık bir süreçtir. Termal davranış veya cilde ısı transferi, esas olarak kan dolaşımını, terlemeyi, metabolik ısı oluşumunu ve bazen deri yüzeyi üzerinde kıl yoluyla ısı dağılımını içeren bir ısı iletim işlemidir.

Bu karmaşık yapıdaki ısı transferini incelemek için araştırmacılar birçok model geliştirmişlerdir. En çok bilinen biyo-ısı modelleri aşağıda özetlenmiştir.

2.2.1 Pennes Biyo-Isı Modeli

Yıllar boyunca kan dolaşımının canlı dokudaki ısı transferi üzerindeki etkileri birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve iki ana yaklaşım temelinde çok sayıda biyo ısı transfer modelleri geliştirilmiştir. Bunlar süreklilik yaklaşımı ve vasküler yaklaşımdır. Süreklilik yaklaşımında, tüm kan damar modellerinin termal etkisi tek bir parametre olarak alınırken, vasküler yaklaşımda her bir damarın etkisi tek tek modellenmektedir. En çok kullanılan süreklilik modeli 1948'de Harry Pennes tarafından tanıtılmıştır. Pennes modeli başlangıçta insan önkolunda ısı transferini tahmin etmek için geliştirilmiştir. Pennes biyo-ısı modelinin sadeliği nedeniyle, kanser

tedavilerinde, terapötik ve hipertermi gibi çeşitli biyolojik araştırma çalışmalarında uygulanmıştır (Zolfaghari ve Maerefat, 2011).

Pennes biyo-ısı modeli dört basitleştirme varsayımına dayanmaktadır;

- Kan ve doku arasındaki ısı transferinin tümü ihmal edilir.
- Küçük kılcal damarlarda kan akışı izotropiktir. Bu, kan akışının yöneliminin etkisini ihmal eder.
- Kılcal damar yataklarında daha büyük kan damarları, doku ve kılcal kan arasındaki enerji değişiminde hiçbir rol oynamaz. Böylece Pennes modeli geometriyi dikkate almaz.
- Kanın dokuya giriş sıcaklığı vücudun iç sıcaklığına eşit varsayılmaktadır. Damarlarda dolaşan kan dokuyu yine aynı sıcaklıkta yani vücut iç sıcaklığında terk eder.

Bu varsayımlara dayanarak Pennes, kan akış hızı ve vücut çekirdek sıcaklığı ile doku sıcaklığı arasındaki farkla orantılı olan bir izotropik ısı kaynağı olarak kan etkisini modellemiştir. Bu etki basitleştirilmiş haliyle yazılan standart termal difüzyon denkleminde dâhil edilmiştir (Pennes, 1948).

$$\rho_d c_{p,d} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \rho_{kn} c_{p,kn} \omega_{kn} (T_{atr} - T_d) + \dot{q}_m + \dot{q}_{diğer} \quad (2.1)$$

Burada ρ_d , $c_{p,d}$, T_d , k_d sırasıyla dokunun yoğunluğunu, özgül ısısını, sıcaklığını ve ısı iletim katsayısını vermektedir. ρ_{kn} , $c_{p,kn}$, ω_{kn} ise kanın yoğunluğunu, özgül ısısını ve perfüzyon hızını ifade etmektedir. T_{atr} , atardamardaki kanın sıcaklığını temsil etmekte olup, vücut merkez sıcaklığı olan 37°C’de sabit kabul edilmektedir. $\dot{q}_m$, doku tarafından gerçekleştirilen metabolik ısı üretimi, $\dot{q}_{diğer}$ ise dış kaynaklı ısı üretimini ifade etmektedir. $\rho_d c_{p,d} \frac{\partial T}{\partial t}$, terimi birim hacime sahip dokuda birim zamanda depolanan enerjiyi vermektedir. $\nabla \cdot k_d \nabla T_d$, terimi iletim yoluyla birim zamanda geçen net enerjiyi, $\rho_{kn} c_{p,kn} \omega_{kn} (T_{atr} - T_d)$ terimi kan ile doku arasındaki ısı transferini vermektedir.

2.2.2 Wulff Süreklilik Modeli

Pennes'in geliştirdiği modelin sadeliği nedeni ile birçok yazar Pennes biyo-ısı denklemini geliştirmek için kullanılan varsayımların geçerliliğini araştırmışlardır. Wulff (1974), Pennes biyo-ısı denkleminin temel varsayımlarını eleştiren ve alternatif bir analiz sağlayan ilk araştırmacılardan biri olmuştur. Wulff (1974), akan kan ve doku arasındaki ısı transferinin, doku ile kan arasındaki sıcaklık farkıyla orantılı olacak şekilde modellenmesi gerektiğini varsaymıştır. Böylece, dokudaki herhangi bir noktada ısı akısı denklemdeki gibi ifade edilmiştir.

$$q = k_d \nabla T_d + \rho_{kn} h_{kn} v_h \quad (2.2)$$

Burada v_h , ortalama kan hızını ifade ederken, h_{kn} kanın özellikli entalpisini ifade etmektedir. Denklem 2.3'te kanın entalpisini tanımlanmıştır.

$$h_{kn} = \int_{T_0}^{T_{kn}} C_{kn}(T_{kn}^*) dT_{kn}^* + \frac{P}{\rho_{kn}} + \Delta H_f (1 - \emptyset) \quad (2.3)$$

Burada, P sistem basıncıdır, H_f metabolik reaksiyon oluşumunun entalpisidir ve $\emptyset$ reaksiyonun derecesidir. Ayrıca, T_0 referans sıcaklığı ifade eder iken, T_{kn} kan sıcaklığıdır. Böylece enerji dengesi denklemi şöyle yazılabilir:

$$\rho_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = -\nabla q \quad (2.4)$$

Bu nedenle,

$$\begin{aligned} \rho_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = & -\nabla \cdot [k_d \nabla T_d + \rho_{kn} v_h \left(\int_{T_0}^{T_{kn}} C_{kn}(T_{kn}^*) dT_{kn}^* \right. \\ & \left. + \frac{P}{\rho_{kn}} + \Delta H_f (1 - \emptyset) \right)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'de sistem basınç terimi ihmal edilmesi ve $\rho_{kn} v_h$ teriminin sıfır kabul edilmesi ile denklem aşağıdaki gibi sadeleştirilir.

$$\rho_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = k_d \nabla^2 T_d - \rho_{kn} C_{kn} v_h \nabla T_{kn} + \rho_{kn} v_h \Delta H_f \nabla \phi \quad (2.6)$$

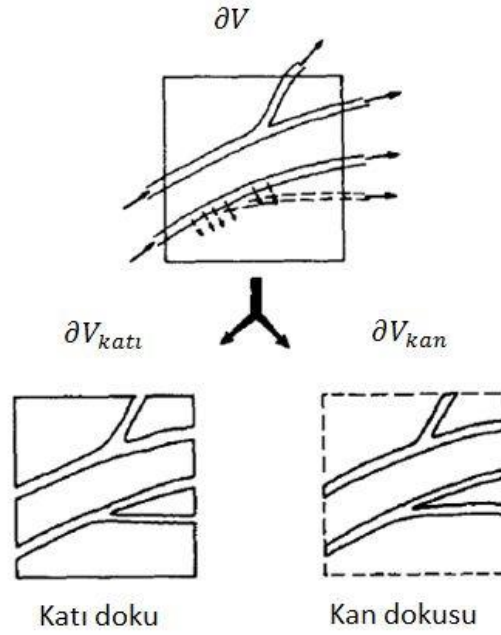
Wulff (1974), kanın sıcaklığının dokunun sıcaklığına eşdeğer olduğunu varsaymıştır. Bu durumda metabolik reaksiyon terimi $\rho_{kn} v_h \Delta H_f \nabla \phi$, q_m 'ye eşdeğerdir. Bu nedenle Wulff (1974) tarafından türetilen biyo-ısı denkleminin son hali aşağıdaki verilen Denklem 2.7'deki gibidir.

$$\rho_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = k_d \nabla^2 T_d - \rho_{kn} C_{kn} v_h \nabla T_d + q_m \quad (2.7)$$

Bu biyo-ısı denkleminin çözümündeki ana zorluk, yerel kan akışı $\rho_{kn} v_h$ değerlendirilmesinin dikkate alınmasıdır.

2.2.3 Chen-Holmes(CH) Süreklilik Modeli

Biyo-ısı modelleri arasında Chen-Holmes modeli (Chen ve Holmes, 1980) en gelişmiş olanıdır. Chen ve Holmes (1980), büyük ısı transfer işlemlerinin 50 ila 500 μm çapındaki damarlarda meydana geldiğini göstermiştir. Sonuç olarak, daha büyük damarların daha küçük damarlardan ve dokudan ayrı olarak modellenmesini önermişlerdir. Bu nedenle, Chen-Holmes biyo-ısı modelinde, toplam doku kontrol hacmi, Şekil 2'te gösterildiği gibi, katı doku ve kan dokusu olarak ikiye bölünmüştür.



Şekil 2.2 Chen ve Holmes modelindeki doku hacminin şematik gösterimi (Chen ve Holmes, 1980)

Chen ve Holmes kan perfüzyon terimini hesaplamak için yeni bir denklem önermiştir.

$$q_{kn} = \rho_{kn} C_{kn} W_{kn} (T_{atr}^* - T_d) - \rho_{kn} C_{kn} v \cdot \nabla T_d + \nabla k_p \nabla T_d \quad (2.8)$$

Denklem 2.8’de sağ taraftaki ilk terim, perfüzyon hızının (W_{kn}) ve arter sıcaklığının (T_{atr}^*) hariç tutulduğu hacim için Pennes perfüzyon terimine benzer görünmektedir. T_{atr}^* ’in esas olarak kan akımının sıcaklığı olduğu ve vücut çekirdek sıcaklığına eşit olmadığı belirtilmelidir. Denklem 2.8’deki ikinci terim, dengelenmiş kanın neden olduğu enerjiyi açıklar. Kan akışının yönelimi, birim alan başına hacimsel akış hızı olan vektör v ile açıklanmaktadır. Denklem 2.8’deki üçüncü terim ise dengelenmiş kandaki küçük sıcaklık dalgalanmaları ile ilişkili iletim mekanizmalarını açıklar. k_p , sembolü “perfüzyon iletkenliğini” gösterir.

Chen ve Holmes’ un biyo-ısı denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho_{d,ef} C_{d,ef} \frac{\partial T_d}{\partial t} = \nabla k_{d,ef} \nabla T_d - \{ \rho_{kn} C_{kn} W_{kn} (T_{atr}^* - T_d) - \rho_{kn} C_{kn} v \cdot \nabla T_d + \nabla k_p \nabla T_d \} + q_m \quad (2.9)$$

$$\rho_{d,ef} = (1 - \varepsilon_{kn})\rho_d + \varepsilon_{kn}\rho_{kn} \quad (2.10)$$

$$C_{d,ef} = (1 - \varepsilon_{kn})C_d + \varepsilon_{kn}C_{kn} \quad (2.11)$$

$$k_{d,ef} = (1 - \varepsilon_{kn})k_d + \varepsilon_{kn}k_{kn} \quad (2.12)$$

Burada ε_{kn} , kanın aktığı dokunun gözenekliliğidir. Ortalama doku sıcaklığı T_d^* , aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$T_d^* = \frac{(1 - \varepsilon_{kn})\rho_d C_d T_d + \varepsilon_{kn}\rho_{kn} C_{kn} k_{kn}}{\rho_{d,ef} C_{d,ef}} \quad (2.13)$$

Chen-Holmes modeli, Pennes denklemine göre önemli bir gelişme gösterse de, damar ağı ve kan perfüzyonu hakkında ayrıntılı bilgi gerektirdiği için uygulanması kolay değildir (Zolfaghari ve Maerefat, 2011).

2.2.4 Weinbaum, Jiji ve Lemons (WJL) Biyo-ısı Modeli

Chen-Holmes modeli tarafından açıkça ele alınmayan karşı akım vasküler sistemin modellenmesi, sürekli modellerden ayrı olarak geliştirilmiştir. 1984 yılında Weinbaum, Jiji ve Lemons, karşı akım kan akışını dikkate alarak yeni bir vasküler biyo-ısı modeli sundular. Bu model, küçük arterlerin ve damarların paralel olduğu ve akış yönünün ters akıma neden olduğu ve bununla dengelenmiş ısıtma ve soğutma etkilerinin ortaya çıktığı hipotezine dayanılarak elde edilmiştir (Minkowycz ve ark., 2009). Derin doku tabakasının karşı akım yapısı için, üç denklem sistemi önermişlerdir:

$$\rho_{kn} C_{kn} \pi r^2 \bar{v} \cdot \frac{dT_{atr}}{ds} = -q_{atr} \quad (2.14)$$

$$\rho_{kn} C_{kn} \pi r^2 \bar{v} \cdot \frac{dT_v}{ds} = -q_{top} \quad (2.15)$$

$$\rho_d C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = \nabla k_d \nabla T_d + \left\{ n g \rho_{kn} C_{kn} (T_{atr} - T_v) - \rho_{kn} C_{kn} n \pi r^2 \bar{v} \cdot \frac{d(T_{atr} - T_v)}{ds} \right\} + q_m \quad (2.16)$$

Burada, q_{atr} iletim yoluyla damardan dokuya olan ısı kaybı, q_{top} , toplardamarın duvarından damar içerisine birim uzunluk boyunca iletim yoluyla ısı kazanımıdır. Denklemden r , damar yarıçapıdır. n ve g sırasıyla damar sayısını ve dokudaki kanlanma hızını ifade etmektedir.

2.3 Doku Hasar Tespiti

Termal yaralanma, sıcaklığın neden olduğu canlı dokulardaki geri dönüşümsüz değişiklikler olarak tanımlanmaktadır. Doku sıcaklığı normal yaşam süreçleri arasındaki aralığı aştığında yaralanma meydana gelebilir. Hem yüksek hem de düşük sıcaklık, biyo moleküllerde geri dönüşü olmayan değişikliklere neden olarak yaralanmalara neden olabilmektedir.

En sık karşılaşılan termal yaralanma tipi yanıktır. Kaza sonucu yanıklar en çok endüstriyel ortamlarda ve diğer pek çok mekânda karşımıza çıkmaktadır. Çoğu yanık, sıcak bir katı, sıvı veya buhar ile deri temasının bir sonucu olarak, ısıнын dokulara doğru içeri girmesinden kaynaklanmaktadır.

Doku yanık yaralanma modeli, Henriques ve Moritz'in çalışmasına dayanmaktadır. Termal hasar, insan derisindeki epidermis ve dermis arasındaki ara yüzeydeki sıcaklığın (bazal katman olarak adlandırılır) 44°C'nin üzerine çıkmasıyla oluşmaya başlamaktadır. Doku hasarı oranını tahmin etmek için Arrhenius denklemi kullanılabilir. Bu model ilk olarak, II. Dünya Savaşı'ndan kısa bir süre sonra, Moritz ve Henriques (Valvano, 2005) tarafından cilt yüzeyindeki sıcaklığın ve maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olarak yanığın şiddetini tahmin etmek için oluşturulmuştur. Ayrıca, insanlarda birinci ve ikinci derece yanıkları ortaya çıkarmak için eşik koşullarını belirlemek için deneyler yapmışlardır.

$$\Omega = \int_0^t P \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) dt \quad (2.17)$$

Denklem 2.17’de Ω ısı hasar fonksiyonunu ifade etmektedir. R evrensel gaz sabitini T ise doku sıcaklığını göstermektedir. Aktivasyon enerjisi ΔE ile ifade edilmiştir ve değeri $6,27 \times 10^5$ J/kmol’dür. P frekans faktörüdür, değeri ise $3,1 \times 10^{98}$ s⁻¹’dir. İnsan derisindeki birinci ve ikinci derecedeki yanıkları öngörmek için bazal katman sıcaklığı kullanılmalıdır. Bu arayüzeyde birinci derece yanık $\Omega = 0,53$ ’e ulaştığında, ikinci derecedeki yanık ise $\Omega = 1$ ’e ulaştığında oluşmaktadır. Üçüncü derece yanıklar dermis ve yağ dokusu arasındaki ara yüzeydeki (dermal katman) sıcaklık kullanılarak hesaplanır. Üçüncü derecede yanık $\Omega = 10000$ değerine ulaştığında oluşmaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

TERMAL KORUYUCU GIYSİLERİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

3.1 Termal Koruyucu Giysisinin Yapısı

Tekstil ürünleri insan ihtiyaçlarını karşılamak için sürekli gelişmektedir. Termal koruyucu giysiler de gelişmekte olan ürünler arasında yer almaktadır. Araştırmalar lif materyallerini değiştirmenin ya da bazı tekstil kumaşlarına kimyasal cilalama uygulamaları ile tutuşmayı geciktirmelerine ve hatta direnç göstermelerine olanak sağlamıştır. Termal koruyucu giysilerin geliştirilmesindeki amaç, dışardan gelen ısıнын ve nemin kumaştan cilde geçmesini önlemek ve aynı zamanda metabolik ısı ve terin de giysi yardımıyla dışarıya çıkmasına izin vermektir. Diğer bir deyiş ile cildin yanık yaralanmasını önlemek ya da en aza indirmek için insan derisinde ısı birikim oranını azaltmaktır. Bu da, hem aleve dayanıklı hem de termal olarak yalıtıcı olan bir giysi kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

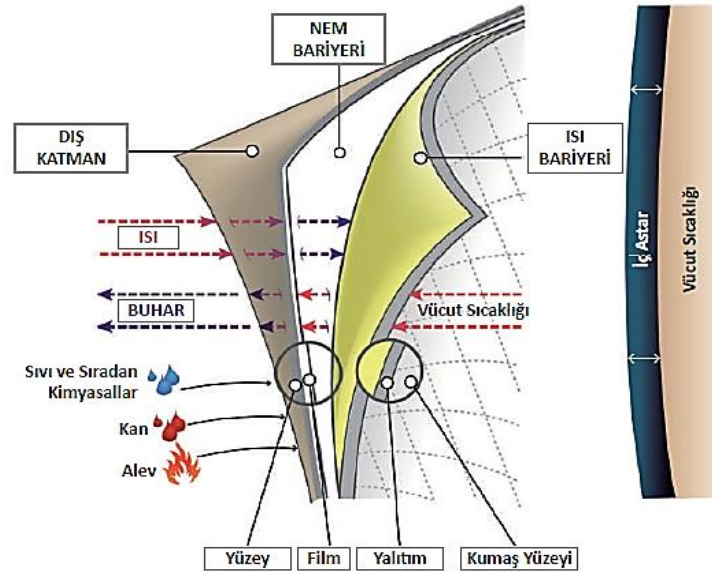
Koruyucu giysi aynı zamanda diğer gereksinimleri de karşılamalıdır. Isıya maruz kalma sırasında bütünlüğü korumalıdır. Kumaş veya kompozitde kullanılan lifler, erimez ve aleve dayanıklı olmalıdır. Lifler büzülmeye karşı dayanıklı olmalı ve yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve esnekliği korumalıdır. Cilde doğru olan ısı transferini azaltmak için düşük termal iletkenliğine ihtiyaç vardır. Konvektif ısı transferini en aza indirmek için hava geçirgenliği düşük olmalıdır. Koruyucu giysiler için en önemli işlevlerden biri, kullanıcıya uygulanan ısı stresi miktarını azaltmak ve normal çalışmayı engellememektir. Korunmayı arttırmak için yapılan değişiklikler genellikle giysi rahatlığını olumsuz yönde etkilemektedir.

İtfaiyeciler de çalışma koşullarından dolayı yüksek ısı akısı ve sıcaklıklara maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden aşınmaya, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerden yapılan termal koruyucu giysi kullanılmaktadırlar. Şekil 3.1’de örnek bir itfaiyeci giysisi görülmektedir.



Şekil 3.1 Örnek bir itfaiyeci giysisi (Yangın eğitimi, b.t)

Bir termal koruyucu giysisi tek veya çok katmanlı olabilmektedir. Giysinin çok katmanlı olması tek katmanlı olmasına kıyasla, katman aralarındaki hava boşluklarından dolayı daha iyi bir yalıtım sağlamaktadır. Bu yüzden tipik bir itfaiyeci giysisi genellikle üç katmandan oluşmaktadır. Bunlar dış katman, nem bariyeri ve termal astardır. Her bir katmanın ayrı görevi vardır. Bir termal koruyucu giysi yapısının şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Termal koruyucu kıyafetin yapısı (Kişisel Koruyucu Donanımlar, b.t)

3.1.1 Dış Katman

Dış katman koruyucu giysinin en dışında bulunan katmandır. Bu katman delinme, kesilme, aleve ve aşınmaya karşı dayanıklı malzemelerden yapılmaktadır ve itfaiyecinin dışarıdan gelen tehlikelerden korunmasını sağlamaktadır.

3.1.2 Nem Bariyeri

Nem bariyeri dış katmanın hemen altında olan tabakadır. Bu katmanın görevi, dış ortamdaki sıvıların itfaiyecinin cildine ulaşmasına engel olmaktır. Bir başka görevi ise vücutta oluşan terin dışarıya atılmasını sağlamaktır.

3.1.3 Termal Astar

Bu katman nem bariyerinin altında olan son tabakadır. Cilt ile teması olana katmandır. Termal astarın görevi diğer katmanları geçerek gelen ısıyı absorbe ederek yalıtım sağlamaktır. Termal astar, cilt yanıklarını önlemek için iyi bir ısı yalıtımına sahip olmalıdır. Genellikle Aramid malzemeler kullanılmaktadır.

3.2 Koruyucu Giysilerde Kullanılan Lifler

Bilindiği üzere termal koruyucu giysiler aleve dayanıklı lifler kullanılarak yapılmaktadır ve bu giysilerin üretiminde farklı birçok lif kullanılmaktadır. Bu lifler iki sınıfa ayrılabilir. Doğal olarak kendiliğinden aleve dayanıklı lifler ve kimyasal işlem sonucu dayanıklı hale gelen liflerdir. Tablo 1’de bu liflerin sınıflandırılması görülmektedir.

Tablo 3.1 Termal koruyucu giysilerde kullanılan lifler (Bulgun ve Yılmaz, 2010)

Kendiliğinden Aleve Dayanıklı Lifler	Kimyasal İşlem Sonucu Aleve Dayanıklı Lifler
Aramid Lifleri	Güç tutuşur viskoz lifleri
Polibenzimidazol lifleri (PBI)	Güç tutuşur polyester lifleri
Poliamid-imid lifleri	Güç tutuşur akrilik/modakrilik lifleri
Poliimid lifleri	Güç tutuşur pamuk lifleri
Novoloid lifleri	Güç tutuşur yün lifleri
Polifenilen sülfür lifleri	
Klor lifleri	
Poliakrilat lifleri	
Yarı karbon lifleri	
Melamin lifleri	

İtfaiyeci giysilerinde en çok kullanılan lifler aramid lifleri ve polibenzimidazol lifleridir (PBI).

Aramid lifleri, 400°C’nin üzerinde ve 700°C’ye kadar olan sıcaklıklarda kısa süreli maruz kalabilmektedirler. Nomex (DuPont), Conex (Teijin), Fenilon (Rusya) ve Apyeil (Unitika) meta-aramid lifleri, savaş pilotları, tank ekipleri, astronotlar ve belirli endüstrilerde çalışanlar için koruyucu giysiler geliştirilmiştir. Balistik ve alev koruması için Kevlar (DuPont), Twaron (Akzo Nobel) ve Technora (Teijin) gibi para-aramid lifler de kullanılmaktadır.

Nomex[®], askeri personel, astronotlar ve özel endüstriyel uygulamalarda çalışanlar için koruyucu giysiler geliştirilmiş en iyi bilinen meta-aramid elyafıdır. Nomex[®], 1962'de DuPont tarafından geliştirilmiştir. Benzer bir meta aramid elyafı, 1972'de Teijin tarafından Conex[®] olarak tanıtılmıştır. Ancak Nomex[®], yoğun ısı altında büzülebilir ve kırılabilir. Bu nedenle, para-aramid lifi olan Kevlar, yüksek ısı büzülmesini azaltmak için genellikle Nomex[®] ile karıştırılır. % 95 Nomex[®] ve % 5 Kevlar[®] karıştırılarak, ticari olarak satılan koruyucu kumaş Nomex[®] III elde edilir. Hoechst-Celanese tarafından üretilen Polibenzimidazol (PBI) lifi, yüksek sıcaklıklara ve kimyasallara dirençlidir ve mükemmel tekstil özelliklerine sahip olduğu bilinmektedir. Bu kumaşlar genellikle aramid liflerden daha iyi yangın koruması sağlarken, esnektir ve bütünlüğünü korur. Polibenzimidazol lifleri (PBI), aleve maruz kaldığında az miktarda duman çıkarırlar. PBI, kısa süreli (3–5 s) maruziyetlerde 600°C'ye kadar sıcaklıklara, uzun süreli maruz kalma için 350°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir. Uygulamaları arasında uçak koltuklarında yangın söndürme kumaşları, itfaiyeci takımları ve yarış arabası sürücüsü takımları sayılabilir. Yapılan çalışmalar, PBI lifinin % 100 pamuklulara eşdeğer konfor değerlerine sahip olduğunu göstermiştir.

3.3 Test Metotları

Kumaş tutuşması genellikle ateşleme alevin yayılma oranı ve yanma sırasında ortaya çıkan ısı miktarı ile karakterize edilmektedir. Dikkate alınan diğer faktörler, alevlenme süresi, yanan kumaşın sıcaklığı ve alev sönme kolaylığıdır. Nem ve ortam sıcaklığı da, test örneğindeki hava hareketinin yanı sıra önemli olmaktadır.

Isıya maruz kalan kumaşlar için Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO), Amerikan Test ve Materyaller Birliği (ASTM) ve Ulusal Yangın Önleme Derneği (NFPA) gibi çeşitli uluslararası kuruluşlar tarafından standartlar geliştirilmiştir. Test metodu genel olarak iki şekilde yapılmaktadır. Bunlar tam ölçek manken testleri ve tezgâh ölçek testleridir. Tam ölçek manken testi ve tezgâh ölçek testi için ayrı standartlar mevcuttur. Bu standartlar aparat boyutlarını, test koşullarını, deneysel

prosedürü, numune boyutlarını, maruz kalma koşullarını ve istenilen sonuçlarını rapor etmenin farklı yollarını belirtmektedir.

3.3.1 Tam Ölçek Manken Testleri

Giysilerin yanma davranışı ve termal koruyucu performansı, tezgah ölçekli kumaş testinden tam olarak tahmin edilememektedir. Manken testleri, sadece lif ve kumaşların termal fiziksel özelliklerini değil, aynı zamanda giysilerin tasarım ve uyumunu da etkiledikleri için, koruyucu performans değerlendirmesinin daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Tam ölçekli manken testlerinin geliştirilmesi, yangın maruziyetlerinin gerçekçi bir simülasyonunu sağladığından, giysi koruyucu performansının gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesine yönelik önemli olmaktadır.

Geçtiğimiz yıllar içerisinde, itfaiyeci koruyucu giysilerinin performansını analiz etmek için çeşitli tam ölçekli mankenler geliştirilmiştir. Sabit mankenlerin yüzeyine en az 100 ısı akısı sensörleri yerleştirilmektedir. İtfaiyecilerin karşılaştığı gerçek koşulları simüle etmek için manken, sekiz propan brülörünün sağladığı 20s'ye kadar 84 kW/m^2 'lik ortalama ısı akısına maruz kalmaktadır. Isı akısı sensörleri tarafından elde edilen verilere dayanarak, Stoll ve Chianta'nın önerdiği şekilde, ilgili konumlardaki ikinci ve üçüncü derece yanıklar tahmin edilmiştir. Son yıllarda, bazı terleme mankenleri de dâhil olmak üzere bu tür mankenler geliştirilmiştir (Udayraj, 2016). Geliştirilen bu mankenlerden birkaçı açıklanmıştır.

- **Tennessee Eastman Mankeni:** Bilinen en eski yangın test mankeni Tennessee Eastman şirketi tarafından yapılmıştır. Manken yüzeyi üzerine ısıl çift kullanılarak imal edilen toplam 80 adet sensör yerleştirilmiştir. Isıl çiftin zamana bağlı sıcaklık değişiminden ısı akısı belirlenmiştir. Bu ısı akısı, üç katmanlı cilt modelinde bir sınır koşulu olarak uygulanmış ve çeşitli sensör konumlarındaki birinci, ikinci ve üçüncü derece yanıklar belirlenmiştir.

- **Minnesota Kadın:** Minnesota Üniversitesi tarafından geliştirilen ilk kadın mankenlerden biridir. Temelde polyester ve fiberglasdan yapılmış yetişkin bir kadın boyutlarında olan mankendir. Ateşe dayanıklı hale getirmek için mankenin yüzeyi asbest ile kaplanmıştır. Yüzey sıcaklığını kaydetmek için 42 adet ısı çift mankene monte edilmiştir. Üç katmanlı cilt modelinde sıcaklık dağılımını elde etmek için kaydedilmiş yüzey sıcaklığı kullanılarak ikinci derece yanma süresi hesaplanmaktadır.
- **Thermo-man:** Koruyucu giysi performansını analiz etmek için ABD Hükümeti ile birlikte DuPont tarafından geliştirilen bir mankendir. Mankenin yüzeyinde 122 adet ısı akısı sensörü bulunmaktadır.
- **Pyro-man:** Kuzey Kaliforniya Üniversitesi tarafından Tekstil Koruma ve Rahatlık Araştırma Merkezinde geliştirilmiştir. Manken yüzeyi eşit olarak dağılmış 122 adet PyroCal ısı sensörü ile donatılmıştır. Sensörler bir veri toplama sistemi vasıtasıyla bilgisayara bağlıdır. Belirli bir alev maruziyetinden sonra ikinci ve üçüncü derece yanmanın meydana sensör konumlarına karşılık gelen yerleri gösterir.
- **Alberta Üniversitesi Mankeni 'Hary Burns':** Bu manken 110 ısı sensörü ile donatılmıştır. Manken 84kW/m^2 ortalama ısı akısı sağlamak için 12 propan brülörü ile çevrilidir.
- **RALPH ve SOPHIE mankeni:** Birleşik krallıktaki İngiliz tekstil teknoloji grubunda geliştirilen, RALPH bir erkek ve SOPHIE bir kadın mankendir. Kişisel koruyucu donanımın performansı, belirlenen süre boyunca 80 kW/m^2 alev maruziyeti ile değerlendirilir.
- **Donghua Alev Mankeni:** Çin'in Donghua Üniversitesinde geliştirilen erkek bir mankendir. Farklı vücut duruşlarına izin veren, birçok vücut bölümünden oluşan bir mankendir. Gerçek alev koşullarını üretmek için 12 brülör manken

etrafına yerleştirilmiştir. Manken, ısı transferini algılamak ve cilt yanığını tahmin etmek için 135 ısı akısı sensörü ile donatılmıştır.



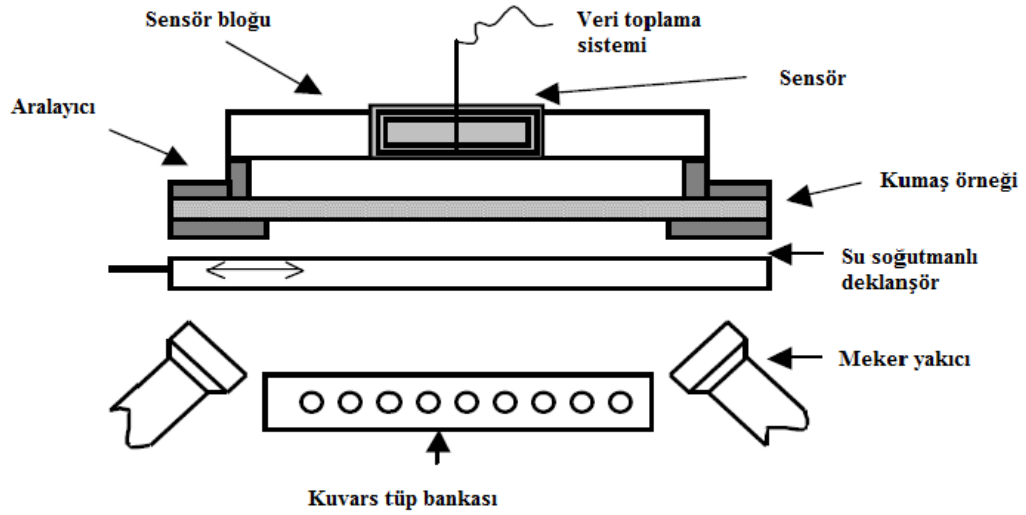
Şekil 3.3 Giysilerin termal koruyucu performansını ölçmek için yapılan manken testi (Song, 2002)

3.3.2 Tezgâh Ölçek Testleri

Kumaşların yüksek yoğunluklu termal enerjiye karşı yalıtım özelliklerini ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Tezgâh ölçek testleri koruyucu kumaşların performansını analiz etmek için daha kolay bir yol sağlamaktadır. Cihazda alev maruziyetini uygun bir şekilde temsil etmek ve hem konvektif hem de radyant akı dengesini korumak için, Meker brülörleri ve Kuvars tüpler kullanılmaktadır. Kumaş numunesine aktarılan ısı miktarı ölçülür ve ikinci derecede yanmaya neden olan süre Stoll kriteri kullanılarak hesaplanmaktadır. Sensörün sıcaklık eğrisi ve Stoll eğrisi aynı grafikte çizilir ve iki eğrinin birbiri ile kesiştiği nokta insan derisinin tolerans süresini vermektedir.

Tam ölçekli bir manken testi tezgâh üstü teste göre daha etkilidir ve giyim performansını değerlendirmede daha yararlı olmaktadır. Bununla birlikte manken testi

karışık, masraflı ve zaman alıcı bir testtir. Bu yüzden tezgâh ölçek testi nispeten daha basit, gerçekleştirmesi hızlı ve manken testine kıyasla daha az uzmanlık gerektirmektedir. Şekil 3.4'te tam ölçekli tezgah ölçek test düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Tezgâh ölçek test düzeneğinin şematik gösterimi (Song, 2002)

BÖLÜM DÖRT

İNSAN DERİSİ VE İTFAİYECİ GİYSİSİ İÇİN OLUŞTURULAN SAYISAL MODELLER

4.1 İnsan Derisindeki Isı Geçişi Modeli

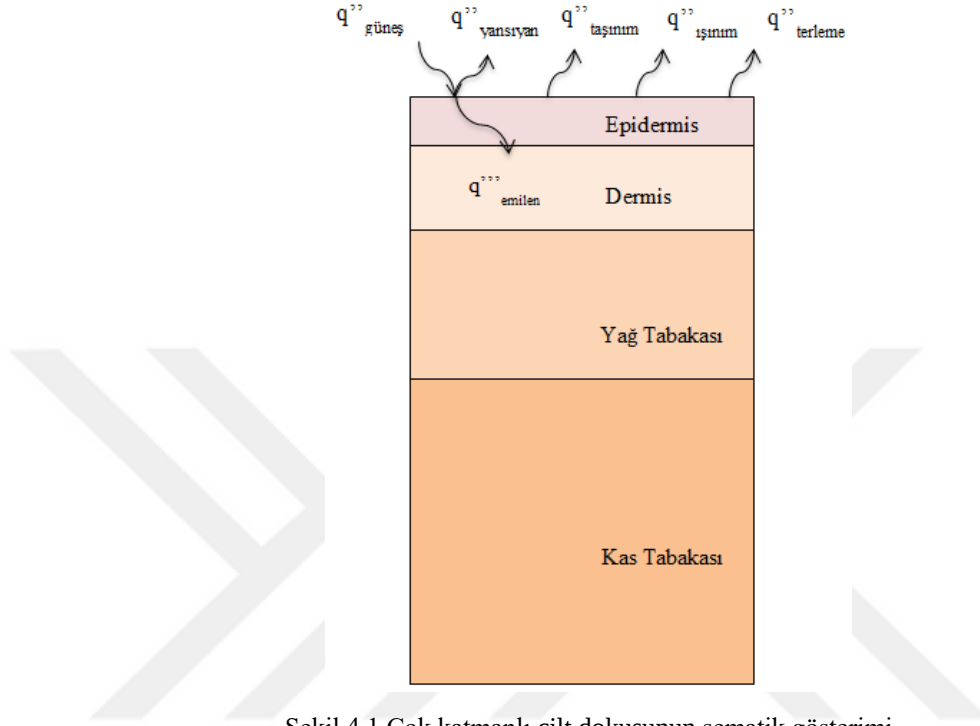
Biyo-ısı geçişi ile insan vücudunun sayısal olarak modellenmesi farklı çevre koşulları altında vücudun termal davranışlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Biyo-ısı modelleri çeşitli uygulamalarda gerekli olmaktadır. Yangınla mücadelede itfaiyeciler için, ısıtmaya dayalı tıbbi lazer uygulamalarında sıcaklık dağılımı hakkında bilgi sahibi olmak için ve farklı çevresel koşullarda vücudun ısı tepkilerinin incelenmesinde biyo-ısı modelleri kolaylık sağlamaktadır. Bu tür uygulamalar için literatürde vücudun sıcaklık dağılımını öngörebilen farklı çalışmalar bulunmaktadır.

Bu bölümde çok katmanlı bir insan derisi modeli sunulmuştur. Bu model deri yüzeyine gelen güneş ışınlamı, taşınım ve terleme sınır koşulları altında Pennes biyo-ısı denklemi kullanılarak çözülmüştür. İnsan derisindeki, sıcaklık dağılımı elde ederek derideki yanık yaralanmalarının derecesinin bulunması amaçlanmıştır. Çözümleme Comsol Multiphysics programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir.

4.1.1 Problemin Tanımı

Canlı dokudaki ısı transferini modellemek için yaygın olarak Pennes Biyo-ısı modeli kullanılmaktadır. İnsan derisi, epidermis, dermis, yağ tabakası ve kas tabakası olmak üzere dört katmana ayrılmıştır. Kan perfüzyonu epidermis katmanında olmamaktadır. Çalışma, insan derisi ve çevre arasında bir enerji alışverişi olduğu varsayımına dayanmaktadır. Pennes modeline göre, akan kan tarafından toplam ısı transferi, hacimsel akış oranı ve kan ve doku arasındaki sıcaklık farkı ile orantılı olmaktadır. Yine bu modelde kanın dokuya atardamar sıcaklığında girdiği ve dokuyu yine aynı sıcaklıkta terk ettiği varsayılmaktadır.

Yapılan çalışmada, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi çok katmanlı bir deri modeli oluşturulmuştur. Her bir katman homojen varsayılmıştır.



Şekil 4.1 Çok katmanlı cilt dokusunun şematik gösterimi

Doku katmanlarının termofiziksel özellikleri ve kalınlıkları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Doku katmanlarının termofiziksel özellikleri (Küçük, 2016)

Doku	Kalınlık (mm)	Yoğunluk, $\rho(\text{kg/m}^3)$	Isı İletim Katsayısı, $k (\text{W/m} \cdot \text{K})$	Özgül Isı, $C_p (\text{J/kg} \cdot \text{K})$	Kan Perfüzyon Hızı, $\omega_{kn} (\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^3)$	Metabolik Isı Üretimi, $\dot{q}_m (\text{W/m}^3)$
Epidermis	0,075	1000	0,21	3182	0	45
Dermis	1,5	1000	0,37	2846	4×10^{-6}	45
Yağ Dokusu	3,425	1000	0,16	1975	0	45
Kas Dokusu	30	1000	0,5	4000	0,00125	700
Kan	-	1100	-	3300	-	-

4.1.2 Matematiksel Model Denklemleri

Oluşturulan modelde kullanmış olduğumuz Pennes biyo-ısı denklemi daha önce verilen denklem 2.1'deki gibidir.

$$\rho_d c_{p,d} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \rho_{kn} c_{p,kn} \omega_{kn} (T_{atr} - T_d) + \dot{q}_m + \dot{q}_{diğer} \quad (2.1)$$

Burada, ρ_d , $c_{p,d}$, T_d , k_d sırasıyla dokunun yoğunluğu, özgül ısısı, sıcaklığı ve ısı iletim katsayısıdır. ρ_{kn} , $c_{p,kn}$, ω_{kn} , kanının yoğunluğunu, özgül ısısını, perfüzyon hızını ifade etmektedir. T_{atr} , atardamardaki kanın sıcaklığı olup değeri 310 K'dir. $\dot{q}_m$, metabolik ısı üretimini, $\dot{q}_{diğer}$, dış kaynaklı ısı üretimini ifade etmektedir.

Çalışmada başlangıç sınır koşulu olarak tüm katmanlarda 308 K değerinde üniform bir başlangıç sıcaklığı kullanılmıştır.

$$T_{d,bas} = 308 \text{ K}, \quad t = 0 \quad (4.1)$$

Çalışmada modelin, tek boyutlu sıcaklık dağılımını elde etmek için, yan yüzeylerinin yalıtılmış olduğu varsayılmıştır.

- *Sınır Koşulları*

Yüzeyden taşınım ile olan ısı geçişi;

$$q''_{taşınım} = h \cdot (T_y - T_{\bar{c}}) \quad (4.2)$$

Burada T_y ve $T_{\bar{c}}$ sırasıyla deri yüzeyinin sıcaklığı ve çevre sıcaklığıdır. h , ise çevre ve yüzey arasındaki taşınım katsayısını ifade etmektedir. Çalışmada bu değer $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olarak alınmıştır.

Işınım ile olan ısı kaybı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q''_{ışınım} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_y^4 - T_{gök}^4) \quad (4.3)$$

Burada ε deri yüzeyinin yayınım katsayısıdır. Bu çalışmada değeri 0,95 olarak alınmıştır. σ Stefan Boltzman sabiti olup $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ değerindedir. T_y ve $T_{gök}$ sırasıyla yüzey sıcaklığı ve yüzeye çevresinden gelen sıcaklığı ifade etmektedir.

Deriden terlemeyle olan ısı kaybı aşağıdaki eşitlikten bulunabilir (Küçüka, 2016).

$$q''_{terleme} = 8,329 \cdot 10^{-6} \cdot (e^{0,0553T_y} - RH \cdot e^{0,0553T_{\infty}}) \quad (4.4)$$

Güneşten deri yüzeyine gelen ışıının deri içerisinde homojen olarak emildiğini varsayımını yaparak deri içerisinde emilen ışıının şiddetini Denklem 4.5'ten hesaplanabilir (Küçüka, 2016);

$$q''_{emilen} = \frac{\alpha_{güneş} \cdot q''_{güneş}}{\Delta L} \quad (4.5)$$

Burada $\alpha_{güneş}$ emilim katsayısı olup değeri bu çalışmada 0,9 kabul edilmiştir. $q''_{güneş}$, deri yüzeyine gelen güneş ışıınıdır ve değeri 900 W/m^2 alınmıştır. Güneş ışıının epidermis ve dermisde emildiği varsayılmaktadır. Bu nedenle ΔL epidermis ve dermis tabakalarının kalınlıkları toplamıdır.

Deri yüzeyindeki iletimle olan ısı transferi ise;

$$k \frac{dT}{dz} = q''_{taşınım} + q''_{ışınım} + q''_{terleme} \quad (4.6)$$

- *Doku Hasarı Tespiti*

Doku yanık yaralanma modeli, Henriques ve Moritz'in çalışmasına dayanmaktadır. Termal hasar, insan derisindeki epidermis ve dermis arasındaki ara yüzeyindeki sıcaklığın (bazal katman olarak adlandırılır) 44°C 'nin üzerine çıkmasıyla oluşmaktadır.

Doku hasarı oranını tahmin etmek için daha önce denklem 2.17’de verilen Arrhenius oranı denklemi kullanılabilir.

Birinci ve ikinci derece yanıkları tahmin etmek için, insan derisindeki epidermis ve dermis arasındaki ara yüzeydeki sıcaklık denklemde T olarak kullanılır. Ω değeri aynı ara yüzeyde 1,0’a eriştiğinde ikinci derece yanık oluşmaktadır. Üçüncü derece yanıkları tahmin etmek için, dermis ve yağ tabakası arasındaki ara yüzeydeki sıcaklık (dermal katman olarak adlandırılır) denklemde T olarak kullanılır. Üçüncü derece yanık Ω değeri 10000 değerine ulaştığında gerçekleşmektedir. Tablo 4.2’de çözümlemede gerekli olan parametrelerin sayısal değerleri verilmiştir.

Tablo 4.2 Bağıntılarda kullanılan parametrelerin sayısal değerleri

P	ΔE	RH	$T_{gök}$	$T_{ç}$
$3,1 \times 10^{98} \text{ s}^{-1}$	$6,27 \times 10^5 \text{ J/kmol}$	0,5	303 K	308 K

4.1.3 Sayısal Çözüm

Bu çalışmada, insan derisinin çok katmanlı geometrik modeli oluşturuldu ve Comsol Multiphysics programı kullanılarak sonlu elemanla yöntemiyle çözülmüştür. Başlangıçta tüm deri katmanlarının (epidermis, dermis, yağ tabakası, kas tabakası) sıcaklığı 308 K olarak varsayılmıştır. Deri yüzeyinden ısıtım, taşınım ve terleme mekanizmaları ile ısı geçişi olmaktadır. Dokudaki ısı geçişini bulmak için Pennes biyo-ısı denklemi kullanılmıştır. Sıcaklık dağılımını elde etmek için programın ‘Bioheat Transfer’ modülünden yararlanılmıştır. Oluşturulan modelde normal üçgensel bir ağ yapısı kullanılmıştır. $2,45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ’lik bir ağ alanında 901 üçgensel eleman kullanılarak, 5400 saniye sonundaki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

4.2 İnsan Derisindeki Isı ve Nem Geçişi

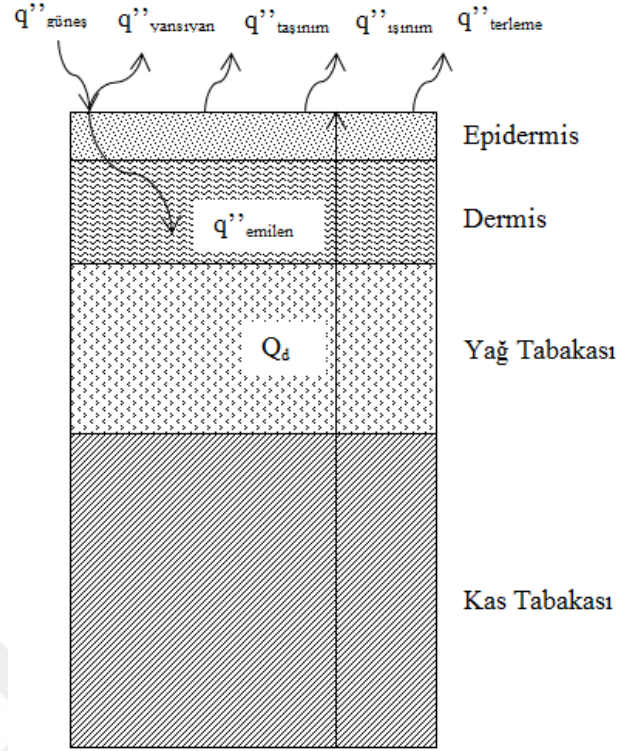
İnsan dokusundaki ısı geçişinin yanı sıra nem geçişi de önemi bir olgudur. Önceki çalışmaya buharlaşma ve derideki su difüzyonu da eklenerek çalışma genişletilmiştir. Oluşturulan modelde çok katmanlı bir deri modeli sunulmuştur. Bu model deri yüzeyine gelen güneş ısıtımını, taşınım ve terleme sınır koşulları altında Pennes biyo-

ısı denklemi kullanılarak çözülmüştür. Buna bağlı olarak sıcaklık ve derişim dağılımları elde edilmiştir. Ayrıca insan derisindeki, farklı ısı parametreler ve çevre koşulları altındaki sıcaklık ve derişim dağılımları da incelenmiştir. Çözümleme Comsol Multiphysics programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir.

4.2.1 Problemin Tanımı

Bir önceki modelde oluşturulan dört katmanlı insan derisi sisteminde sıcaklık dağılımı elde edilmişti. Bu bölümde ise modele ısı geçişinin yanında nem geçişi eklenmiştir.

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi insan derisi dört katmandan oluşmaktadır. Bunlar epidermis, dermis, yağ tabakası ve kas tabakasıdır. Tüm katmanların homojen olduğu kabul edilmektedir. Deri yüzeyinden ısınım, taşınım ve terleme mekanizmaları ile ısı geçişi olmaktadır. Modelin sayısal çözümü Comsol Multiphysics programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır. Isıl parametrelerin ve çevre sıcaklığının değiştirilmesiyle cilt içerisindeki sıcaklık ve su derişim dağılımının bulunmuştur.



Şekil 4.2 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelinin şematik gösterimi

4.2.2 Matematiksel Model Denklemleri

Oluşturulan çok katmanlı insan derisi modelinde daha önce denklem 2.1’de verilen Pennes’in biyo-ısı denklemi kullanılmıştır. Modelde kullanılan doku katmanlarının ve kanın termofiziksel değerleri Tablo 4.1’ de listelendiği gibidir.

Cildin kan perfüzyonu, su difüzyonu ve buharlaştırma dâhil olmak üzere ısı ve kütle transferi çok katmanlı cilt modeli için aşağıdaki gibi yazılabilir (Fu vd, 2014).

Epidermis tabakasında kan perfüzyonu olmamaktadır. Suyun deri içinden difüzyon ile olan ısı kaybı her katmanda olmaktadır.

Epidermis için:

$$\rho_d c_{p,d} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_d \nabla T_d) + q'''_{dif} + q'''_m \quad (4.7)$$

Dermis, yağ tabakası ve kas tabakası için:

$$\rho_d c_{p,d} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_d \nabla T_d) + \rho_{kn} c_{p,kn} \omega_{kn} (T_{atr} - T_d) + q'''_{dif} + q'''_m \quad (4.8)$$

Burada q'''_{dif} su difüzyonu ile olan ısı kaybıdır.

$$q'''_{dif} = - \frac{D_{dif} c_{p,s} (C_y - C_{\check{c}})(T_y - T_{\check{c}})}{(\Delta x)^2} \quad (4.9)$$

Burada D_{dif} , derideki su difüzyon katsayısıdır. $c_{p,s}$, suyun özgül ısısını ifade etmektedir. C_y ve $C_{\check{c}}$ yüzeydeki ve çekirdekdeki derişimi, T_y ve $T_{\check{c}}$ sırasıyla yüzey ve çekirdek sıcaklıklarını ifade etmektedir. Δx , ise tüm katmanların kalınlıkları toplamıdır.

Tablo 4.3 Denklemlerde kullanılan parametrelerin değerleri

D_{dif}	$c_{p,s}$	$C_{\check{c}}$	$T_{\check{c}}$	Δx
$5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	$4200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$43333 \text{ mol}/\text{m}^3$	298 K	$0,035 \text{ m}$

- Başlangıç koşulu

Modelde başlangıç sınır koşulu olarak tüm katmanlarda 308 K değerinde üniform bir başlangıç sıcaklığı kullanılmıştır. Tüm katmanlardaki başlangıç derişim değeri ise $43333 \text{ mol}/\text{m}^3$ olarak alınmıştır (Shen vd, 2005). Seçmiş olduğumuz geometrinin tek boyutlu çözümünü sağlamak için yan yüzeylerinin yalıtılmış olduğu varsayılmıştır.

$$T_{d,bas} = 308 \text{ K} , \quad t = 0 \quad (4.10)$$

$$C_{\check{c},bas} = 43333 \text{ mol}/\text{m}^3 \quad t = 0 \quad (4.11)$$

- Sınır Koşulları

Yüzeyden taşınım ile olan ısı geçişi;

$$q''_{\text{taşınım}} = h \cdot (T_y - T_{\text{ç}}) \quad (4.12)$$

Burada T_y ve $T_{\text{ç}}$ sırasıyla deri yüzeyinin sıcaklığı ve çevre sıcaklığıdır. h , ise çevre ve yüzey arasındaki taşınım katsayısını ifade etmektedir.

Işınım ile olan ısı kaybı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q''_{\text{ışınım}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_y^4 - T_{\text{gök}}^4) \quad (4.13)$$

Burada ε deri yüzeyinin yayınım katsayısıdır. Bu çalışmada değeri 0,95 olarak alınmıştır. σ Stefan Boltzman sabiti olup $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ değerindedir. T_y ve $T_{\text{gök}}$ sırasıyla yüzey sıcaklığı ve yüzeye çevresinden gelen sıcaklığı ifade etmektedir.

Deriden terlemeyle olan ısı kaybı;

$$q''_{\text{terleme}} = \dot{m} \cdot h_{fg} \quad (4.14)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada h_{fg} , suyun buharlaşma entalpisidir. Değeri 2408 kJ/kg olarak alınmıştır. $\dot{m}$, deri yüzeyinden suyun buharlaşma oranını ifade etmektedir. Bu oranı ise aşağıdaki eşitlikten bulabiliriz (Fu vd, 2014).

$$\dot{m} = \frac{-D_v \cdot M}{\delta \cdot R} \left(\left(\frac{P_v}{T} \right)_y - \left(\frac{P_v}{T} \right)_h \cdot RH \right) \quad (4.15)$$

$P_{v,y}$ ve $P_{v,h}$ deri ve atmosferik su buharı basıncıdır. T sıcaklığındaki doymuş buhar basıncı ise aşağıdaki denklemle ifade edilir (Wilson ve Spence, 1988).

$$P_{\text{doyma}} = 3.99 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0.0265 \cdot T} \quad (4.16)$$

D_v sınır tabakadaki ortalama su buharı difüzivitesidir ve $2,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ alınmıştır. M , suyun molar kütlesi olup değeri 0,018 kg/mol'dür. R evrensel gaz sabiti olup 8,314

J/mol·K'dir. ϕ çevre ortamın bağıl nem oranıdır. δ ise derişim sınır tabaka kalınlığını ifade etmektedir. Derişim sınır tabaka kalınlığının bulabilmesi için öncelikle hız sınır tabakası aşığıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$\delta_{hız} = \frac{4,91}{1,5} \sqrt{\frac{L \cdot \vartheta}{V_{\infty}}} \quad (4.17)$$

Burada ϑ , kinematik viskozite olup $1,57 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir. V_{∞} , ise havanın hızını ifade etmektedir ve değeri bu çalışmada 0,003 m/s olarak seçilmiştir. L , Denklem 4.18'de verilen çok katmanlı dokunun genişliğidir ve değeri 0,007 m olarak alınmıştır.

$$\delta_{konsantrasyon} = \frac{\delta_{hız}}{Sc^{1/3}} \quad (4.18)$$

Sc Schmidt sayısını ifade eder ve aşığıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$Sc = \frac{\vartheta}{D_v} \quad (4.19)$$

Güneşten deri yüzeyine gelen ışıının deri içerisinde homojen olarak emildiğini varsayımını yaparak deri içerisinde emilen ışıının şiddeti hesaplanabilir. Bu terim metabolik ısı üretimi terimine eklenmiştir.

$$q''_{emilen} = \frac{\alpha_{güneş} q''_{güneş}}{\Delta L} \quad (4.20)$$

İletim ile olan toplan ısı transferi aşığıdaki gibi yazılabilir.

$$-k \frac{dT}{dz} = q''_{taşınım} + q''_{ışıınım} + q''_{terleme} \quad (4.21)$$

4.2.3 Sayısal Çözüm

Bu çalışmada oluşturulan çok katmanlı geometrik modelin Comsol Multiphysics programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal çözümlemesi gerçekleştirilmiştir. Geometrinin kalınlıkları ve termofiziksel özellikleri programa aktarılmış, sınır ve başlangıç koşulları tanımlanmıştır. Sıcaklık dağılımını elde etmek için programın ‘Bioheat Transfer’ modülünden, derişim dağılımını elde etmek için ise ‘Transport of Diluted Species’ modülünden yararlanılmıştır. Modelde normal üçgensel bir ağ yapısı kullanılmıştır. $2,45 \times 10^{-4}$ m²’lik bir ağ alanında 904 üçgensel eleman kullanılarak sıcaklık ve derişim dağılımları bulunmuştur. Bu başlangıç ve sınır koşullarına göre sıcaklık ve derişim dağılımı elde edilmiştir. Model parametrelerinin ve çevresel koşulların sıcaklık ve derişim dağılımına olan etkileri incelenmiştir.

4.3 İtfaiyeci Giysisi ve İnsan Derisindeki Isı Geçişi

Tehlikeli koşullar altında çalışan işçilerin ve itfaiyecilerin güvenliği günümüzde bir endişe kaynağı olmaktadır. Her yıl yangın sonucunda birçok itfaiyeci yaralanmaktadır. İtfaiyeciler de flaş ateşine ve ayrıca yüksek sıcaklık ve ısı akısına maruz kalmaktadırlar. Ateşe maruz kalma süresi genellikle kısadır ve itfaiyeci yangın alanından çıktığında sona ermiş olur.

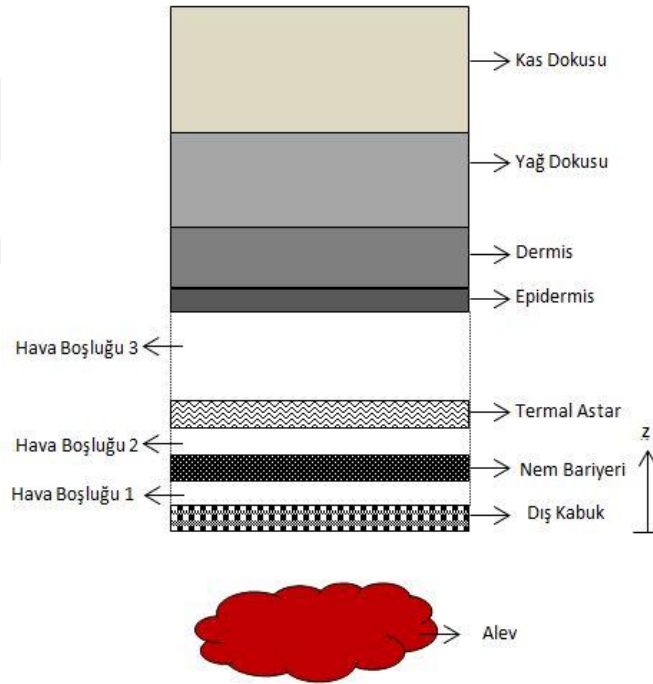
Yanık yaralanmalarını önlemek ve en aza indirmek için termal koruyucu kıyafetlerin tasarlanmasında sıcaklık dağılımının bulunması önemli olmaktadır. Bu modeldeki çalışmanın amacı itfaiyeci koruyucu giysilerindeki ısı geçişinin hesaplanarak deri yüzeyindeki sıcaklık ve derideki hasar oranını bulmaktır.

4.3.1 Problemin Tanımı

Termal koruyucu giysi-hava boşluğu-insan derisi sistemi için matematiksel bir model oluşturulmuştur. Giysi katmanlarını birbirinden hava boşluğu ayırmaktadır. Modelin sayısal çözümlemesi Comsol Multiphysics programı kullanılarak yapılmıştır. Model 10 saniye boyunca sıcak gazlara maruz kalmaktadır. Yüksek ısı ve alev

maruziyeti sırasında dokuda oluşacak hasar oranı Arrhenius yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada ayrıca çeşitli parametrelerin (kıyafet arasındaki hava boşluğu genişliği, gaz sıcaklığı) etkileri incelenmiştir.

Şekil 4.3'te üç farklı kumaş katmanından, insan derisinden ve giysiler arasında ve cilt ile kıyafet arasında bulunan hava boşluklarından oluşan giysi sistemi gösterilmektedir. Kumaş en dışta dış kabuk, nem bariyeri ve termal astardan oluşmaktadır. Her bir katmanı birbirinden 1 mm genişliğindeki hava boşluğu ayırmaktadır. İnsan derisi epidermis, dermis, yağ dokusu ve kas dokusu olmak üzere dört tabakadan oluşmaktadır. Kumaş katmanı ve insan derisi arasındaki boşluk ise TPP standartlarında belirtilen 6,4 mm değeri alınmıştır (Ghazy, 2011).



Şekil 4.3 Çok katmanlı kıyafet sisteminin şematik gösterimi

4.3.2 Matematiksel Model Denklemleri

Oluşturulan itfaiyeci giysisi-hava boşluğu-insan derisi sistemi modelinde ısı geçişini incelemek için, modelleme denklemleri üç ana grupta incelenebilir: kumaş katmanlarındaki ısı geçişi, hava boşluklarındaki ısı geçişi ve insan derisindeki ısı geçişi.

4.3.2.1 Kumaş Katmanındaki Isı Geçişi

- *Dış kabuk için ısı geçişi;*

Kumaşın en dışında bulunan dış kabuk için enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho_{dk} c_{p,dk} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{dk} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial q_R''}{\partial z} \quad (4.22)$$

Burada ρ_{dk} , $c_{p,dk}$, k_{dk} sırasıyla kumaşın dış kabuk katmanının yoğunluğu, özgül ısı ve termal iletkenliğidir. q_R'' , alevden dış kabuğa gelen radyant ısı akısıdır. Termal radyasyonun kumaş gözeneklerine nüfuz ederek absorbe edildiğini açıklamak için Beer yasası kullanılmıştır (Holman, 2010).

$$q_R''(z) = \sigma \cdot \varepsilon_g \cdot T_g^4 \cdot \exp(-\gamma_{dk} z) \quad (4.23)$$

Burada σ , Stefan Boltzman sabiti olup $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ değerindedir. ε_g ve T_g sırasıyla sıcak gazların yayma katsayısı ve sıcaklığı olup değerleri 0,02 ve 2000 K'dir. γ_{dk} , ise dış kabuğun sönüm katsayısıdır.

$$\gamma_{dk} = \frac{-\ln(\tau_{dk})}{L_{dk}} \quad (4.24)$$

τ_{dk} , giysi dış kabuğunun yansımaya oranıdır ve 0,01 olarak alınmıştır. L_{dk} , ise dış kabuğun kalınlığıdır.

Dış kabuğun enerji denklemi için sınır koşulları aşağıdaki gibidir (Ghazy ve Bergstrom, 2012).

$$k_{dk} \frac{\partial T}{\partial z} = h_{alev}((T_g - T_{dk})) - \sigma \cdot \varepsilon_{dk} \cdot (1 - \varepsilon_g)(T_{dk}^4 - T_{\zeta}^4) \quad (4.25)$$

Burada h_{alev} , alevden dış kabuğa doğru taşınım ile olan ısı transfer katsayısı olup değeri $40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 'dir (Ghazy,2012). ε_{dk} , dış kabuğun yayma katsayısıdır ve T_{ζ} ise çevre ortam sıcaklığını ifade etmektedir ve 300 K olarak alınmıştır. Dış kabuğun başlangıç koşulu aşağıdaki gibidir.

$$T_{dk}(z, t = 0) = T_{\zeta} \quad (4.26)$$

- *Nem bariyeri için ısı geçişi;*

Dış kabuğun hemen altında bulunan katmandır ve bu katman için enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho_{nb} c_{p,nb} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{nb} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.27)$$

Başlangıç koşulu;

$$T_{nb}(z, t = 0) = T_{\zeta} \quad (4.28)$$

Burada ρ_{nb} , $c_{p,nb}$ ve k_{nb} sırasıya nem bariyer katmanının yoğunluğu, özgül ısı ve termal iletkenliğidir.

- *Termal astar için ısı geçişi;*

Termal astar nem bariyerinin altındaki katman olup cilde yakın olan kumaş tabakasıdır. Termal astar için enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho_{ta} c_{p,ta} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{ta} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.29)$$

Burada ρ_{ta} , $c_{p,ta}$ ve k_{ta} sırasıyla termal astarın yoğunluğu, özgül ısı ve termal iletkenliğidir. Termal astarın başlangıç koşulu aşağıdaki gibidir. Giysi katmanlarının termal özellikleri ise Tablo 4.4’de gösterilmektedir.

$$T_{ta}(z, t = 0) = T_{\zeta} \quad (4.30)$$

Tablo 4.4 Giysi katmanlarının termofiziksel özellikleri

Özellik	Dış Kabuk	Nem Bariyeri	Termal Astar
Kalınlık (m)	$0,6 \times 10^{-3}$	$8,5 \times 10^{-4}$	$9,5 \times 10^{-4}$
Yoğunluk (kg/m^3)	323	250	220
Özgül Isı ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	1005	1150	1300
Isıl İletkenlik ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	0,08	0,05	0,052
Yayma Katsayısı	0,9	0,9	0,9

4.3.2.2 Hava Boşluklarındaki Isı Geçişi

Hava boşluklarındaki ısı geçişi iletim ile ve radyasyonla olmaktadır. Hava boşluklarındaki enerji denklemi şu şekilde ifade edilebilir (Ghazy ve Bergstrom, 2012).

$$\rho_h c_{p,h} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial q_{R,h}}{\partial z} \quad (4.31)$$

Burada ρ_h , $c_{p,h}$, k_h sırasıyla hava boşluğundaki hava yoğunluğunu, özgül ısını ve termal iletkenliğini ifade etmektedir. $q_{R,h}$, hava boşluğu boyunca yayılan ışımsal ısı akısıdır. Işımsal ısı akısının sapması aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial q_{R,h}}{\partial z} = \kappa(4\pi I_b - G) \quad (4.32)$$

Burada κ , hava boşluğu absorpsiyon katsayısıdır. I_b , siyah cisim yoğunludur. G , gelen radyasyonu ifade etmektedir.

Başlangıç koşulu;

$$T(z, t = 0) = T_{\zeta} \quad (4.33)$$

4.3.2.3 İnsan Derisindeki Isı Geçişi

İnsan derisindeki ısı davranışları incelemek için Pennes'in biyo-ısı denklemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Pennes biyo-ısı denklemi aşağıdaki gibi yazılmaktadır (Pennes, 1948).

$$\rho_d c_{p,d} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_d \nabla T_d) + \rho_{kn} c_{p,kn} \omega_{kn} (T_{atr} - T_d) \quad (4.34)$$

Burada ρ_d , $c_{p,d}$, k_d ve T_d sırasıyla dokunun yoğunluğu, özgül ısısı, ısı iletim katsayısı ve sıcaklığıdır. ρ_{kn} , $c_{p,kn}$ ve ω_{kn} kanın yoğunluğunu, özgül ısısını ve perfüzyon hızını ifade etmektedir. T_{atr} , atardamardaki kanın sıcaklığıdır ve değeri 310 K'dir. Deri tabakalarındaki enerji denklemleri aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\rho_{ep} c_{p,ep} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_{ep} \nabla T) \quad (4.35)$$

$$\rho_{ds} c_{p,ds} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_{ds} \nabla T) + \rho_{kn} c_{p,kn} \omega_{kn} (T_{art} - T_d) \quad (4.36)$$

$$\rho_{yağ} c_{p,yağ} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_{yağ} \nabla T) + \rho_{kn} c_{p,kn} \omega_{kn} (T_{art} - T_d) \quad (4.37)$$

$$\rho_{kas} c_{p,kas} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_{kas} \nabla T) + \rho_{kn} c_{p,kn} \omega_{kn} (T_{art} - T_d) \quad (4.38)$$

İnsan derisinde başlangıç sınır koşulu olarak tüm tabaklarda sıcaklık 308 K kabul edilmiştir. Kas dokusunun vücut çekirdeğine yakın sınırındaki sıcaklık ise atardamar sıcaklığı yani 310 K olarak kabul edilmiştir. İnsan derisi için termofiziksel özellikler Tablo 4.5'te gösterilmektedir.

Tablo 4.5 Deri tabakalarının termofiziksel özellikleri (Ghazy, 2012 ve Küçüka, 2016)

Özellik	Epidermis	Dermis	Yağ Dokusu	Kas Dokusu	Kan
Kalınlık (m)	$7,5 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$3,425 \times 10^{-3}$	0,01	-
Yoğunluk (kg/m ³)	1200	1200	1000	1000	1060
Özgül Isı (J/kg.K)	3598	3222	2760	4000	3770
Isıl İletkenlik (W/m.K)	0,255	0,523	0,167	0,5	-
Kan Perfüzyon oranı (m ³ /s)/m ³	-	-	-		0,0125

Doku yanık yaralanma modeli Henriques ve Moritz'in (Henriques ve Moritz, 1947) çalışmalarına dayanmaktadır. Termal hasar insan derisinde epidermis ve dermis arasındaki arayüzeyde (bazal katman) sıcaklığın 44°C'den fazla olması durumunda meydana gelir. Denklem 2.17'de verilen Arrhenius hız denklemi doku hasarını tahmin etmek için kullanılabilir.

İnsan derisindeki birinci ve ikinci derecedeki yanıkları öngörmek için bazal katman sıcaklığı kullanılmalıdır. Bu arayüzeyde birinci derece yanma $\Omega = 0,53$ 'e ulaştığında, ikinci derecedeki yanma ise $\Omega = 1$ 'e ulaştığında oluşmaktadır. Üçüncü derece yanıklar dermis ve yağ dokusu arasındaki ara yüzeydeki (dermal katman) sıcaklık kullanılarak hesaplanır. Üçüncü derecede yanma $\Omega = 10000$ ulaştığında oluşmaktadır.

4.3.3 Sayısal Çözüm

Modelde çok katmanlı bir giysi ve insan derisi sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matematiksel model Comsol Multiphysics programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle çözülmüştür. Giysi katmanlarına ve insan derisine ait sınır ve başlangıç koşulları programa tanımlanmıştır. Programın 'Heat Transfer in Solid' modülünden yararlanılmıştır. Model 10 saniye boyunca sıcak gaz maruziyetine bırakılmaktadır. Geometrik modelde $1,806 \times 10^{-4}$ m²'lik alanda 2383 üçgensel eleman kullanılarak sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

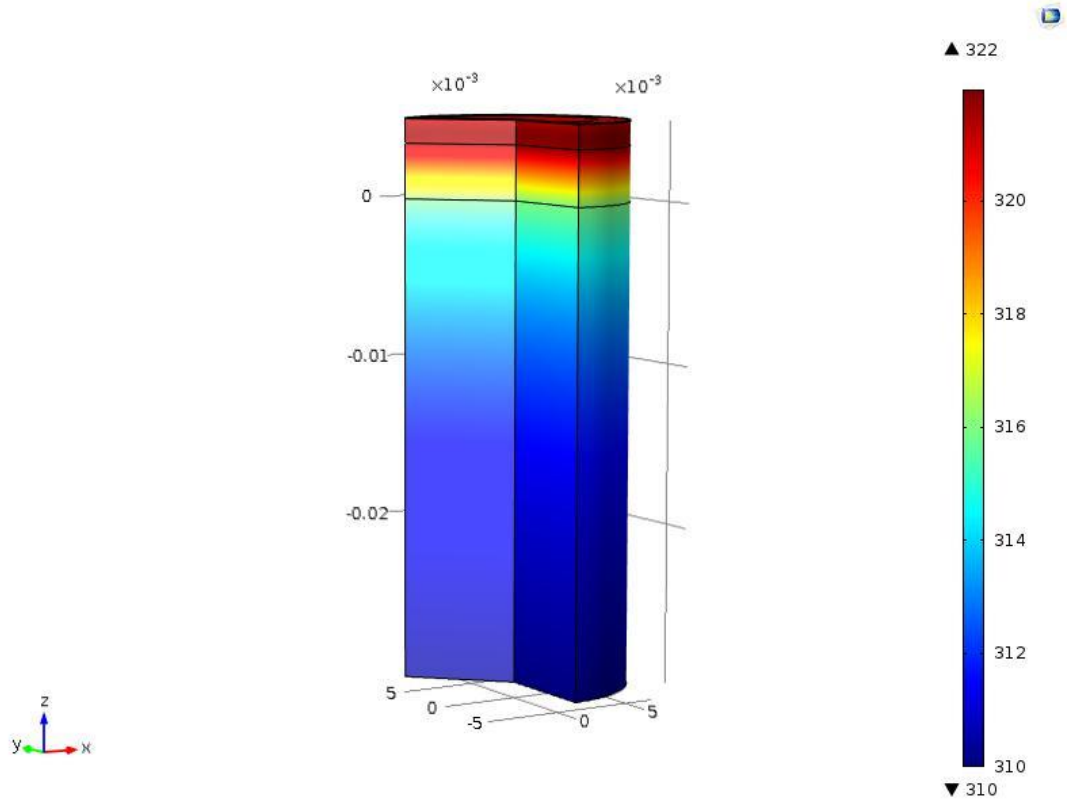
BÖLÜM BEŞ

BULGULAR VE TARTIŞMA

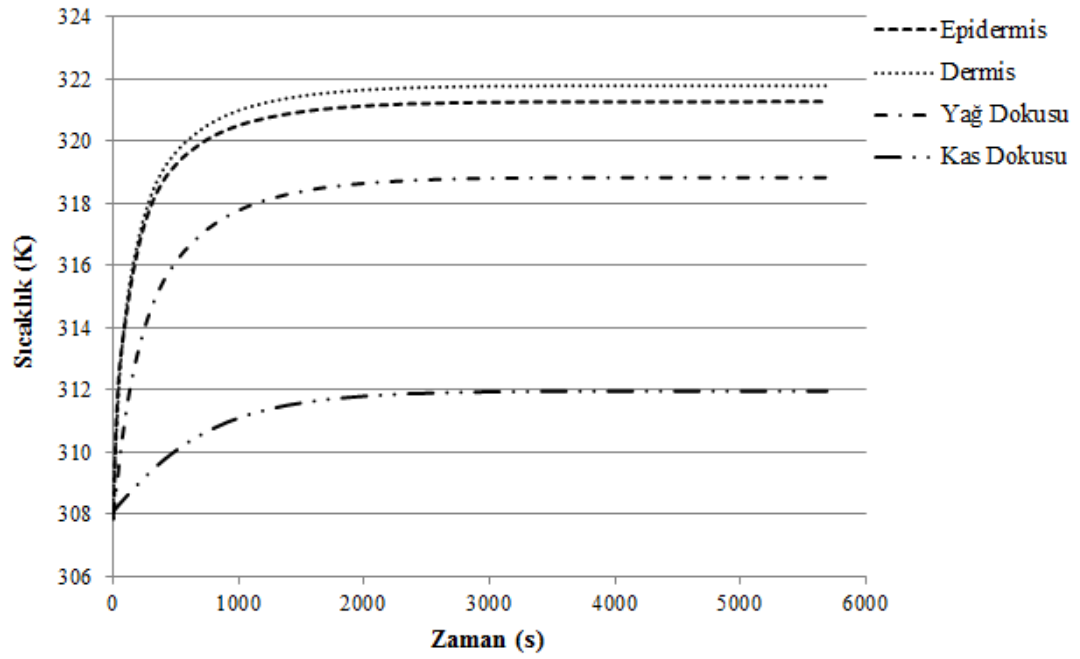
Bu bölümde, bir önceki bölümde anlatılan modellerin sonuçları verilmektedir. Öncelikle insan derisindeki ısı davranışları incelemek için dört katmandan oluşan cilt modeli oluşturulmuş, verilen başlangıç ve sınır koşulları altında sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Elde edilen bu sıcaklık dağılımından cilt dokularında oluşan hasar oranı tahmin edilmiştir. Sonraki modelde insan derisi için oluşturulan ısı geçişi modeline nem geçişi eklenerek genişletilmiştir. Bu modelde sıcaklık ve derişim dağılımı bulunmuştur. Daha sonra üç katmandan oluşan bir itfaiyeci giysisi ile insan derisini birleştirerek bir sistem oluşturulmuş ve bu modeldeki ısı geçişi incelenmiştir. Bu dağılıma göre giysi etkisini de hesaba katarak dokularda oluşabilecek olan yanık yaralanmaları incelenmiştir.

5.1 İnsan Derisindeki Isı Geçişi

Bölüm 4’de açıklanan, çok katmanlı bir insan derisi modeli oluşturulmuştur. Bu model deri yüzeyinde, güneş ışıınımı, taşınım ve terleme sınır koşulları altında Pennes biyo-ısı denklemi kullanılarak çözülmüştür. İnsan derisindeki, sıcaklık dağılımı elde ederek derideki yanık yaralanmalarının derecesi bulunmuştur. Çözümleme Comsol Multiphysics programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. Modelde 5400 saniye sonunda elde edilen sıcaklık dağılımı şekil 5.1’de gösterilmektedir.



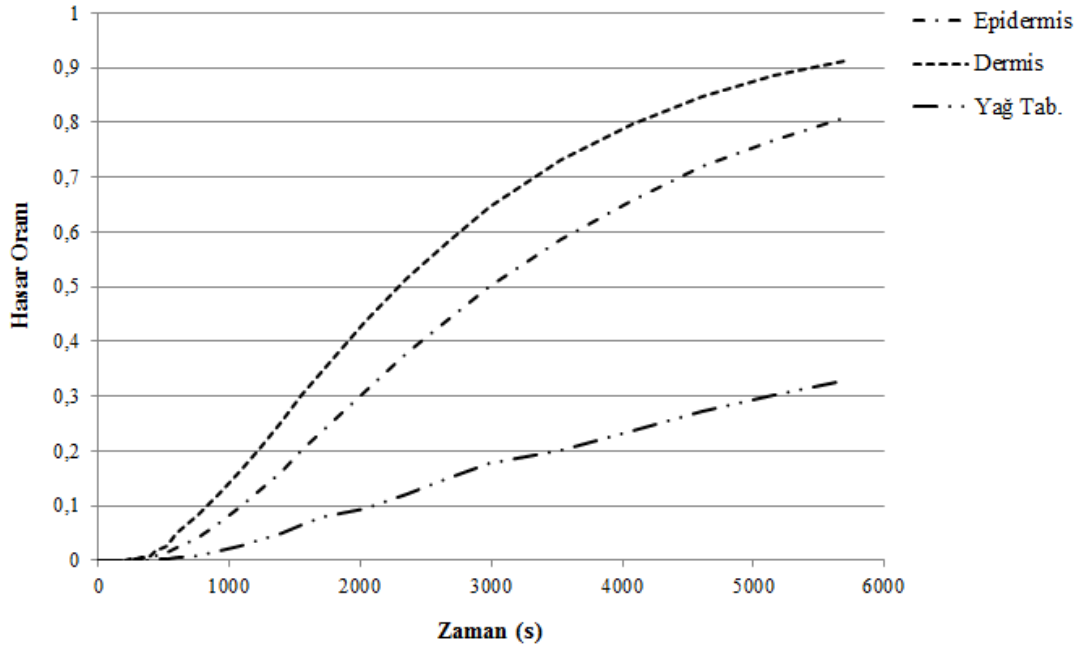
Şekil 5.1 İnsan derisindeki ısı geçişi modelindeki zamana göre sıcaklık değişimi



Şekil 5.2 İnsan derisindeki ısı geçişi modelinde cilt dokularının zamana göre sıcaklık değişimi

Epidermis sıcaklığı 5400 saniye sonunda 321,3 K'e çıkmaktadır. Dermis sıcaklığı ise 321,8 K olmaktadır. Yağ dokusu 318,8 K'e çıkarken, kas dokusunun sıcaklığı ise 311,9 K'e yükselmiştir. Şekil 5.2'de de görüldüğü üzere dermis tabakasının sıcaklığı epidermis tabakasına göre daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi epidermis tabakasının atmosfere açık olması ve bu sebeple soğuyabilmesidir.

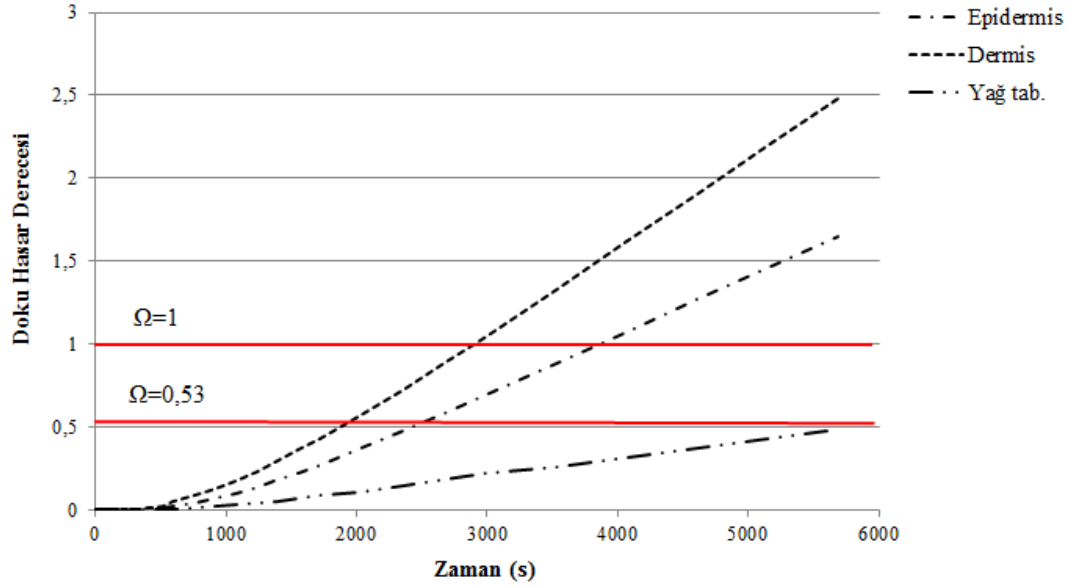
Bulunan bu sıcaklık dağılımına göre dokuda hasar olup olmadığı incelenmiştir. Şekil 5.3'te dokudaki zamanla hasar oranının değişimi görülmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere hasar oranının en fazla olduğu doku dermis tabakasıdır. Bu katmanda hasar oranı % 90'lara ulaşmaktadır. Dermis tabakasından sonra en fazla hasar oranı epidermis katmanında olup %80'lere yükselmiştir. Yağ tabakasındaki hasar oranı ise %30'a çıkmaktadır.



Şekil 5.3 Cilt dokularındaki zamanla hasar oranının değişimi

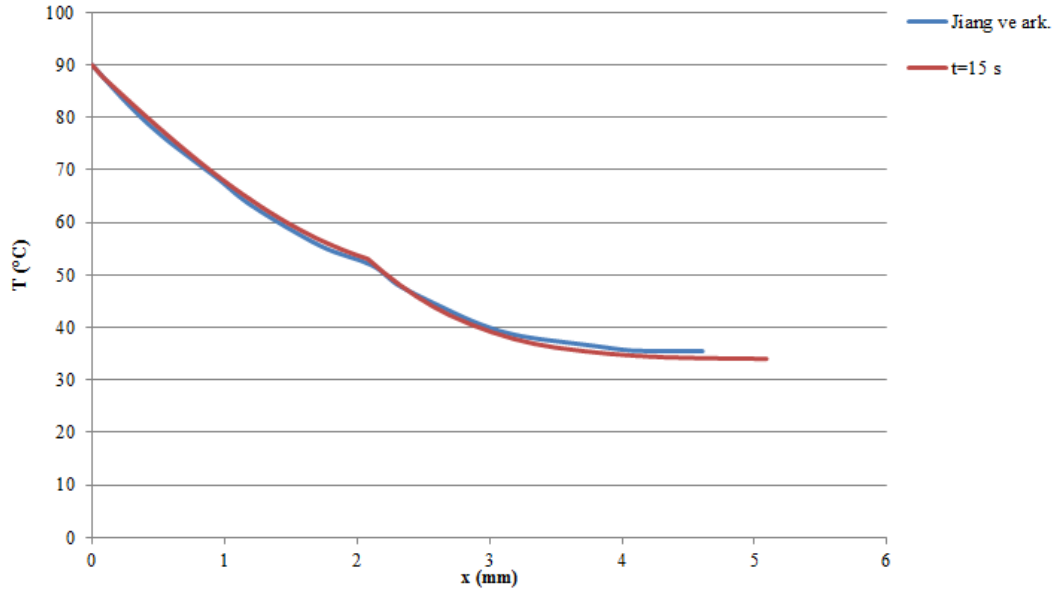
Dokudaki hasar oluşumu 44°C'nin üzerinde oluşmaya başlamaktadır. Bu modelde 2000 saniye sonunda dermis tabakasında Ω değeri 0,53'e ulaşmış ve birinci dereceden yanık oluşumu başlamıştır. 3000. saniyeye ulaşıldığında dermis tabakasında Ω değeri 1 olurken ikinci derecede yanık oluşmaya başlamıştır. Epidermis tabakasında da Ω

değeri 0,53'e ulaşmış ve birinci dereceden yanık oluşumu başlamıştır. Şekil 5.4'te cilt dokularındaki zamana göre hasar derecesi oluşumu grafiği verilmiştir.



Şekil 5.4 Cilt dokularındaki zamana göre hasar derecesi oluşumu

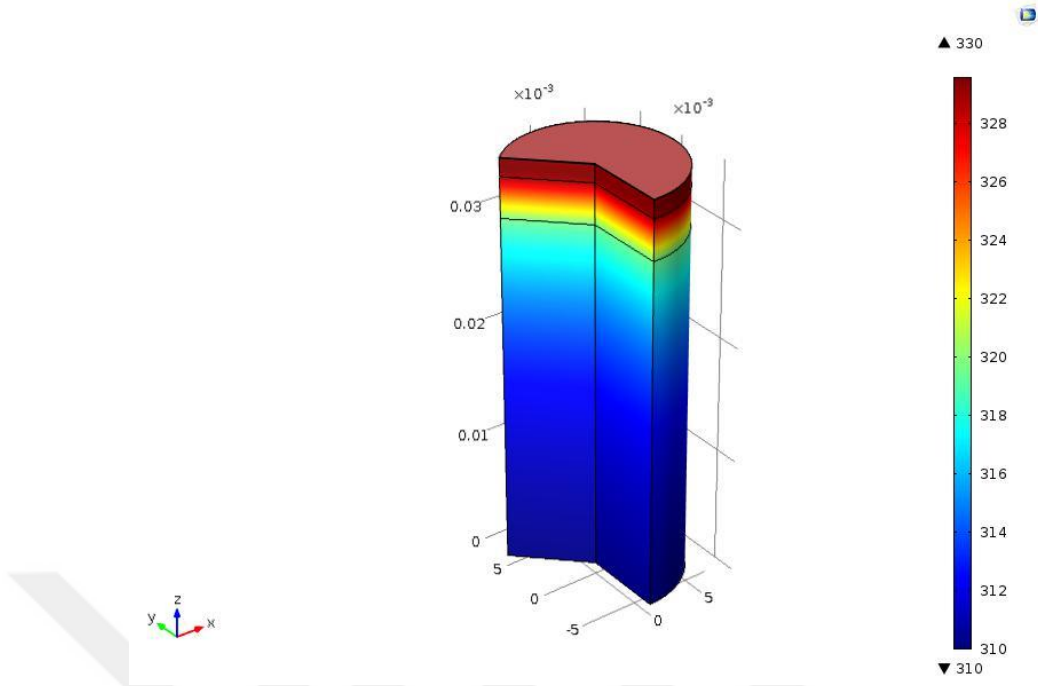
Derideki sıcaklık dağılımının bulunmasında birçok çalışma yapılmıştır. Sabit sıcaklıkta ısı kaynağı ile temas durumunda Jiang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmanın sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. Jiang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada 90 °C'deki bir ısı kaynağı 15 saniye boyunca deri yüzeyine uygulanmıştır. Çok katmanlı tek boyutlu bir model oluşturmuşlardır. Dokularda oluşan sıcaklık dağılımını bularak yanık yaralanmalarını tahmin etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar Jiang'ın sonuçları ile aynı değerlere sahiptir. Şekil 5.5'te yapılan çalışma için doğrulama grafiği görülmektedir.



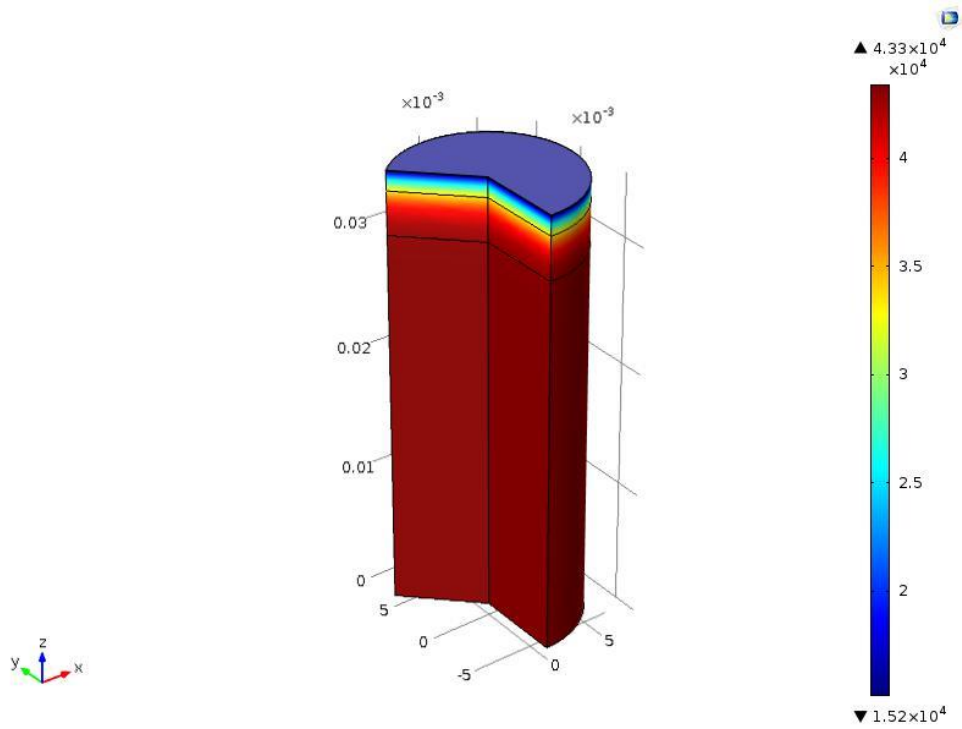
Şekil 5.5 İnsan derisindeki ısı geçişi modeli için doğrulama grafiği

5.2 İnsan Derisindeki Isı ve Nem Geçişi

Önceki bölümde oluşturulan, dört katmandan oluşan insan cildi modeline nem geçişi eklenerek doku içerisindeki derişim dağılımı incelenmiştir. Bu çalışmada oluşturulan çok katmanlı geometrik modelin Comsol Multiphysics programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal çözümlemesi gerçekleştirilmiştir. Geometrinin kalınlıkları ve termofiziksel özellikleri programa aktarılmış, sınır ve başlangıç koşulları tanımlanmıştır. Elde edilen sıcaklık ve derişim dağılımı sırası ile Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



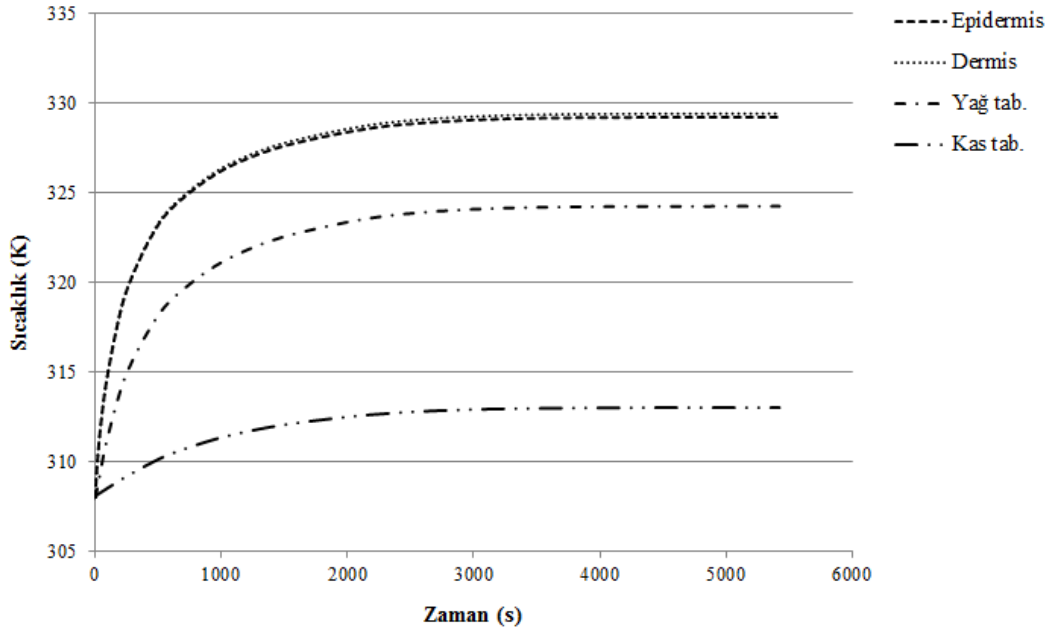
Şekil 5.6 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelindeki cilt dokularında oluşan sıcaklık dağılımı



Şekil 5.7 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelindeki cilt dokularında oluşan nem derişimi dağılımı

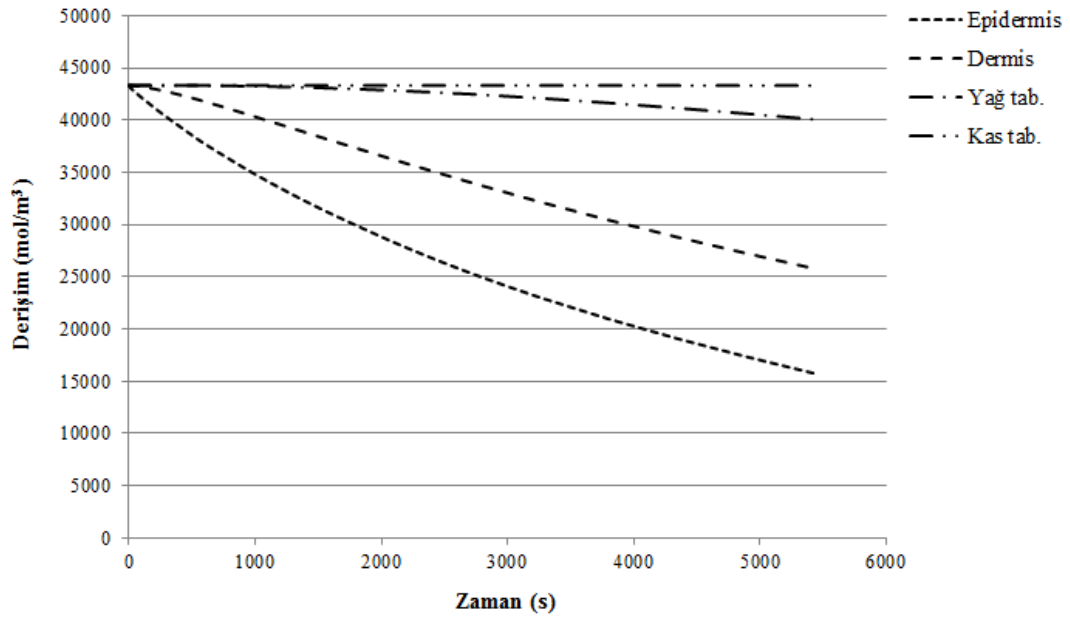
5400 saniye sonunda epidermis sıcaklığı 329,2 K'e yükselirken dermis katmanının sıcaklığı 329,4 K'e yükselmiştir. Yağ dokusu 324,2 K ve kas dokusu 313 K sıcaklığına

ulaşmıştır. Bu modelde de dermis sıcaklığı epidermis sıcaklığından daha yüksek çıkmıştır. Terlemenin etkisiyle deri yüzeyinden suyun buharlaşması epidermisi soğutmuştur. Şekil 5.8’de dokulardaki sıcaklığın zamana göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.8 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelindeki zamana göre cilt dokularındaki sıcaklık değişimi

Dokudaki derişim dağılımları da bulunmuştur. Epidermis yüzeyinde derişim 15183 mol/m^3 'e düşmektedir. Dermis tabakasında 25815 mol/m^3 , yağ tabakasında 40091 mol/m^3 ve kas tabakasında 43326 mol/m^3 olmaktadır. Şekil 5.8’da dokulardaki zamana göre derişimin değişimi görülmektedir.



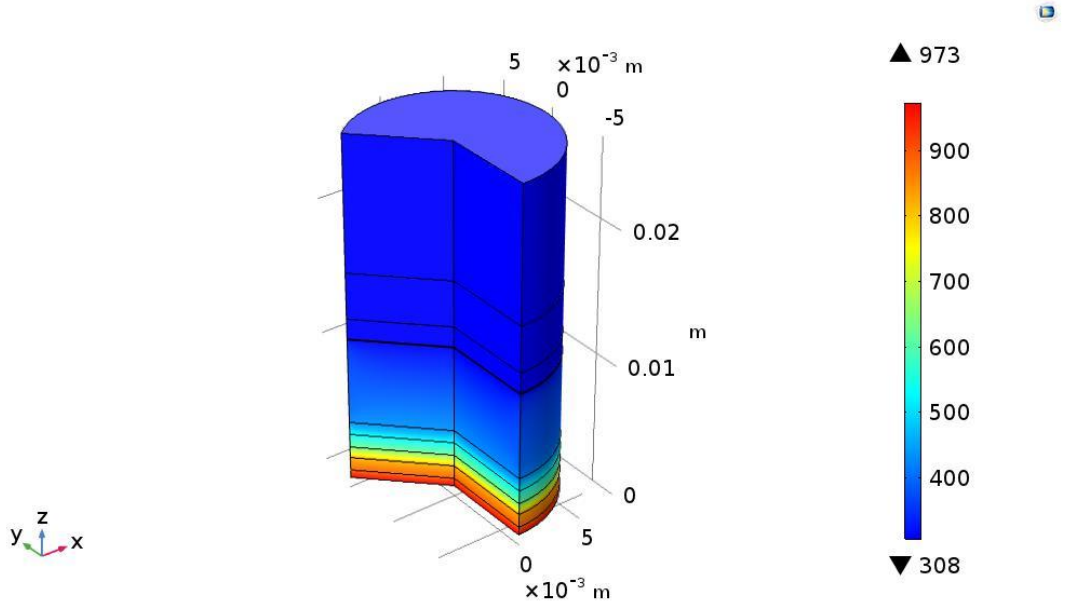
Şekil 5.9 İnsan derisindeki ısı ve nem geçişi modelindeki zamana göre cilt dokularındaki nem derişiminin değışimi

Modelde ayrıca sıcaklık ve derişim dağılımlarını etkileyen bazı parametreler incelenmiştir. Çalışmada 0,003 m/s hava hızında, epidermis yüzeyindeki derişim değeri 15183 mol/m³'e düştüğü görülmüştür. Seçmiş olduğumuz farklı hava hızlarına göre derişimin değıştiği gözlenmiştir. Hava hızının 0,005 m/s, 0,003 m/s, 0,002 m/s, 0,001 m/s ve 0,0001 m/s olması durumunda epidermis yüzeyindeki derişimin sırasıyla 6997 mol/m³, 15183 mol/m³, 20346 mol/m³, 27077 mol/m³ ve 38160 mol/m³ olduğu görülmüştür.

İncelenen bir diğer parametre çevre sıcaklığıdır. Çevre sıcaklığının değışmesi deri katmanlarında oluşan sıcaklıkta önemli derecede etkili olduğu görülmüştür. Çevre sıcaklığının 298 K, 305 K ve 310 K olması halinde epidermis yüzeyinde oluşan sıcaklıklar sırasıyla 329 K, 331 K ve 333 K olmaktadır. Derideki hasarın 44°C'den sonra oluşmaya başladığı bilinmektedir. Bu nedenle deri yüzeyinde oluşan sıcaklığın hasara neden olacak şekilde olmaması istenmektedir. Sıcaklık dağılımını bulmak da bu noktada önemi olmaktadır. Sıcaklığın değışmesi ile epidermis yüzeyinde oluşan derişim değeri ise sırasıyla 15183 mol/m³, 11085 mol/m³ ve 9668 mol/m³ olmaktadır.

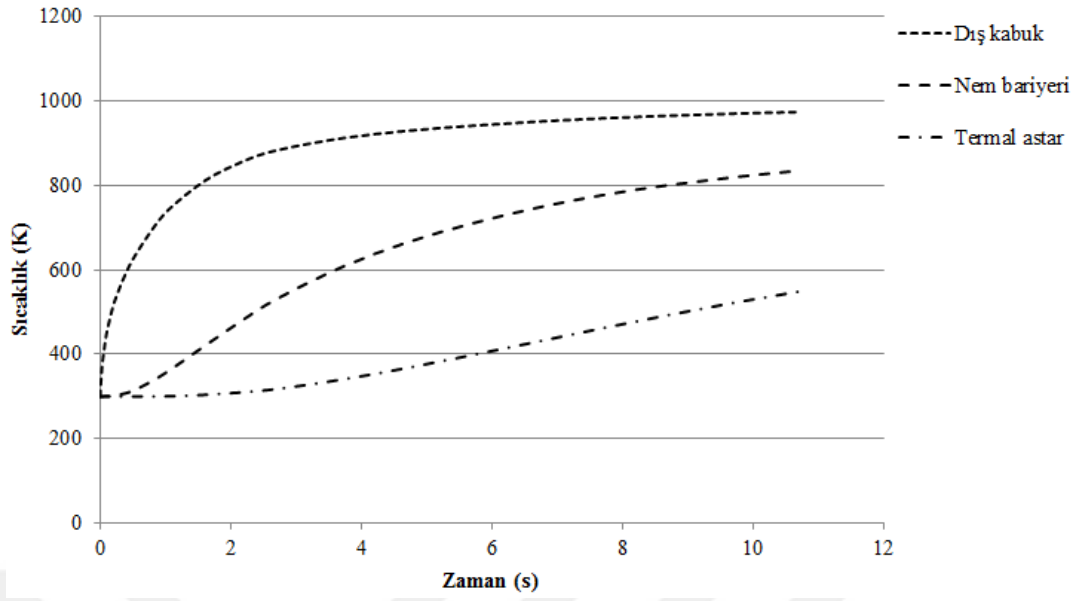
5.3 İtfaiyeci Giysisi ve İnsan Derisindeki Isı Geçişi

Bu modelde itfaiyeci giysisi ve insan derisini bireştiren bir model oluşturulmuştur. Kıyafet kısmı dış katman, nem bariyeri ve termal astar olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. İnsan derisi ise epidermis, dermis, yağ dokusu ve kas dokusu olmak üzere dört katmandan oluşmaktadır. Giysi ve insan derisini hava boşluğu ayırmaktadır. Oluşturulan model 10 saniye boyunca sıcak gazlara maruz kalmaktadır. Bu süre sonundaki sıcaklık dağılımı bulunarak dokudaki hasar oranı incelenmiştir. Şekil 5.10'da elde edilen sıcaklık dağılımı görülmektedir.



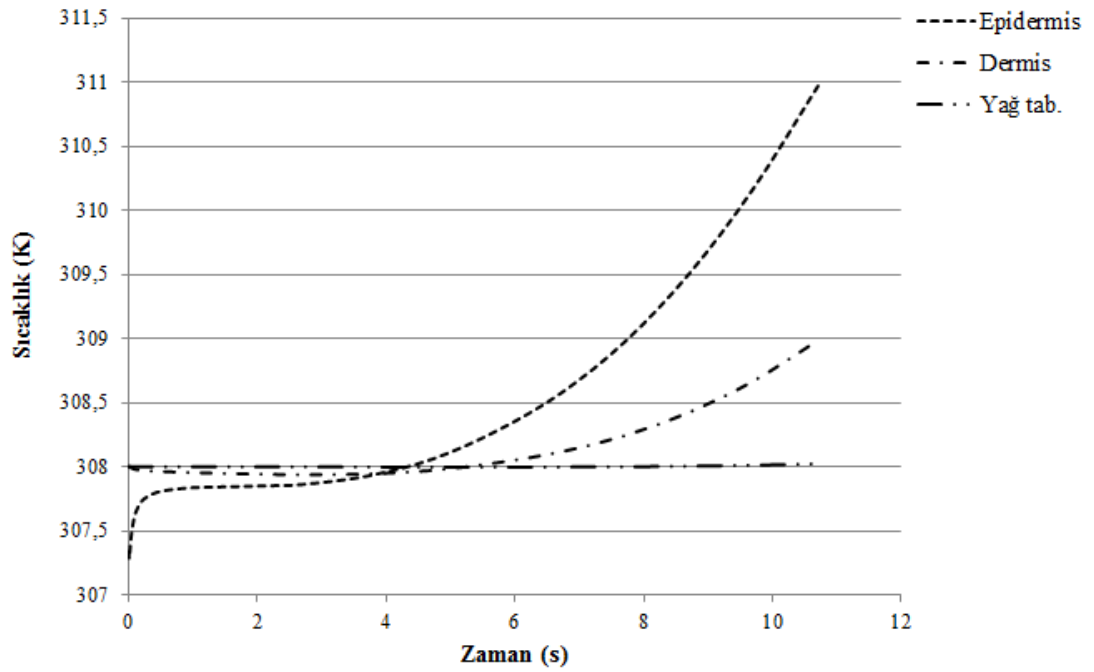
Şekil 5.10 İtfaiyeci giysisi ve insan derisindeki ısı geçişi modelindeki sıcaklık dağılımı

Maruziyet süresi sonunda dış kabuk sıcaklığı 973 K'e kadar çıkmaktadır. Nem bariyeri ve termal astar sıcaklıkları ise 834 K ve 548 K olmaktadır. Giysi katmanlarındaki zamana göre sıcaklık değişimi Şekil 5.11'de gösterilmektedir.



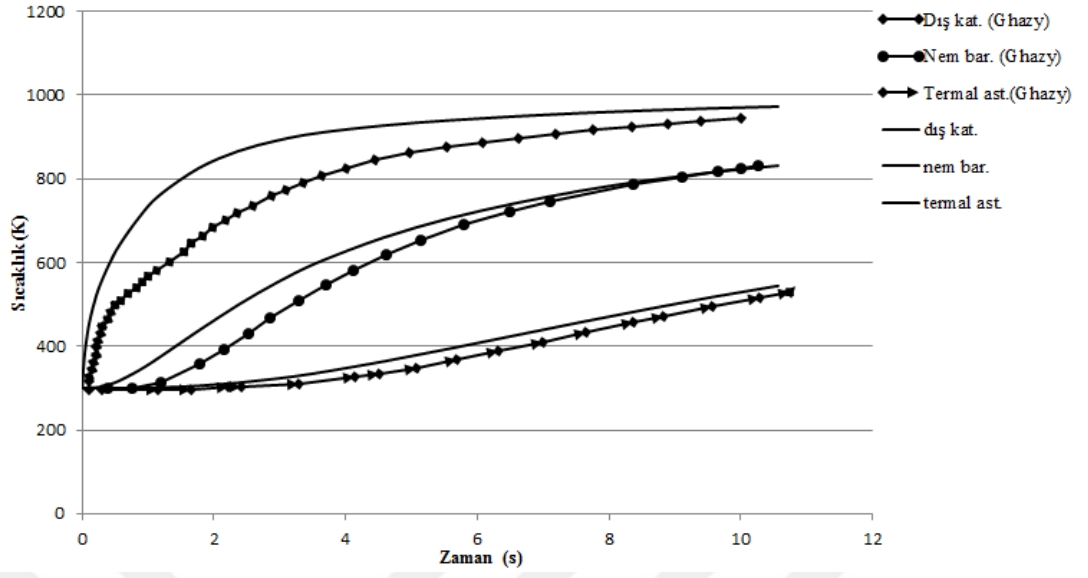
Şekil 5.11 Giysi katmanlarındaki zamana göre sıcaklık değişimi

Cilt katmanları için elde edilen sıcaklık değişimi Şekil 5.12'deki grafikte görülmektedir. Maruziyet sonrasında epidermis yüzeyindeki sıcaklık 311 K'e yükselirken bazal katman sıcaklığı 310 K, dermal katman sıcaklığı 308 K olmaktadır. Dokuda hasar 317 K'de (44 °C) oluşmaya başlamaktadır. Maruziyet süresi olan 10 saniye sonunda doku katmanlarındaki sıcaklık 317 K'e ulaşmadığı için dokuda hasar oluşmamaktadır.



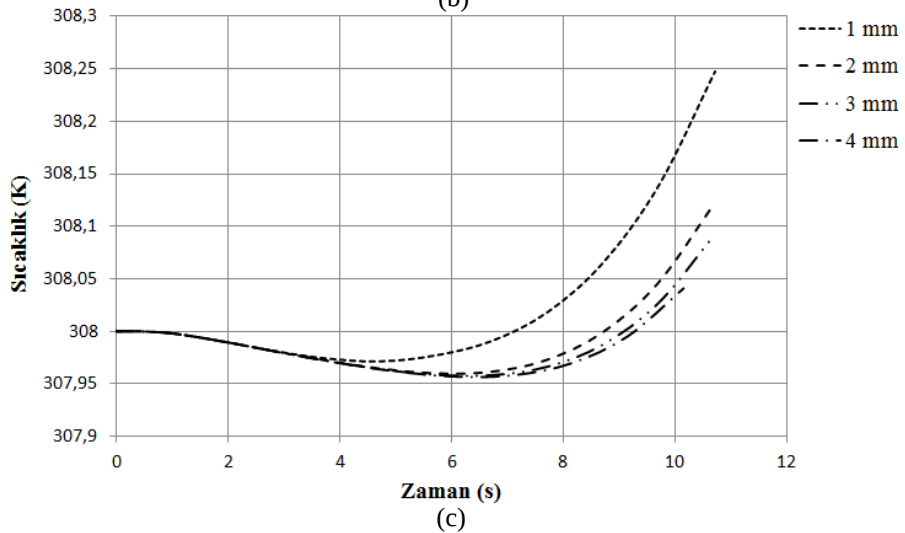
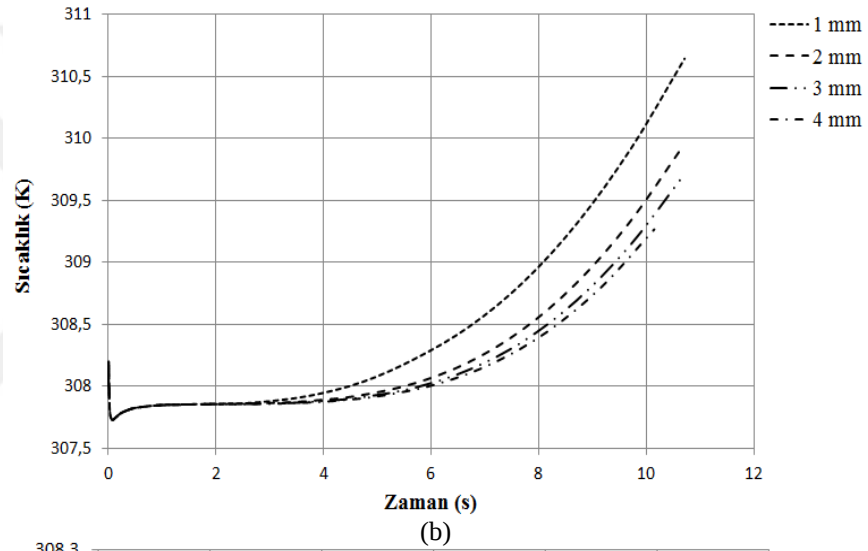
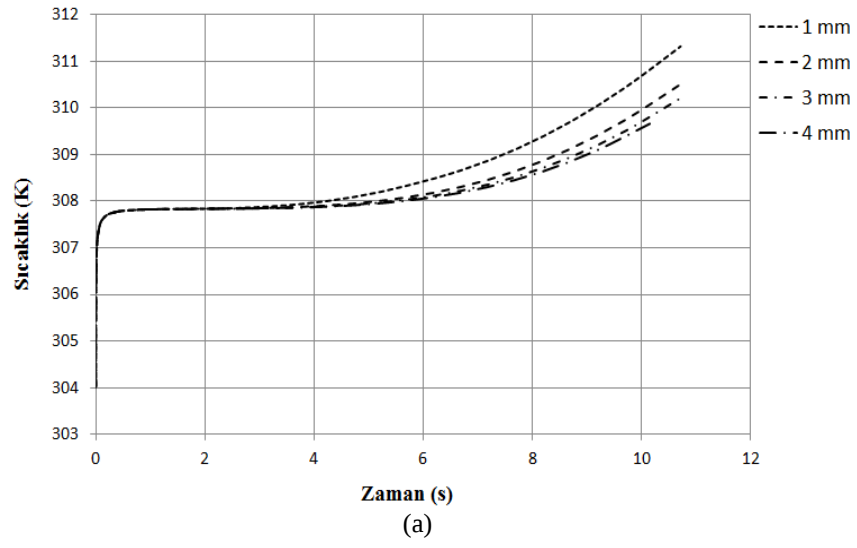
Şekil 5.12 İtfaiyeci giysisi ve insan derisindeki ısı geçişi modelindeki zamana göre cilt dokularındaki sıcaklık değişimi

Ghazy ve Bergstrom (2012), yapmış oldukları çalışmada itfaiyecilerin koruyucu giysilerinde, ateşe maruz kalma sırasında ısı geçişini simüle etmek için sonlu bir hacim modeli geliştirmişlerdir. Oluşturulan modelin doğrulanması için Ghazy ve Bergstrom'un çalışmaları kullanılmıştır. 10 saniye sonunda mevcut çalışmadaki dış katman sıcaklığı referans çalışmadan %3 daha yüksektir. Bununla birlikte nem bariyeri ve termal katman için % 0,1 fark olmaktadır.



Şekil 5.13 İtfaiyeci giysisi ve insan derisindeki ısı geçişi modeli için doğrulama grafiği

Giysi katmanları arasındaki hava boşluğu genişliğinin 1 mm'den 4mm'ye kadar artırılmasının sonuçları incelenmiştir. Her bir hava boşluğu genişliği için epidermis yüzeyinde, bazal katmanda ve dermal katmandaki sıcaklık değişimi Şekil 5.14'te gösterildiği gibi olmaktadır.

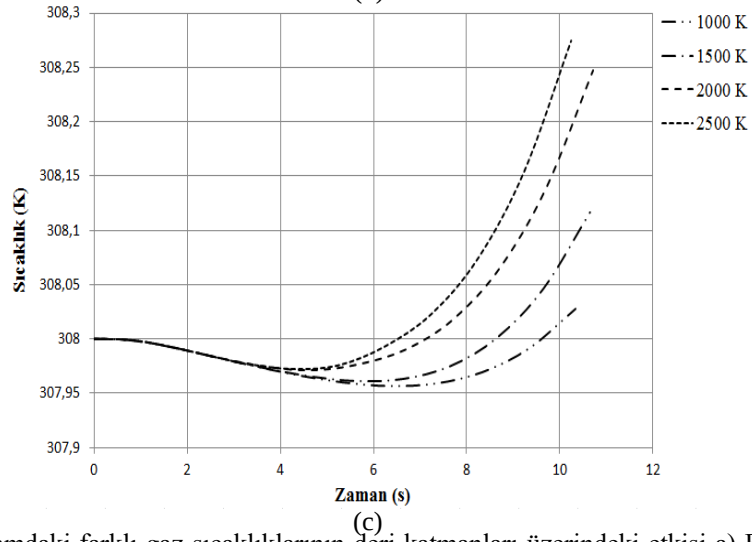
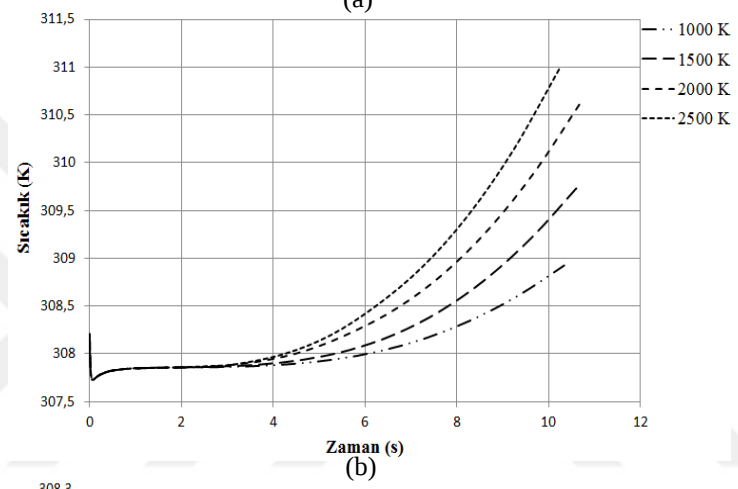
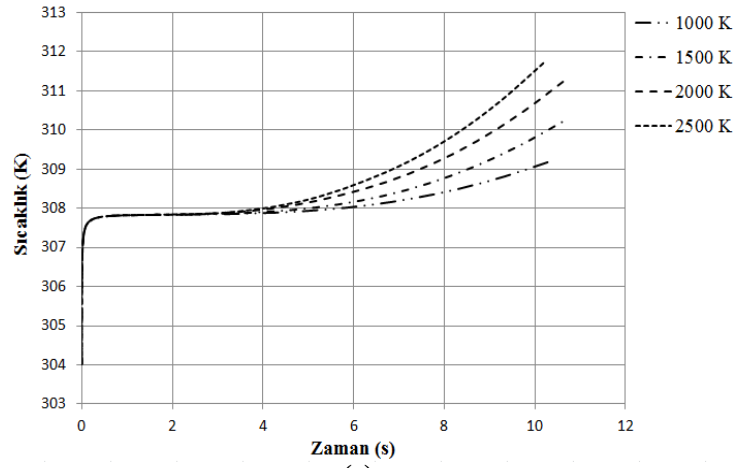


Şekil 2.14 Giysi katmanları arasındaki hava boşluğu genişliklerinin cilt katmanlarındaki sıcaklığa etkisi
a) Epidermis yüzey sıcaklığı, b) Bazal katman sıcaklığı, c) Dermal katman sıcaklığı

Hava boşluğundaki genişliklerin artması grafiklerde de görüldüğü üzere cilt katmanlarındaki sıcaklıklarda küçük bir azalmaya neden olmuştur.

Flaş yangın sırasında ortamdaki gazların sıcaklığı da giysi sistemindeki sıcaklık dağılımında önemli bir parametre olmaktadır. Şekil 5.15'te gazların 1000 K, 1500 K, 2000 K ve 2500 K olması durumundaki deri katmanlarındaki sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Gazların sıcaklığı arttıkça kıyafet katmanlarındaki sıcaklıklar önemli derecede artarken, insan derisi tabakalarındaki sıcaklıkta ufak bir artışa neden olmuştur.





Şekil 5.15. Ortamdaki farklı gaz sıcaklıklarının deri katmanları üzerindeki etkisi a) Epidermis yüzey sıcaklığı, b) Bazal katman sıcaklığı, c) Dermal katman sıcaklığı

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Çalışmada ilk olarak çok katmanlı bir insan derisi modeli sunulmuştur. Bu model deri yüzeyine gelen güneş ışınlamı, taşınım ve terleme sınır koşulları altında Pennes biyo-ısı denklemi kullanılarak çözülmüştür. İnsan derisindeki, sıcaklık dağılımı elde ederek derideki yanık yaralanmalarının derecesi bulunmuştur. Yapılan bu modelde elde edilen sonuçlar aşağıda maddelenmiştir.

- Epidermis sıcaklığı 5400 saniye sonunda 321,3 K'e çıkmıştır. Dermis sıcaklığı ise 321,8 K'e çıkmıştır. Yağ dokusu 318,8 K'e çıkarken, kas dokusunun sıcaklığı ise 311,9 K'e yükselmiştir.
- Modelde 2000 saniye sonunda dermis tabakasında Ω değeri 0,53'e ulaşmış ve birinci dereceden yanık oluşumu başlamıştır. 3000. saniyeye ulaşıldığında dermis tabakasında Ω değeri 1 olurken ikinci derecede yanık oluşmaya başlamıştır. Epidermis tabakasında da Ω değeri 0,53'e ulaşmış ve birinci dereceden yanık oluşumu başlamıştır.

Oluşturulan ikinci modelde, önceki çalışmaya buharlaşma ve derideki su difüzyonu da eklenerek çalışma genişletilmiştir. Modelde çok katmanlı bir deri modeli sunulmuştur. Bu model deri yüzeyine gelen güneş ışınlamı, taşınım ve terleme sınır koşulları altında Pennes biyo-ısı denklemi kullanılarak çözülmüştür. Buna bağlı olarak sıcaklık ve derişim dağılımları elde edilmiştir. Ayrıca insan derisindeki, farklı ısı parametreleri ve çevre koşulları altındaki sıcaklık ve derişim dağılımları da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- 5400 saniye sonunda epidermis sıcaklığı 329,2 K'e yükselirken dermis katmanının sıcaklığı 329,4 K'e yükselmiştir. Yağ dokusu 324,2 K ve kas dokusu 313 K sıcaklığına ulaşmıştır. Bu modelde de dermis sıcaklığı epidermis sıcaklığından daha yüksek çıkmıştır. Terlemenin etkisiyle deri yüzeyinden suyun buharlaşması epidermisi soğutmuştur.

- Dokudaki derişim dağılımları da bulunmuştur. Epidermis yüzeyinde derişim 15183 mol/m^3 'e düşmüştür. Dermis tabakasında 25815 mol/m^3 , yağ tabakasında 40091 mol/m^3 ve kas tabakasında 43326 mol/m^3 olmuştur.
- Modelde ayrıca sıcaklık ve derişim dağılımlarını etkileyen bazı parametreler incelenmiştir. Hava hızının $0,005 \text{ m/s}$, $0,003 \text{ m/s}$, $0,002 \text{ m/s}$, $0,001 \text{ m/s}$ ve $0,0001 \text{ m/s}$ olması durumunda epidermis yüzeyindeki derişimin sırasıyla 6997 mol/m^3 , 15183 mol/m^3 , 20346 mol/m^3 , 27077 mol/m^3 ve 38160 mol/m^3 olduğu görülmüştür.
- İncelenen bir diğer parametre çevre sıcaklığıdır. Çevre sıcaklığının değişmesi deri katmanlarında oluşan sıcaklıkta önemli derecede etkili olduğu görülmüştür. Çevre sıcaklığının 298 K , 305 K ve 310 K olması halinde epidermis yüzeyinde oluşan sıcaklıklar sırasıyla 329 K , 331 K ve 333 K olmuştur.
- Sıcaklığın değişmesi ile epidermis yüzeyinde oluşan derişim değerleri ise sırasıyla 15183 mol/m^3 , 11085 mol/m^3 ve 9668 mol/m^3 olmuştur.

İtfaiyeci giysisi ve insan derisini bireştiren bir model oluşturulmuştur. Kıyafet kısmı dış katman, nem bariyeri ve termal astar olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. İnsan derisi ise epidermis, dermis, yağ dokusu ve kas dokusu olmak üzere dört katmandan oluşmaktadır. Giysi ve insan derisini hava boşluğu ayırmaktadır. Oluşturulan model 10 saniye boyunca sıcak gazlara maruz kalmaktadır. Bu süre sonundaki sıcaklık dağılımı bulunarak dokudaki hasar oranı incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Maruziyet süresi sonunda dış kabuk sıcaklığı 973 K 'e kadar çıkmıştır. Nem bariyeri ve termal astar sıcaklıkları ise 834 K ve 548 K 'e yükselmiştir.
- Cilt katmanlarındaki sıcaklık dağılımı da elde edilmiştir. Epidermis yüzeyindeki sıcaklık 311 K 'e yükselirken bazal katman sıcaklığı 310 K , dermal katman sıcaklığı 308 K olmaktadır. Dokuda hasar 317 K 'de ($44 \text{ }^\circ\text{C}$) oluşmaya

başlamaktadır. Maruziyet süresi olan 10 saniye sonunda doku katmanlarındaki sıcaklık 317 K'e ulaşmadığı için dokuda hasar oluşmamaktadır.

- Farklı hava boşluğu genişliklerinin cilt katmanları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hava boşluğu genişliklerinin artması ile cilt dokularında oluşan sıcaklıkların azaldığı görülmüştür.

- Ortamdaki gazların 1000 K, 1500 K, 2000 K ve 2500 K olması durumundaki deri katmanlarındaki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Gazların sıcaklığı arttıkça kıyafet katmanlarındaki sıcaklıklar önemli derecede artarken, insan derisi tabakalarındaki sıcaklıkta ufak bir artışa neden olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Atasağun, H. G. (2016). Termal Koruyucu Giysilerin Koruma Performansı Üzerinde Hava Boşluklarının Etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 23(104), 277-287.
- Bulgun, E. Y., ve Yılmaz, M. (2010). İtfaiye Elbiseleri Tasarımında Son Gelişmeler. *Tekstil ve Mühendis*, 17(77).
- Cena, K., ve Clark, J. A. (Eds.). (1981). *Bioengineering, thermal physiology and comfort* Elsevier.
- Charny, C. K. (1992). Mathematical models of bioheat transfer. *In Advances in heat transfer*, Elsevier.
- Chitrphiomsri, P. (2004). *Modeling of Thermal Performance of Firefighter Protective Clothing during the Intense Heat Exposure*. Doktora Tezi. Kuzey Karolayna Üniversitesi, Raleigh, North Carolina.
- Chitrphiomsri, P., ve Kuznetsov, A. V. (2005). Modeling heat and moisture transport in firefighter protective clothing during flash fire exposure. *Heat and Mass Transfer*, 41(3), 206-215.
- Datta, A. Ve Rakesh, V. (2010). An Introduction to Modeling of Transport Processes Applications to Biomedical Systems. (1.Baskı) 280-287, Cambridge University Press, New York.
- Deng, Z. S., ve Liu, J. (2002). Analytical study on bioheat transfer problems with spatial or transient heating on skin surface or inside biological bodies. *Journal of biomechanical engineering*, 124(6), 638-649.

- Fiala, D., Lomas, K.J. ve Stohrer M. (1999). A Computer Model Of Human Thermoregulation For A Wide Range of Environmental Conditions: The Passive System. *J. Appl.Physio*, 87(5),1957–1972.
- Filipoiu, F., Bogdan, A. I., ve Carstea, I. M. (2010, April). Computer-aided analysis of the heat transfer in skin tissue. In *Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conference on finite differences-finite elements-finite volumes-boundary elements*,53-59.
- Fu, M., Weng, W., & Yuan, H. (2014). Numerical simulation of the effects of blood perfusion, water diffusion, and vaporization on the skin temperature and burn injuries. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 65(12), 1187-1203.
- Ghazy, A., ve Bergstrom, D. J. (2010). Numerical simulation of transient heat transfer in a protective clothing system during a flash fire exposure. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 58(9), 702-724.
- Ghazy, A., ve Bergstrom, D. J. (2011). Influence of the air gap between protective clothing and skin on clothing performance during flash fire exposure. *Heat and mass transfer*, 47(10), 1275-1288.
- Ghazy, A., ve Bergstrom, D. J. (2012). Numerical simulation of heat transfer in firefighters' protective clothing with multiple air gaps during flash fire exposure. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 61(8), 569-593.
- Gibson, P. (1996). *Multiphase heat and mass transfer through hygroscopic porous media with applications to clothing materials*. Army Natick Research Development And Engineering Center Ma.
- Henriques Jr, F. C., ve Moritz, A. R. (1947). Studies of thermal injury: I. The conduction of heat to and through skin and the temperatures attained therein. A theoretical and an experimental investigation. *The American journal of pathology*, 23(4), 530.

Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer* (10. Baskı). McGraw-Hill Co. New York

Jiang, S. C., Ma, N., Li, H. J., ve Zhang, X. X. (2002). Effects of thermal properties and geometrical dimensions on skin burn injuries. *Burns*, 28(8), 713-717.

Kaynaklı, Ö. ve Yiğit, A. (2003). İnsan Vücudu İçin Isı Dengesi ve Isıl Konfor Şartları. *Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2, 9-17.

Khaled, A. R., ve Vafai, K. (2003). The role of porous media in modeling flow and heat transfer in biological tissues. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(26), 4989-5003.

Kişisel Koruyucu Donanımlar İzmir Büyükşehir Belediyesi İtfaiye Dairesi Başkanlığı. 04.06.2018, <https://itfaiye.izmir.bel.tr/CKYuklenen/iydem/Yayinlarimiz/K%C4%B0%C5%9E%C4%B0SEL%20KORUYUCU%20EK%C4%B0PMANLARI.compressed.pdf>

Kutlu, B., ve Cireli, A. (2005). Thermal analysis and performance properties of thermal protective clothing. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 13(3), 58.

Küçüka, S., Özanel, İ., ve Çolpan, C. Ö. (2016). Güneş Işınımının Deri Sıcaklığına Ve Doku Hasarına Etkisinin Sayısal İncelenmesi. *Engineer & the Machinery Magazine*, 57(682).

Mell, W. E., ve Lawson, J. R. (2000). A heat transfer model for firefighters' protective clothing. *Fire Technology*, 36(1), 39-68.

Pan, N., ve Gibson, P. (Eds.). (2006). *Thermal and moisture transport in fibrous materials*. Woodhead Publishing.

- Pennes, H. H. (1948). Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. *Journal of Applied Physiology*, 1(2), 93-122.
- Prasad, K., Twilley, W., ve Lawson, J. R. (2002). Thermal Performance of Fire Fighters' Protective Clothing. 1. Numerical Study of Transient Heat and Water Vapor Transfer. *National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD*.
- Salloum, M., Ghaddar, N., ve Ghali, K. (2007). A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(4), 371-384.
- Shen, W., Zhang, J., ve Yang, F.Q. (2005). Skin Thermal Injury Prediction with Strain Energy. *Int. J. Nonlin. Sci. Num.*, 6, 317–328.
- Shih, T. C., Yuan, P., Lin, W. L., & Kou, H. S. (2007). Analytical analysis of the Pennes bioheat transfer equation with sinusoidal heat flux condition on skin surface. *Medical Engineering and Physics*, 29(9), 946-953.
- Song, G. (2002). *Modeling Thermal Protection Outfits for Fire Exposures*. Doktora Tezi. Kuzey Karolayna Üniversitesi, Raleigh, North Carolina.
- Talukdar, P., Das, A., ve Alagirusamy, R. (2016). Heat and mass transfer through thermal protective clothing—A review. *International Journal of Thermal Sciences*, 106, 32-56.
- Torvi, D. A. (1997). *Heat Transfer in Thin Fibrous Materials under High Heat Flux Conditions*. Doktora Tezi. Alberta Üniversitesi, Edmonton.
- Torvi, D. A., & Dale, J. D. (1999). Heat transfer in thin fibrous materials under high heat flux. *Fire Technology*, 35(3), 210-231.

Uygun, M. (2017). *İnsan Beyninin Üç Boyutlu Modellenmesi İle Sıcaklık Dağılımının Elde Edilmesi*. Yüksek Lisans Tezi Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Valvano, J. W. (2006). Bioheat transfer. *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*.

Weng, W. G., Han, X. F. ve Fu, M. (2014). An Extended Multi-Segmented Human Bioheat Model For High Temperature Environments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 504-513.

Wilson, S. B., ve Spence, V. A. (1988). A tissue heat transfer model for relating dynamic skin temperature changes to physiological parameters. *Physics in Medicine & Biology*, 33(8), 895.

Xu, F., ve Lu, T. (2011). *Introduction to skin biothermomechanics and thermal pain*. New York: Science Press.

Yang, D., Converse, M.C., Mahvi, D.M. ve Webster, J.G. (2007). Expanding the Bioheat Equation to Include Tissue Internal Water Evaporation During Heating. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(8), 1382-1388.

Yangın Eğitimi. 04.06.2018, <http://itfaiyeegitimleri.blogspot.com/>

Yıldırım, E. D. (2004). *A Mathematical Model of The Human Thermal System*. Yüksek Lisans Tezi. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.

Zhu, F. L., ve Zhang, W. Y. (2009). Modeling heat transfer for heat-resistant fabrics considering pyrolysis effect under an external heat flux. *Journal of Fire Sciences*, 27(1), 81-96.

Zolfaghari, A. ve Maerefat, M. (2011). Bioheat Transfer. *Developments in Heat Transfer*, 153-170.

EKLER

Terminoloji

Değişkenler

c_p	Özgül ısı [J/kg·K]
G	Işın radyasyonun [W/m ²]
h	Konvektif ısı transfer katsayısı [W/m ² ·K]
I	Radyasyon yoğunluğu [W/m ²]
k	Termal iletkenlik [W/m·K]
L	Kalınlık [m]
P	Frekans faktörü [s ⁻¹]
R	Evrensel gaz sabiti [J/mol·K]
T	Sıcaklık [K]
t	Zaman [s]
z	Doğrusal dikey koordinat [m]
ΔE	Aktivasyon enerjisi [J/kmol]
q''	Isı akısı [W/m ²]
RH	Bağıl nem [%]
M	Suyun molar kütlesi [kg/mol]
h_{fg}	Suyun buharlaşma entalpisi [kJ/kg]
$\dot{m}$	Deri yüzeyinden suyun buharlaşma oranı [kg/m ² ·s]
h	Taşıma katsayısı [W/m ² ·K]
Sc	Schmidt sayısı
$\dot{q}$	Isı üretimi [W/m ³]
D_v	Ortalama su buharı difüzivitesi [m ² /s]
D_f	Suyun difüzyon katsayısı [m ² /s]
C	Derişim [mol/m ³]
L	Geometrinin genişliği [m]
Sc	Schmidt sayısı
V_∞	Hava hızı [m/s]

P	Basınç [Pa]
I_b	Siyah cisim yoğunluğu

Yunan Sembolleri

ε	Yayınım katsayısı
γ	Dış kabuğun sönüm katsayısı [1/m]
κ	Hava boşluğu absorpsiyon katsayısı [1/m]
σ	Stefan Boltzman sabiti [$W/m^2 \cdot K^4$]
τ	Dış kabuğun yansım oranı
ω	Kan perfüzyon oranı [$(m^3/s)/m^3$]
δ	Sınır tabaka kalınlığı [m]
Ω	Isıl hasar fonksiyonu
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
α	Emilim katsayısı
$\emptyset$	Reaksiyon derecesi

Alt/Üst Simge

d	Doku
kn	Kan
art	Atardamar
dif	Difüzyon
m	Metabolik
ç	Çevre
dk	Dış kabuk
ds	Dermis
ep	Epidermis
kas	Kas dokusu
nb	Nem bariyeri
R	Radyasyon

ta	Termal astar
yağ	Yağ dokusu
h	hava
çk	Çekirdek
g	Sıcak gazlar
ef	Efektif
top	Toplam
baş	başlangıç
y	Yüzey

