



**TEKSTİL VE MÜHENDİS**  
**(Journal of Textiles and Engineer)**

<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>



---

**Termal Koruyucu Giysilerin Koruma Performansı Üzerinde Hava Boşluklarının Etkisi**

**Effect of Air Gaps on Protective Performance of Thermal Protective Clothing**

Hande Gül ATASAĞUN  
Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir MYO, Teknik Programlar Bölümü, İzmir, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online): 30 Aralık 2016 (30 December 2016)

---

**Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):**

Hande Gül ATASAĞUN (2016): Termal Koruyucu Giysilerin Koruma Performansı Üzerinde Hava Boşluklarının Etkisi, Tekstil ve Mühendis, 23: 104, 277-287.

**For online version of the article:** <https://doi.org/10.7216/1300759920162310405>



**Derleme Makale / Review Article**

# TERMAL KORUYUCU GİYSİLERİN KORUMA PERFORMANSI ÜZERİNDE HAVA BOŞLUKLARININ ETKİSİ

**Hande Gül ATASAĞUN\***

Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir MYO, Teknik Programlar Bölümü, İzmir, Türkiye

*Gönderilme Tarihi / Received: 08.09.2016*

*Kabul Tarihi / Accepted: 10.11.2016*

**ÖZET:** Kişisel koruyucu donanımlar, çalışanların iş yerinde maruz kaldıkları sağlık ve güvenliklerini tehdit eden tehlikelerden korunması amacıyla tasarlanmıştır. Tehlike çeşitlerine göre sınıflandırılan kişisel koruyucu donanımlardan biri olan ısı ve ateşe karşı koruyucu giysilerin çalışanı koruma performansı, deri ve giysi arasında oluşan hava boşluklarının şekilleri, boyutları ve dağılımından etkilenmektedir. Yapılan bu derleme makalede öncelikle hava boşluklarını etkileyen faktörler ve hava boşlukları boyunca ısının transfer mekanizması incelenmiştir. Daha sonra termal koruyucu giysilerde koruma performansı açıklanarak, giysi ve vücut arasında oluşan hava boşluklarının koruma performansı üzerindeki etkileri literatür ışığında değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Termal koruyucu giysi, küçük ölçekli laboratuvar testi, tam ölçekli manken testi, 3-D vücut tarama

## EFFECT OF AIR GAPS ON PROTECTIVE PERFORMANCE OF THERMAL PROTECTIVE CLOTHING

**ABSTRACT:** Personal protective equipment is designed for workers in order to protect from exposure to hazards in their workplaces that influence their health and safety negatively. The protective performance of the heat and flame resistant protective clothing, which is one of the personal protective equipment classified according to the type of hazards, is affected by the shape, size and distribution of air gaps between the skin and the garment. In this paper, firstly, the factors affecting air gaps and the heat transfer mechanism through air gaps are examined; then the thermal protective performance of protective clothing is explained, and the effects of air gaps on the performance of these clothing are evaluated considering the findings of previous studies.

**Keywords:** Thermal protective clothing, bench-top test, full-scale manikin test, 3-D body scanning

---

\* **Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** [handegul.yuksel@deu.edu.tr](mailto:handegul.yuksel@deu.edu.tr)

**DOI:** 10.7216/1300759920162310405, [www.tekstilvemuhendis.org.tr](http://www.tekstilvemuhendis.org.tr)

## 1. GİRİŞ

Çalışanların yapmış oldukları iş sırasında maruz kalabilecekleri sağlık ve güvenlik risklerine karşı vücutlarının farklı bölgeleri ya da tamamını koruyacak şekilde tasarlanmış kişisel koruyucu donanımlar kullanmaları, oluşabilecek iş kazaları veya meslek hastalıklarının önlenmesine yardımcı olmaktadır. Kişisel koruyucu donanımlardan birisi olan ve özellikle çok tehlikeli işlerde çalışan kişileri ısı, kimyasal, biyolojik ve mekanik olarak ortaya çıkan dış etkenlere karşı bir bariyer etkisi yaratarak koruyan giysilere koruyucu giysiler adı verilmektedir [1].

Yüksek riskli işlerde çalışanların karşılaşılabileceği ısı tehlikelerden biri aniden yanma ve alev almadır. Petrokimya, otomotiv gibi tehlikeli sektörlerde çalışan sanayi işçileri, yarış arabası sürücüleri ve yüksek çevre sıcaklığı, yoğun ısı akışı altında çalışan itfaiyeciler bu tehlikeye maruz kalabilmektedirler [2, 3]. Aniden yanma ve alev almaya genellikle kısa süreli olarak maruz kalınmasına karşın, maruz kalmanın süresi ve şiddetine bağlı olarak çalışanların derisinde birinci dereceden üçüncü dereceye kadar yanıklar oluşabilmektedir [2]. Bu nedenle bu tehlike ile karşılaşılabilecek sektörlerde çalışanların koruma performansı yüksek olan aleve dayanıklı giysiler giymeleri, çalışanların sağlığı ve güvenliği açısından oldukça önemlidir.

Termal koruyucu giysilerde koruma performansının değerlendirilmesi için küçük ölçekli laboratuvar testi ve tam ölçekli manken testi kullanılmakta ya da matematiksel modeller ile performans tahminlenebilmektedir. Giysilerin termal koruma performansı üç temel faktöre bağlı olarak değişebilmektedir. Bunlardan ilki koruyucu giysi giyen çalışanın çalıştığı ortamda maruz kaldığı ısı akış yoğunluğu, ısı kaynağının tipi gibi çevresel termal zararlardır. Koruma performansını değiştiren diğer bir faktör koruyucu giysinin yapıldığı materyalin özellikleri iken, son faktör ise giysinin tasarımıdır. Termal koruyucu giysilerin koruma performansını arttırmak için materyal özellikleri yerine, giysi tasarımının geliştirilmesi daha kolay ve daha uygulanabilir [3]. Giysi tasarımının değiştirilmesi (giysinin vücuda uyumu, giysi birleştirme şekilleri, giyside kullanılan farklı parçalar) vücut ve giysi arasında oluşan hava boşluğu katmanlarının şeklini (homojen veya heterojen hava boşluğu), boyutunu ve dağılımını etkilemektedir. Hava katmanları vücut ve giysi arasındaki ısı transfer mekanizmasını doğrudan etkilediğinden, deride yanıkların oluşmasında ve oluşan yanıkların derecelerinde belirleyici olmaktadır [2].

Yapılan bu çalışmada ilk olarak giysi sisteminde oluşan hava boşlukları tanımlanarak, hava boşluklarını etkileyen faktörler ve hava boşlukları boyunca ısı transfer mekanizması incelenmiştir. Daha sonra termal koruyucu giysilerde koruma performansı açıklanarak, hava boşluklarının bu giysilerin performansına etkileri incelenmiş ve bu alanda yapılmış olan araştırmalara ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

## 2. GİYSİ SİSTEMLERİNDE OLUŞAN HAVA BOŞLUKLARI

Giysi ile kaplı olan bir insan vücudunda deri ve giysi arasında, giysi katmanları arasında ve giysinin dış katmanı üzerinde hava

katmanları bulunmaktadır. Giysi sistemi içerisinde oluşan hava katmanlarının şekilleri, boyutları ve dağılımının belirlenmesi çok kolay olmamaktadır. Giysiler altındaki hava katmanlarının hacmini belirlemek için kullanılmakta olan üç farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar vakumlu giysi metodu, silindir modeli ve üç boyutlu (3-D) vücut tarama metodudur (Şekil 1) [4-6].

Vakumlu giysi ile hava hacmi ölçüm metodunda, giyilen giysiler üzerine ince hava geçirmez vakumlu bir giysi daha giydirilmekte ve bu giysi vücuda sıkıca bastırılana kadar hava yavaşça vakum pompası ile çekilmektedir (Şekil 1a). Bu sırada hem hacim hem de basınç ölçülmektedir. Vakumlu giysi diğer giysilere temas ettiği anda basınç artmakta ve tüm hava çekilene kadar hacim ölçülmektedir. Bu yöntem mikro çevrede hapsedilen havanın hacmini belirlemek için zaman alıcı ve hata yapmaya açık bir yöntemdir [4, 5]. Diğer bir yöntem olan silindir modelinde ise, insan vücudu silindirler şeklinde modellenmekte, çıplak ve giysili insan vücudunun çevresi ölçülerek mikroklimadaki hacim tahmin edilmektedir (Şekil 1b) [4, 5, 9]. Silindir modeli ile tahminleme kolay bir yöntem olmasına karşın, elde edilen sonuçlar yaklaşık değerler olduğundan tekrarlanabilirliği yüksek olan ve daha gerçekçi sonuçlar veren 3-D vücut tarama yöntemi hava boşluklarının boyutlarını belirlemek için daha kullanışlı olmaktadır (Şekil 1c) [6]. 3-D vücut tarama yöntemi araştırmacılar tarafından vücudun farklı bölgelerindeki hava boşluklarının boyutları ve dağılımının belirlenmesi için sıklıkla kullanılmaktadır [7, 10-15]. Bu yöntemde hava boşluklarının boyutlarını belirlemek için mankenden alınan çıplak ve giysili 3-D görüntüler üst üste getirilmekte ve hava boşluklarının hacmi ya da boyutu çıplak ve giysili görüntüler arasındaki hacimsel fark veya mesafe farkından hesaplanmaktadır [16].

### 2.1. Hava Boşluklarının Boyutları ve Dağılımını Etkileyen Faktörler

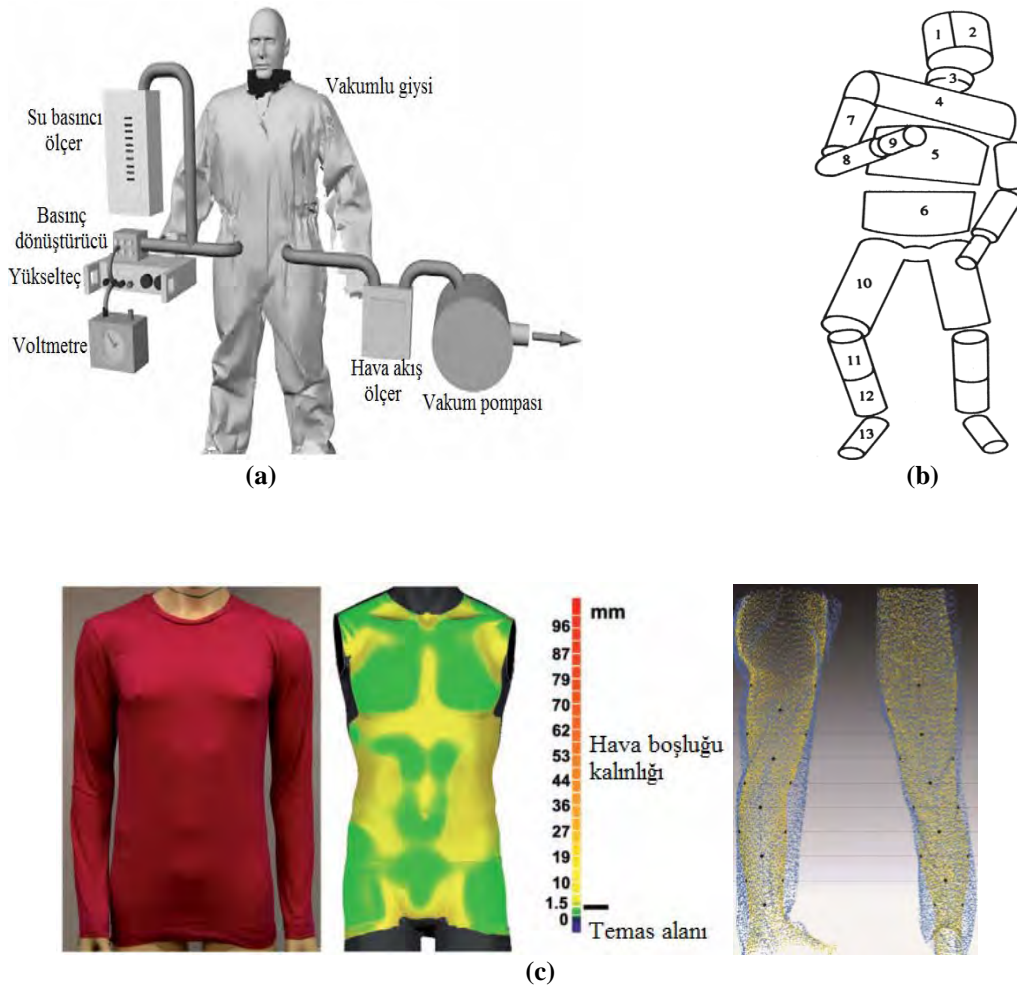
Vücut ve giysi arasındaki hava katmanlarının boyutları ve dağılımını insan vücudunun geometrisi nedeniyle vücudun farklı bölgeleri için değişim gösterebilmektedir. Bu değişimlerin belirlenmesi amacıyla araştırmacılar tarafından 3-D vücut tarama yöntemi kullanılmaktadır. Song (2007) koruyucu giysi giyen bir mankenin çeşitli vücut bölgelerinde oluşan hava katmanlarını incelediğinde, mankenin bacaklarında hava katmanlarının fazla olduğunu, kolları ve sırtında ise hava boşluklarının küçük olduğunu belirlemiştir [17]. Psikuta ve diğerleri (2012) ise çalışmalarında mankene üst giysi giydirildiğinde vücudun içbükey şekli nedeniyle alt sırt ve lumbus bölgesinde hava boşluğu kalınlıklarının fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Alt giysiler için yapılan ölçümlerde ise, dizin alt kısmında ölçülen hava boşluklarının baldırlarda ölçülene göre daha büyük kalınlık değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir [14]. Zhang ve diğerleri (2015) ise yalnızca mankenin üst vücudu üzerinde bulunan farklı bölgelerdeki hava boşluğu boyutlarının değişimini incelediklerinde, en küçük hava boşluklarının ön ve arka omuzda ölçüldüğünü belirlemişlerdir. En büyük hava boşlukları ise Psikuta ve diğerleri (2012) tarafından elde edilen bulgulara benzer şekilde orta ve alt sırt

bölgesinde ölçülmüştür [14, 18]. Giysi sistemi içerisinde oluşan hava boşluklarının boyutları ve dağılımı vücut geometrisinin yanı sıra, giyside kullanılan kumaşın özellikleri, giysinin tasarım özellikleri ve kullanım koşullarına da bağlı olarak değişebilmektedir [12, 19].

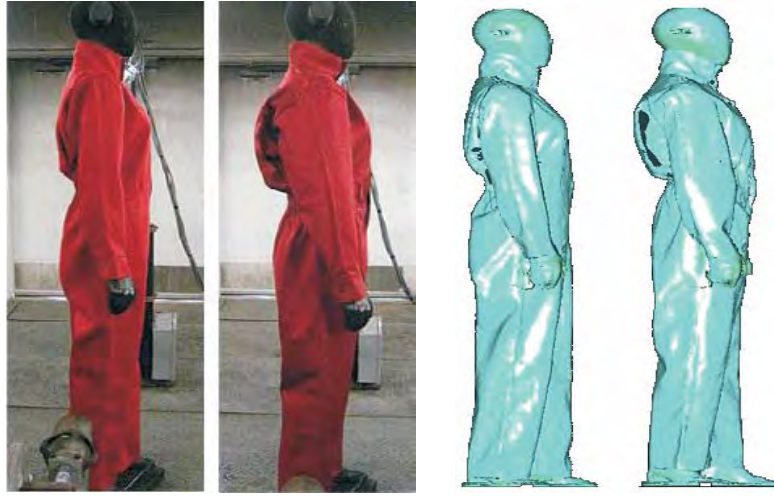
Giysi kumaşlarının mekanik özellikleri deri ve giysi arasında oluşan hava boşluklarının boyutları üzerinde etkili olmaktadır. Kim ve diğerleri (2002) ve Song (2007) çalışmalarında giysi kumaşlarının sahip olduğu dökümlülük ve sertlik özelliklerinin hava katmanlarını etkilediğini belirtmişlerdir [17, 20]. Yu ve diğerleri (2013) ise farklı kumaşa sahip olan ve aynı modele göre dikilen giysilerde oluşan hava boşluklarını 3-D vücut tarama yöntemi ile ölçerek, bu hava boşluklarının kullanılan kumaşların mekanik özellikleri ile arasındaki ilişkileri belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda kumaşların eğilme uzunluğu ve çözgü sıklığındaki artış ile giysi sisteminde oluşan hava boşluklarının hacminin arttığı gözlenmiştir. Bunun yanı sıra giyside oluşan dalga tepelerinin değişim katsayısını gösteren kumaş dökümlülük tepe açısının homojenliğinin azalması

sonucunda, hava boşluklarının hacminin arttığı belirlenmiştir [16]. Li ve diğerleri (2013) yedi farklı kumaştan beş farklı giysi bedeninde üretilen 35 gömlekte oluşan hava boşluklarının kalınlığı ve hacmini 3-D vücut tarayıcı yardımıyla ölçmüşlerdir. Çalışmada hava boşluklarının boyutlarını giysilerdeki bolluk payının etkilediğini belirlemişler ve aynı bedende üretilen giysilerde ise dökümlülük, sertlik, metrekare ağırlığı gibi kumaş özelliklerinin de etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır [21].

Giysinin vücuda uyumu, birleştirilme şekli, giysinin sahip olduğu parçalar (cep, manşet, yaka...) gibi giysi tasarım özellikleri de deri ve giysi arasında oluşan hava katmanlarını etkilemektedir. Mah ve Song (2010) kadın bir manken üzerinde erkek ve kadınlar için tasarlanmış olan iki farklı koruyucu giyside vücut ve giysi arasında oluşan hava boşluklarının dağılımı ve boyutlarını belirledikleri çalışmalarında, erkek ve kadın koruyucu giysi tasarımları arasında hava boşluğu boyutları açısından en büyük farkın mankenin orta sırt bölgesinde oluştuğunu belirlemişlerdir (Şekil 2) [12].



**Şekil 1.** Giysi altında oluşan havanın hacmini belirlemek için kullanılan yöntemler (a) Vakumlu giysi metodu [4] (b) Silindirik modeli [4], (c) 3-D vücut tarama yöntemi [7, 8]



Şekil 2. Manken üzerinde erkek ve kadınlar için tasarlanan koruyucu giysiler ve vücut tarama görüntüleri [12]

Frackiewicz-Kaczmarek ve diğerleri (2015) çalışmalarında gömlek ve atletlerde giysi tipi ve giysinin vücuda uyumunun hava boşluklarının kalınlığına ve temas alanına etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda gövdenin üst kısmında oluşan hava boşluklarının kalınlığına giysi özelliklerinin herhangi bir etkisinin olmadığı, alt gövdede ise giysi bolluk payının artması nedeniyle hava boşluğu boyutlarının değiştiği belirlenmiştir [22]. Aynı araştırmacılar yaptıkları diğer bir çalışmada ise, farklı oranlarda neme sahip olan iç giysiler için hava boşlukları ve temas alanlarını belirlemiştir. Çalışmada nem miktarının ölçülen değerler üzerinde etkisi olduğu belirlenmesine karşın, giysinin vücuda uyumunun hava boşlukları üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır [7].

Vücudun duruş pozisyonu, hareket etmesi, ortamda bulunan rüzgâr nedeniyle gerçekleşen sıkışma gibi giysinin gerçek hayattaki kullanım koşulları da giysi içerisindeki mikroklima ve dış çevre arasındaki hava katmanlarında değişime neden olabilmektedir [23]. Mert ve diğerleri (2016) 3-D vücut tarayıcı kullanarak mankenin üst ve alt vücudunun farklı bölgeleri için

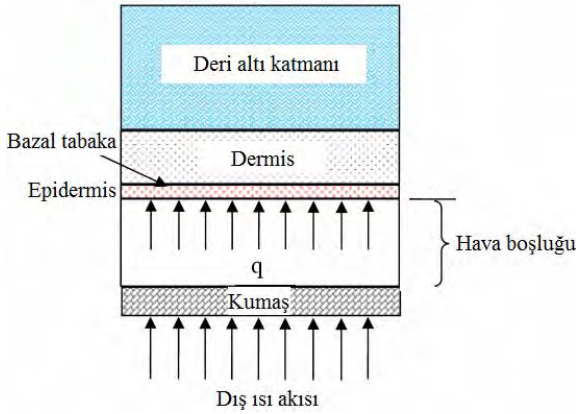
farklı vücut duruş pozisyonlarında (ayakta ve oturarak) giysi sisteminde oluşan hava boşlukları ve temas alanı değerlerini belirlemiştir. Çalışmada vücut duruş pozisyonlarının vücudun farklı bölgelerinde etkisinin farklılaştığı gözlenmiştir. Ölçüm alınan vücut duruş pozisyonlarının üst vücut için karın, lumbus ve pelviste oluşan hava boşlukları üzerinde etkili olduğu belirlenirken, alt vücut için elde edilen dikkat çekici bulgu bacaklarda pelvis bölgesine göre duruş pozisyonlarının etkisinin daha belirgin olmasıdır [15]. Choi ve diğerleri (2014) koruyucu giysi giyen bir kişide sekiz farklı vücut hareketi için 3-D vücut taraması ile hava boşluklarını belirlemeye çalışmışlar ve koruyucu giysilerde dışarıdaki tehlikelere karşı korumasız olan yaka, manşet gibi açık alanlarda hava akışının en aza indirilmesi gerektiği için, bu alanlarda hava boşluğunun değişimini incelemiştir. Çalışma sonucunda kişi tarafından yana eğilme hareketi yapıldığında hava boşluklarındaki farkların belirgin olduğunu ve vücudun bir tarafının giysi ile sıkıştırılarak, bu kısımdaki havanın büyük kısmının açık alanlara veya vücudun diğer kısmına kaymakta olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3) [24].



Şekil 3. Vücudun yana eğilme hareketi için üç boyutlu görüntüler [24]

## 2.2. Giysi Sistemlerinde Hava Boşlukları Boyunca Isı Transferi

İnsan-giysi-çevre sisteminde ısı transferi kuru ısı kaybı (iletim, taşınım ve ışınım) ve buharlaşma ile gerçekleşebilmekte [25] ve bu sistem içerisinde oluşan hava boşluklarının boyutları ısı transferini büyük ölçüde etkilemektedir (Şekil 4). Hava boşluklarının boyutları ısı transferinin hangi yöntem ile gerçekleşeceğini belirleyici bir etken olabilmektedir. Durgun hava boşluklarında vücut ve kumaş arasında ısı iletimi kumaşın deriye yakın olduğu bölgelerde büyük oranda iletimli ve ışınımlı ısı transferi ile gerçekleşmektedir. Durgun hava tekstil yapılarından daha iyi bir yalıtkan olduğu için giysi sistemi içerisinde hapsedilen hava boşluklarının boyutu arttıkça, termal direnç değerinde artış olmakta ve giysinin ısı koruyucu özelliği artmaktadır. Ancak termal dirençte oluşan bu artışın sürekliliği olmamakla birlikte, kritik bir hava boşluğu boyutundan sonra termal direnç değeri düşmeye başlamaktadır. Bu durumun sebebi büyük hava boşluklarında ısınan akışkanın yükselmesine sebep olarak ısı transferini arttıran doğal konveksiyondur [6, 18, 27].



Şekil 4. Deri-hava boşluğu-kumaş sisteminde ısı transferinin şematik olarak gösterimi [26]

Özellikle termal yalıtım özelliği geliştirilmek istenen giysilerde, giysinin bariyer etkisini arttırmak için kritik hava boşluğu değerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Birçok araştırmacı tarafından farklı giysi tipleri için kritik hava boşluğu boyutları ölçümlerle ya da geliştirilen matematiksel modeller yardımıyla tespit edilmiştir. Torvi (1996) matematiksel bir modelde kumaş ve sıcaklık ölçer sensör arasında oluşan hava boşluğunda gerçekleşen ısı transferi için doğal konveksiyonun başladığı hava boşluğu boyutunun yaklaşık 8 mm olduğunu belirlemiştir. Modelin geçerliliğini test etmek için yapmış olduğu akış görüntüleme çalışmasında ise bu değer 6 mm civarında olduğu sonucuna varmıştır [28]. Song (2007) aniden yanmaya maruz kalan tek katlı koruyucu giysilerde kritik hava katmanının yaklaşık 7-8 mm olduğunu geliştirdiği matematiksel modelde ortaya koymuştur [17]. Zhang ve diğerleri (2010) giysinin altında, kumaş katmanlarında ve kumaşa bitişik olan sınır hava katmanında gerçekleşen hissedilir ve gizli ısı transferini dikkate

olarak, deriden çevreye gerçekleşen ısı ve nem transferini simüle edebilen matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde hava boşluklarının boyutlarındaki artış ile toplam ısı akışının azaldığını ve azalma hızının hava boşluğunun boyutu 10-13 mm değerinden büyük olduğunda yavaşladığını belirlemişlerdir. Hava boşluğu boyutu 17 mm olduğunda ise doğal konveksiyonun başladığı tespit edilmiştir [11]. Li ve diğerleri (2013) ise gömlekler üzerine yapmış oldukları çalışmada, deri ve giysi arasındaki hava boşluğu boyutunun 1 cm ya da hacminin 6000 cm<sup>3</sup> üzerinde olması sonucunda doğal konveksiyonun başlayarak gömleklerin termal yalıtımını azalttığı sonucuna ulaşmışlardır [21]. Zhang ve diğerleri (2015) farklı vücut bölgeleri üzerinde oluşan hava boşluklarının giysi yüzey sıcaklığına etkisini değerlendirdiklerinde, vücudun birçok bölgesi için giysi yüzey sıcaklığının hava boşluğu boyutundaki artış ile azaldığını, ancak hava boşluğu boyutu 1,5 cm'ye ulaştığında giysi yüzey sıcaklıklarının tam tersine arttığını gözlemlemişlerdir [18]. Chen ve diğerleri (2004) rüzgarlı ve rüzgar olmayan ortam koşullarında farklı bedenlere sahip olan ceketlerin termal yalıtım değerleri ve hava boşluğu boyutlarını incelediklerinde, rüzgar olmayan çevre koşullarında 1 cm hava boşluğu boyutuna kadar termal yalıtımın arttığını belirlemişlerdir. Rüzgarlı ortam koşullarında ise bu değer 0,6 cm'ye düştüğünü tespit etmişlerdir. Elde edilen bulguların rüzgar nedeniyle oluşan zorlanmış taşınımaya bağlı olduğu belirtilmiştir [29].

## 3. TERMAL KORUYUCU GİYSİLERDE KORUMA PERFORMANSI VE PERFORMANSA HAVA BOŞLUKLARININ ETKİSİ

Termal koruyucu giysiler çalışanları dış çevrede maruz kalacakları termal tehlikelere (sıcak yüzey teması, eriyik metal sıçraması, aniden alev alma ve yanma...) karşı korumaktadırlar. Bu giysilerin koruma performansının değerlendirilmesi vücutta oluşabilecek deri yanıkları dikkate alınarak yapılmaktadır. Termal koruyucu giysiler ani yanmaya maruz kaldığında giyen kişinin derisinde oluşabilecek yanıkların azaltılması için, alevden deriye doğru gerçekleşen ısı transferinin azaltılması gerekmektedir [8]. Bu bağlamda giysi sistemleri içerisinde oluşan hava boşluklarının boyutları ve dağılımı oluşacak ısı transferi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Havanın sahip olduğu düşük termal iletkenlik değeri nedeniyle hava katmanları giysi boyunca ısı transferini değiştirmekte ve dolayısıyla termal koruyucu giysinin performansını gösteren deride oluşacak yanıkların derecesini etkilemektedir.

### 3.1. Termal Koruyucu Giysilerde Koruma Performansı

Tekstil lifleri ısı absorbe ettiklerinde fiziksel, kimyasal ya da her iki şekilde değişime uğramaktadırlar. Organik lif formundaki polimerlerin tamamı piroliz sıcaklığı olarak tanımlanan bir eşik değerde ya da bu değer üzerinde termal olarak ayrışmaktadırlar. Hava bu sıcaklığın üzerinde ısındığında tutuşma sıcaklığına ulaşmakta ve yanan gazlar oksijen ile birleştiğinde yanma olayı

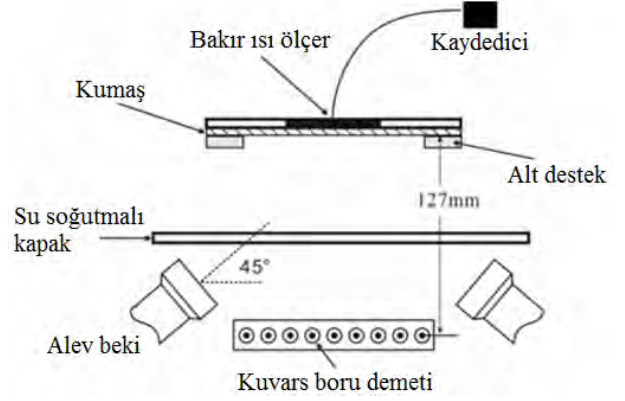
gerçekleşmektedir [30, 31]. Sıcak yüzey, ışınlı enerji gibi tutuşma kaynaklarının bulunduğu termal çevrelerde sıcaklıklar alev sıcaklığından daha düşük olabilmektedir, bu nedenle termoplastik lifler termal tehlikelere karşı belirli bir süre direnç gösterebilmektedir. Ancak sıcaklıklar artarak bu liflerin erime sıcaklığına yaklaştığında, bu liflerden üretilen tekstil ürünlerinin çoğunun koruyuculuğu azalmaktadır [30].

Tehlikeli sektörlerde çalışan sanayi işçileri ve itfaiyeciler alev, eriyik metal sıçraması, sıcak yüzey teması gibi çeşitli termal tehlikeler ile çalışma ortamlarında karşılaşabilmektedirler. Bu termal tehlikelerin derecesi ısı ve alev yoğunluğu ve şekline göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin, itfaiyeciler normal çalışma koşullarında 100°C'den düşük sıcaklıklarda, 4 kW/m<sup>2</sup> termal ışıma maruz kalırken, tehlikeli koşullarda sıcaklık 100-300°C'ye yükselbilmekte ve termal ışıma 4-25 kW/m<sup>2</sup> arasında değişebilmektedir. İtfaiyecinin yanan bir bina içerisinde bulunması gibi acil durum koşullarında ise hava sıcaklığı 300-1100°C aralığında değişebilmekte ve toplam ısı akışı 25-208 kW/m<sup>2</sup> arasında olabilmektedir [26, 32]. Çalışanların oluşabilecek her türlü termal tehlikeye karşı korunması ve güvenliklerinin sağlanması için aleve dayanıklı materyallerden yapılmış olan koruyucu giysiler ve donanımlar kullanmaları önemlidir.

Termal tehlikelerden dış ortama ısının transferi ışıma, taşınım, iletim ya da bunların kombinasyonları şeklinde gerçekleşebilmektedir [33]. Tekstil ürünlerinde termal koruma yeteneği tekstil ürününün maruz kaldığı iletimli, taşınımli, ışınlı termal enerji ya da bunların iki veya daha fazlasına direnç gösterme davranışı olarak tanımlanmaktadır [30, 33]. Termal koruyucu giysilerin performansının değerlendirilmesi aleve maruz kalınması halinde kişilerin derilerinde oluşabilecek yanıkların derecesini belirleyebilmek için önemlidir. Bu giysilerin termal koruma davranışlarının değerlendirilmesi için araştırmacılar tarafından küçük ölçekli laboratuvar testleri ve tam ölçekli manken testleri kullanılmaktadır [26, 34]. Şekil 5 ve 6'da termal koruyucu giysilerin performansını belirlemek için kullanılan bu test cihazları gösterilmektedir.

Koruyucu giysilerin laboratuvar ortamında termal koruma performansının değerlendirilebilmesi için aleve maruz kalma durumunda taşınımli enerji ve ışıma enerjisi dengesi oluşturulmalı ve giysi gerçek kullanım durumuna benzer seviyede bir ısıya maruz bırakılmalıdır [35]. Termal koruyucu giysilerde ani yanma durumunu simüle eden 84 kW/m<sup>2</sup> ısı akış yoğunluğuna maruz kalınan bir çevrede kumaş boyunca ısı akışı kalorimetre kullanılarak ölçülebilmektedir [10, 36]. Küçük ölçekli laboratuvar testlerinde yüksek ısı akışının simüle edilebilmesi için alev bekleri ve/veya ışıma ısı kaynağı kullanılmaktadır. Bu testlerde kumaş numunesi boyunca transfer edilen ısı miktarı ölçülmekte ve ikinci dereceden yanık oluşması için geçen süre Stoll ikinci dereceden yanık kriteri ya da Henriques yanık integral metodu ile tahmin edilmektedir [2, 37, 38]. Tam ölçekli manken testleri ise gerçek bir yangın durumuna uygun şekilde maruz kalma süresi ve ısı akış miktarı değiştirilebilen ortam şartlarında kumaş

numunesi yerine giysilerin bütünü kullanılarak yapılmaktadır. Mankenin yüzeyi üzerinde bulunan çok sayıda ısı akış sensörü sayesinde alevlerin manken vücudunun farklı bölgelerinde meydana getirdiği sıcaklık değişimleri belirlenebilmekte ve deride oluşacak ikinci ve üçüncü dereceden yanıklar tahmin edilebilmektedir [17, 26, 39].



Şekil 5. Küçük ölçekli laboratuvar test cihazı [40, 41]



Şekil 6. Tam ölçekli manken testi [17]

### 3.2. Termal Koruyucu Giysilerin Performansı Üzerinde Hava Boşluklarının Etkisi

Termal koruyucu giysilerin performansını değerlendirmek için kullanılan küçük ölçekli laboratuvar testleri tam ölçekli manken testlerine göre basit, hızlı ve daha düşük maliyetlidirler [42]. Ancak küçük ölçekli testlerde vücut bölgelerine göre değişim gösteren ve koruma performansı üzerinde doğrudan etkili olan hava boşluklarının dağılımı belirlenemediği için gerçek bir yanma durumunda vücudun çeşitli bölgelerini alevin nasıl etkileyeceği bilinmemektedir. Literatürde küçük ölçekli laboratuvar testlerinde giysilerin koruma performansına hava boşluklarının etkisinin incelendiği çalışmalar bulunmakta ve araştırmacılar tarafından bu çalışmalardan elde edilen bulguların giysi sistemi içerisinde hava boşluğu dağılımının bilinmesi durumunda giysinin gerçek yanma durumundaki performansının tahminlenmesi için kullanılabileceği belirtilmiştir [3, 42, 43].

Küçük ölçekli test cihazlarında hava boşlukları yatay olarak konumlanmaktadır. Fakat gerçek durumda kişilerin giysileri içerisindeki hava boşluklarının çoğu dikey konumda bulunmaktadır ve taşınımı ısı transfer katsayısı yatay ve dikey hava boşlukları için farklılık göstermektedir [32]. Bu nedenle tam ölçekli manken testleri giysilerin termal koruma performansı üzerinde hava boşluklarının etkisinin incelenmesi için daha uygun olmaktadır. Bazı araştırmacılar küçük ve tam ölçekli testler arasındaki ilişkileri belirlemek için çalışmalar yapmışlardır. Lee ve diğerleri (2002) çalışmalarında askeri giysilerin koruma performansını küçük ölçekli laboratuvar testinde hava boşluğu olmaksızın ve 6,35 mm hava boşluğu oluşturarak belirlemişlerdir. Bunun yanı sıra aynı giysilerin koruma performansını tam ölçekli manken testinde de değerlendirmişlerdir. Testler arasındaki ilişkileri incelediklerinde benzer ısı akış seviyesinde mankenin sıfır ya da küçük hava boşluğuna sahip olan alanları için elde edilen sonuçlar ile hava boşluksuz olarak yapılan küçük ölçekli testin sonuçları arasında ilişkiler bulunduğunu tespit etmişlerdir [42]. Wang ve diğerleri (2015) ise benzer şekilde her iki testi kullanarak termal koruyucu giysilerin koruma davranışını değerlendirmişlerdir. Testlerin sonuçları arasında herhangi bir ilişki olmadığını ve bu durumun sebebinin manken testleri sırasında dikkate alınan, hava boşluklarının boyutlarını değiştiren ısıl büzülme olduğunu belirtmişlerdir [40].

Termal koruyucu giysilerde ısı ve kütle transferinin tahminlenmesi için matematiksel modeller kullanılabilmektedir. Birçok araştırmacı tarafından bu giysilerde koruma performansının belirlenmesi için hava boşluklarının dikkate alındığı matematiksel modeller geliştirilmiştir [2, 10, 38, 44-46]. Geliştirilen matematiksel modellerde kumaş, hava boşluğu ve insan derisi boyunca ısı ve kütle transferi ayrı ayrı ele alınmaktadır. Bu modeller kullanılarak giysilerin termal koruma performansını etkileyen parametreler tanımlanabilmekte ve böylece giysilerin koruma performansı geliştirilebilmektedir. Ghazy ve Bergstorm (2011) ani yanmaya maruz kalan koruyucu giysilerde geçici rejimde ısı transferi için matematiksel bir model geliştirmişlerdir.

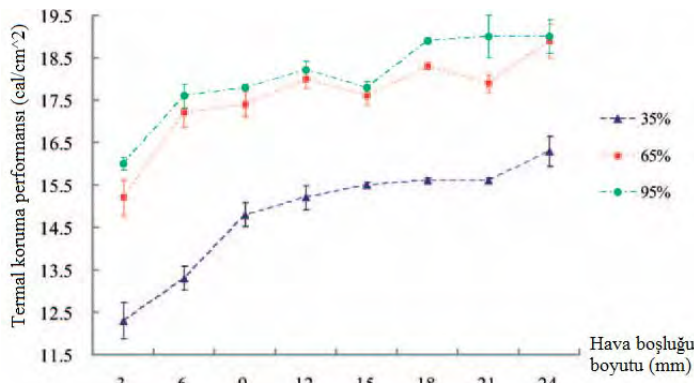
Modelde hava boşlukları boyunca iletim ve ışınlama ısı transferi birlikte ele alınmıştır. Hava boşluğunun soğurma katsayısı, boyutları gibi farklı parametrelerin ısı transferine ve giysilerin termal koruma performansına etkileri araştırıldığında, hava boşluğunun soğurma katsayısının hava boşluğu içerisindeki sıcaklık dağılımına etkisinin düşük olduğu, ancak deride özellikle üçüncü dereceden yanık oluşması için geçen süreyi etkilediği ortaya konulmuştur. Hava boşluklarının boyutlarındaki azalmanın (standart kabul edilen 6,4 mm değeri altında) hava boşluğu boyunca gerçekleşen ısı transferi üzerinde etkisi olduğu çalışmada elde edilen diğer önemli bir bulgudur [2].

Termal koruyucu giysi giyilmesi gereken ortam koşullarında çalışan kişiler genellikle yüksek sıcaklığa maruz kalmakta ve/veya yoğun aktivite seviyelerinde çalışmaktadırlar. Koruyucu giysilerin ağır ve katmanlı bir yapıya sahip olması, geçirgenliğinin az olması, kişilerin hareket kabiliyetini kısıtlaması gibi sebepler zaten zorlayıcı olan koşullarda çalışan kişilerin ısı stresini arttırabilmekte ve çalışanların fiziksel ve psikolojik performanslarında düşüşe neden olabilmektedir. Bu nedenle koruyucu giysilerden beklenen yalnızca koruma performansının en üst seviyede olması değil, aynı zamanda çalışanların termofizyolojik konforunun sağlanması için vücut ve çevre arasında gerçekleşen ısı ve su buharı transferini engellemesidir [1]. Bunun yanı sıra koruyucu giysi giyen bir çalışan terlediğinde, oluşan teri vücudundan uzaklaştıramazsa doyma gerçekleşebilmekte ve yüksek sıcaklığa sahip olan giysinin mikroklimasında bulunan doymuş nem, kişinin alev maruz kalması sonucunda deride buhar yanıklarına sebep olabilmektedir [47-49]. Islak kumaşlarda hava boşluğu boyutlarının enerji transferi üzerindeki etkisi ısı ışınlama, iletimli/taşınımı ısı akışı ve buhar transferinin dengesine bağlıdır [49]. Bu nedenle kullanım durumunda ıslanabilecek olan giysiler için ısı transferinin yanı sıra nem transferinin de dikkate alınması gerekmektedir. Literatür incelendiğinde bazı araştırmacıların termal koruyucu giysilerin koruma performansına hava boşluklarının etkisi ile birlikte nemin etkisini de dikkate alarak çalışmalar yaptıkları görülmektedir.

Wang ve diğerleri (2012) dört katmandan oluşan (iç katman, ısı bariyer, nem bariyeri ve dış katman) termal koruyucu giysilerde kullanılan kumaşların küçük ölçekli laboratuvar tipi test cihazında koruma performansını belirlemişler ve performans üzerinde kumaş katmanları arasındaki hava boşluklarının boyutları ve bulunduğu yer ile birlikte nemin etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar kumaşların koruma performansının hava boşluklarının boyutlarındaki artış ile arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak hava boşluğu ısı kaynağından uzak bir konumda olduğunda, yapıda bulunan nemin hava boşluğu boyutunun koruma performansına olan olumlu etkisini azalttığı tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen diğer bir çarpıcı bulgu ise kumaş katmanlarından olan dış katman ve nem bariyeri arasında hava boşluğunun olmaması ya da küçük olması durumunda yapıya eklenen nemin termal koruma performansını arttırmasıdır [3]. Li ve diğerleri (2012) önceki çalışmaya benzer şekilde küçük ölçekli



test cihazında itfaiyeci giysilerinde kullanılan iki farklı Nomex®IIIA kumaşın termal koruma performansını ölçerek, mikroklimada bulunan bağıl nem ve hava boşluklarının performans üzerindeki etkilerini birlikte değerlendirmişlerdir. Test cihazında hava boşlukları 0-24 mm (3 mm aralıklı olarak) aralığında olacak şekilde ve bağıl nem değerleri %35, %65 ve %95 olarak ayarlanmıştır. Çalışma sonucunda mikroklimada bulunan bağıl nemin kumaşların termal koruma performansına pozitif yönde etkisi olduğu tespit edilmiştir. Mikroklima bağıl nem değeri %35'in altında olduğunda kritik hava boşluğu boyutunun 12-15 mm civarında olduğu, %65 ve %95 gibi daha nemli mikroklimalarda ise bu değer 12 mm'ye düştüğü gözlenmiştir (Şekil 7) [43].



**Şekil 7.** Li ve diğerlerinin (2012) koruyucu giysi kumaşı için farklı boyutta hava boşlukları ve farklı bağıl nem değerlerinde ölçmüş oldukları termal koruma performansı değerleri [43]

Lu ve diğerleri (2013) ise yaptıkları çalışmada farklı nem içeriğine sahip olan kumaşların koruma performansının hava boşluğu boyutları ile ilişkisini incelemişlerdir. Çalışmada nemli kumaşlarda doğal konveksiyonun başlamasına neden olan kritik hava boşluğu boyutunun 9-12 mm civarında olduğu gözlenmiş ve kumaşlarda nem içeriği arttıkça bu değer de yükseldiği tespit edilmiştir [49]. He ve diğerleri (2016) itfaiyeci giysilerinde kullanılan üç katlı bir kumaş sisteminin termal koruma performansına hava boşluğunun bulunduğu konum ve boyutların (0-5,2 mm) ve kumaş nem içeriğinin (% 0-70) etkisini birlikte değerlendirmişlerdir. Çalışmaları incelenen önceki araştırmacılardan farklı olarak test cihazında 84 kW/m<sup>2</sup> ısı akışı yerine 21 kW/m<sup>2</sup> ışınlı ısı akışı kullanmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde kumaş sistemi içerisinde bulunan havanın hem kuru hem de ıslak kumaşlarda termal koruma performansını olumlu yönde etkilediğini belirlemişlerdir. Hava boşluklarının buldukları pozisyonun ise kuru ve ıslak kumaşlarda etkisinin farklı olduğu ve ıslak kumaşlarda hava boşluğunun ısı kaynağından uzakta olmasının ikinci dereceden yanık oluşma süresini arttırdığı, kuru kumaşlarda ise sonucun tam tersi olduğu gözlenmiştir [50].

Termal koruyucu giysilerin yoğun ısıya maruz kalmaları neticesinde giysilerde ısı büzülme oluşabilmekte ve bu büzülme ile vücut etrafında sarılı olan kumaş çapında enine yönde bir azalma

gerçekleşerek, giysi ve vücut arasında oluşan hava boşlukları dinamik olarak küçülmektedir [51]. Li ve diğerleri (2015) ani yanma durumunda oluşan ısı büzülme etkileyen faktörleri belirlemek için yapmış oldukları çalışmalarında ısı büzülmenin aleve maruz kalma koşulları, kumaş özellikleri, giysi bedeni ve vücudun hareket durumundan etkilendiğini belirlemişlerdir. Hareket ettirilebilir yanan bir mankende yapılan ölçümlerde en fazla ısı büzülmenin giysinin kol ve bacak kısımlarında olduğu ve ayrıca giysinin arka kısmında ön kısmına göre daha fazla büzülme gerçekleştiği gözlenmiştir. Giysilerin beden büyüklüğündeki artışın büzülme hızını arttırdığı belirlenmiş ve hava boşluk boyutu ve ısı büzülme arasındaki korelasyon katsayısı 0.749 olarak tespit edilmiştir [52]. Isıl büzülme hava boşlukları boyunca ısı transferini etkileyerek giysinin termal koruma performansını azaltmakta ve deride yanıkların artmasına sebep olabilmektedir [17]. Ghazy (2014) çalışmasında kumaşta oluşan ısı büzülmenin koruyucu giysinin performansına etkisini ortaya koymak amacıyla matematiksel bir model geliştirmiştir. Çalışmada ısı büzülmenin doğrudan etkilediği deri ve kumaş arasındaki hava boşlukları boyunca ısı transferi modellenerek, vücut etrafında sarılı olan giysinin çapı ve kumaş büzülme hızının etkileri matematiksel olarak ortaya konulmuştur. Çalışma sonucunda giysinin aleve maruz kalması neticesinde koruma performansının kumaşın boyutlarında meydana gelen azalmaya bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca giysilerin koruma performansı üzerinde giysi çapındaki azalmanın kumaş büzülme hızına göre daha etkili olduğu gözlenmiştir [51].

Alev, ısı gibi termal tehlikelere maruz kalan koruyucu giysiler enerjinin büyük bir kısmını yapılarında depolamaktadırlar. Maruz kalma durumu sona erdiğinde depolanan termal enerji doğal bir şekilde ya da sıkıştırılma sonucu zorlama ile serbest kalmakta ve bu durum deride ikinci dereceden yanıklar oluşmasına neden olarak giysilerin termal koruma performansını azaltmaktadır [32]. Song ve diğerleri (2011) yapmış oldukları çalışmada katmanları içerisinde hava boşlukları bulunan kumaşlarda fazla termal enerji depolandığını ve hava boşluklu kumaş sistemlerinin termal riske maruz kalma sonrası sıkıştırılmasının deri yanıklarını arttıracığı sonucuna ulaşmışlardır [53].

Kadınlar ve erkeklerin vücut yapılarının farklı olması giysi sistemleri içerisinde oluşan hava boşluklarının boyutlarını ve dağılımını değiştirmekte ve aynı giysileri giyen erkek ve kadın çalışanlarda giysilerin koruma performansı vücut bölgelerine göre farklılaşabilmektedir. Literatürde birçok araştırmacının termal koruyucu giysilerin performansını belirlemek için tam ölçekli erkek mankenler kullandığı görülmektedir [17, 20, 42, 52]. Mah ve Song (2010) çalışmalarında kadın bir mankene erkek ve kadınlar için tasarlanmış olan koruyucu giysiler giydirilerek ölçtükleri hava boşluklarına bağlı olarak giysi tipinin koruma performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada hava boşluklarının boyutlarındaki artışın yanık oluşma süresini artırırken, soğurulan enerjiyi azalttığı belirlenmiştir. Kadın koruyucu giysilerinde hava boşluklarının büyük olduğu ancak termal

korumanın çok yüksek olmadığı ve bu duruma konveksiyonun neden olduğu belirtilmiştir. Erkek tipi koruyucu giysiler giyildiğinde yanıkların mankenin alt sırt kısmında olduğu, kadın tipi koruyucu giysilerde ise yanıkların vücutta yanmaya daha duyarlı olan bölgelerde olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle erkek tipi koruyucu giysilerin kadınlar tarafından giyilmesinin koruma performansı açısından daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır [54].

Termal koruyucu giysi giyen itfaiyeciler normal, tehlikeli ve acil durum çalışma koşullarında farklı çevre sıcaklıkları ve farklı seviyede termal ışıma maruz kalabilmektedirler [32, 41, 55]. Literatürde yer alan birçok çalışmada her ne kadar tehlikeli ve acil durum çalışma koşulları için giysilerin koruma performansları araştırılmış olsa da, itfaiyeciler normal koşullar altında çalışırken de termal risklere maruz kalmaktadırlar [55]. İtfaiyeciler normal koşullarda çalışırken düşük seviyede termal ışıma (5-20 kW/m<sup>2</sup>) maruz kalmakta, kişilerde deri yanıkları ani yanma durumuna göre daha az olmakta ve uzun sürede oluşmaktadır [33]. Fu ve diğerleri (2014) düşük termal ısı akışına (2, 5 ve 10 kW/m<sup>2</sup>) maruz kalan itfaiyeci giysilerinde kullanılan çok katmanlı kumaşlarda oluşan ısı transferine hava boşluklarının boyutlarının (0, 2 ve 5 mm) etkisini incelemişlerdir. Çalışmada her bir kumaş katmanının dış ve iç yüzey sıcaklığı kumaş sistemi içerisindeki sıcaklık dağılımının belirlenmesi için ölçülmüştür. Çalışma sonucunda düşük seviyedeki ışımlı akış altında hem hava boşluklu hem hava boşluksuz kumaş sisteminin termal koruma performansının azaldığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra iç katman ile doğrudan temasta derinin yanması için geçen sürenin hava boşluğunun boyutlarındaki artış ile arttığı, bu duruma kumaş sisteminin termal direncindeki artış ve hava boşluğu ile ayrılan iki bitişik kumaş katmanının arasındaki ısı ışımasının azalmasının neden olduğu belirtilmiştir [55].

Termal koruyucu giysilerin koruma performansının belirlenmesi için yapılan çalışmaların çoğu giysi ve deri arasında bulunan havanın durgun konumda olduğu varsayılarak gerçekleştirilmiştir. Bu giysilerin gerçek kullanım koşullarında ise çalışanlar hareket edebilmekte veya buldukları ortamda hava akımı olabilmektedir. Bu durum koruyucu giysi içerisinde soğutucu bir hava akışı oluşmasına ve hava boşluklarının boyutlarının değişmesine neden olabilmektedir [8, 23, 56]. Ghazy ve Bergstrom (2013) çalışmalarında geliştirdikleri matematiksel model ile kumaşın hareket etme sıklığındaki artışın giysi içerisindeki soğuk hava akış sıklığını artırması sonucunda termal koruma performansının gelişeceği sonucuna ulaşmışlardır. Kumaşın hareket büyüklüğündeki artışın deri ve kumaş arasında oluşan hava boşluğu boyutunda azalmaya sebep olmasından dolayı giysinin koruma performansını azaltacağı da çalışmada elde edilen diğer önemli bir bulgudur [57]. Xin ve diğerleri (2014) ani yanmaya maruz kalan itfaiyeci koruyucu giysi kumaşlarında dinamik hava boşluklarının koruma performansına etkisini belirlemek için tasarladıkları küçük ölçekli laboratuvar tipi test cihazında, dinamik hava boşluklu olarak yapılacak ölçümlerde

25 mm olarak belirlenen hava boşluğu boyutunun değişim devrini 1 saniye, 2 saniye ve 4 saniye olacak şekilde ayarlamışlardır. Ayrıca cihazda kumaşlar için hava boşluğu olmadan ve 6,4 mm statik hava boşluğu oluşturularak da ölçümler yapılmıştır. Çalışma sonucunda hem dinamik hem de statik hava boşluklu olarak yapılan ölçümlerde hava boşluğu olmadan yapılan ölçümlere göre kumaş termal koruma performansının daha yüksek olduğu ve statik ve dinamik koşullar için elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra hava boşluklarının boyutlarındaki değişim sıklığının mikroklimada oluşan taşınımı ısı nedeniyle koruma performansı ile arasında doğrusal bir ilişki olmadığı gözlenmiştir [56].

## 5. SONUÇ

İşçi sağlığı ve güvenliğinin önemli olduğu günümüzde termal koruyucu giysiler termal tehlikelere maruz kalan birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu giysilerin koruma performansının yüksek olması istenmektedir. Giysilerin koruma performansının artırılması yalnızca kullanılan materyal özelliklerini geliştirerek değil, aynı zamanda giysilerin tasarım özellikleri değiştirilerek de sağlanabilmektedir. Çünkü giysinin tasarımına bağlı olarak değişebilen deri ve kumaş arasında oluşan hava boşlukları ısı transferi üzerinde etkili olmakta ve ısıya maruz kalma sonrasında derinin göreceği zararları etkileyebilmektedir. Ancak bunun sağlanabilmesi için hava boşluklarının termal koruma performansına etki mekanizmasının doğru bir şekilde bilinmesi oldukça önemlidir.

Termal koruyucu giysi giyen çalışanların yüksek sıcaklıklarda ve yoğun aktivite seviyelerinde çalışmaları nedeniyle kişilerde ısı stresi sebep olabilecek fazla ısının ve terin uzaklaştırılması gerekmektedir. Giysi sistemlerinde oluşacak hava boşluklarının boyutları ve dağılımı ısı ve kütle transferini etkilediği için kişinin termofizyolojik konfor durumu ile de yakından ilişkilidir. Bu nedenle giysilerin koruma performansı ve termofizyolojik konfor özelliklerine hava boşluklarının etkisinin birlikte değerlendirildiği çalışmaların artırılması ile çalışanların tüm beklentilerini karşılayabilecek koruyucu giysiler tasarlanması mümkün olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Rossi, R. M., (2005), *Interactions between Protection and Thermal Comfort*, Textiles for Protection (ed. Scott, R.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
2. 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.
3. Wang, Y. Y., Lu, Y. H., Li, J., ve Pan, J. H., (2012), *Effects of Air Gap Entrapped in Multilayer Fabrics and Moisture on Thermal Protective Performance*, Fibers and Polymers, 13(5), 647-652.
4. Daanen, H., Hatcher, K., ve Havenith, G., (2005), *Determination of Clothing Microclimate Volume*, Elsevier Ergonomics Book Series, 3, 361-365.

5. Daannen, H., ve Reffeltrath, P., (2007), *Function, Fit and Sizing, Sizing in Clothing* (ed. Ashdown, S.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
6. Zhang, Z., ve Li, J., (2011), *Volume of Air Gaps under Clothing and Its Related Thermal Effects*, Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, 4(2), 137-144.
7. Frackiewicz-Kaczmarek, J., Psikuta, A., Bueno, M. A., ve Rossi, R. M., (2015). *Air Gap Thickness and Contact Area in Undershirts with Various Moisture Contents: Influence of Garment Fit, Fabric Structure and Fiber Composition*, Textile Research Journal, 85(20), 2196-2207.
8. Li, X., Wang, Y., ve Lu, Y., (2011), *Effects of Body Postures on Clothing Air Gap in Protective Clothing*, Journal of Fiber Bioengineering & Informatics, 4(3), 277-283.
9. Lotens, W. A., ve Havenith, G., (1991), *Calculation of Clothing Insulation and Vapour Resistance*, Ergonomics, 34(2), 233-254.
10. Song, G., Barker, R. L., Hamouda, H., Kuznetsov, A. V., Chitrphiromsri, P., ve Grimes, R. V., (2004), *Modeling the Thermal Protective Performance of Heat Resistant Garments in Flash Fire Exposures*, Textile Research Journal, 74(12), 1033-1040.
11. Zhang, Z., Wang, Y., ve Li, J., (2010), *Mathematical Simulation and Experimental Measurement of Clothing Surface Temperature under Different Sized Air Gaps*, Fibers and Polymers, 11(6), 911-916.
12. Mah, T., ve Song, G., (2010a), *Investigation of the Contribution of Garment Design to Thermal Protection. Part 1: Characterizing Air Gaps Using Three-Dimensional Body Scanning for Women's Protective Clothing*. Textile Research Journal, 80(13), 1317-1329.
13. Zhang, Z. H., Wang, Y., ve Li, J., (2011), *Model for Predicting the Effect of an Air Gap on The Heat Transfer of a Clothed Human Body*, Fibres & Textiles in Eastern Europe, 4, 105-110.
14. Psikuta, A., Frackiewicz-Kaczmarek, J., Frydrych, I. K., ve Rossi, R. M., (2012). *Quantitative Evaluation of Air Gap Thickness and Contact Area between Body and Garment*, Textile Research Journal, 82(14), 1405-1413.
15. Mert, E., Psikuta, A., Bueno, M. A., ve Rossi, R. M., (2016), *The Effect of Body Postures on the Distribution of Air Gap Thickness and Contact Area*, International Journal of Biometeorology, doi:10.1007/s00484-016-1217-9
16. Yu, M., Wang, Y., Wang, Y., ve Li, J., (2013), *Correlation between Clothing Air Gap Space and Fabric Mechanical Properties*, Journal of the Textile Institute, 104(1), 67-77.
17. Song, G., (2007), *Clothing Air Gap Layers and Thermal Protective Performance in Single Layer Garment*, Journal of Industrial Textiles, 36(3), 193-205.
18. Zhang, Z., Li, J., ve Wang, Y., (2015), *Improving Garment Thermal Insulation Property By Combining Two Non-Contact Measuring Tools*, Indian Journal of Fibre & Textile Research, 40(4), 392-398.
19. Mert, E., Psikuta, A., Bueno, M. A., ve Rossi, R. M., (2015), *Effect of Heterogenous and Homogenous Air Gaps on Dry Heat Loss through the Garment*. International Journal Of Biometeorology, 59(11), 1701-1710.
20. Kim, I. Y., Lee, C., Li, P., Corner, B. D., ve Paquette, S., (2002), *Investigation of Air Gaps Entrapped in Protective Clothing Systems*, Fire and Materials, 26(3), 121-126.
21. Li, J., Zhang, Z., ve Wang, Y., (2013), *The Relationship between Air Gap Sizes and Clothing Heat Transfer Performance*, The Journal of The Textile Institute, 104(12), 1327-1336.
22. Frackiewicz-Kaczmarek, J., Psikuta, A., Bueno, M. A., ve Rossi, R. M., (2015b). *Effect of Garment Properties on Air Gap Thickness and The Contact Area Distribution*, Textile Research Journal, 85(18), 1907-1918.
23. Parsons, K. C., Havenith, G., Holmer, I., Nilsson, H., ve Malchaire, J., (1999). *The Effects of Wind and Human Movement on the Heat and Vapour Transfer Properties of Clothing*, Annals of Occupational Hygiene, 43(5), 347-352.
24. Choi, J., Kim, H., Kang, B., Nama, Y., Chung, M. K., ve Jung, H., (2014), *Analysis of Clothing Air Gap in a Protective Suit According to the Body Postures*, Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, 7(4), 573-581.
25. Voelker, C., Hoffmann, S., Kornadt, O., Arens, E., Zhang, H., ve Huizenga, C. (2009), *Heat and Moisture Transfer through Clothing*, 11th International IBPSA Conference, Glasgow.
26. Talukdar, P., Das, A., ve Alagurisamy, R., (2016), *Heat and Mass Transfer through Thermal Protective Clothing – A Review*, International Journal of Thermal Sciences, 106, 32-56.
27. Lee, Y., Hong, K., ve Hong, S. A., (2007), *3D Quantification of Microclimate Volume in Layered Clothing for the Prediction of Clothing Insulation*, Applied Ergonomics, 38(3), 349-355.
28. Torvi, D. A., (1996), *Heat Transfer in Thin Fibrous Materials under High Heat Flux Conditions*, Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Alberta Üniversitesi, Alberta.
29. Chen, Y. S., Fan, J., Qian, X., ve Zhang, W., (2004), *Effect of Garment Fit on Thermal Insulation And Evaporative Resistance*, Textile Research Journal, 74(8), 742-748.
30. Horrocks, R., (2005), *Thermal (heat and fire) Protection*, Textiles for Protection (ed. Scott, R.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
31. Ömeroğulları, Z., ve Kut, D., (2012), *Tekstilde Güç Tutuşurluk*, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(1), 27-41.
32. Song, G. W., ve Lu, Y. H., (2013), *Flame Resistant Textiles for Structural and Proximity Fire Fighting*, Handbook of Fire Resistant Textiles, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
33. Song, G., Paskaluk, S., Sati, R., Crown, E. M., Dale, J. D., ve Ackerman, M., (2010), *Thermal Protective Performance of Protective Clothing Used for Low Radiant Heat Protection*, Textile Research Journal, 81(3), 311-323.
34. Bulgun, E., ve Yılmaz, M., (2010), *İtfaiye Elbiseleri Tasarımında Son Gelişmeler*, Tekstil ve Mühendis, 77, 20-28.
35. Behnke, W. P., (1977), *Thermal Protective Performance Test for Clothing*, Fire Technology, 13(1), 6-12.
36. Lawson, J. R., ve Twilley, W. H., (1999), *Development of an Apparatus for Measuring the Thermal Performance of Fire Fighters' Protective Clothing*, US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
37. Barker, R. L., Guerth-Schacher, C., Grimes, R. V., ve Hamouda, H., (2006), *Effects of Moisture on the Thermal Protective Performance of Firefighter Protective Clothing in Low-Level Radiant Heat Exposures*, Textile Research Journal, 76(1), 27-31.
38. Sawcyn, C. M., ve Torvi, D. A., (2009), *Improving Heat Transfer Models of Air Gaps in Bench Top Tests of Thermal Protective Fabrics*, Textile Research Journal, 79(7), 632-644.

39. Su, Y., Wang, Y., ve Li, J., (2016), *Evaluation Method for Thermal Protection of Firefighters' Clothing in High-Temperature and High-Humidity Condition: A Review*, International Journal of Clothing Science and Technology, 28(4), 429-448.
40. Wang, M., Li, X., ve Li, J., (2015), *Correlation of Bench Scale and Manikin Testing of Fire Protective Clothing with Thermal Shrinkage Effect Considered*, Fibers and Polymers, 16(6), 1370-1377.
41. Barker, R. L., (2005), *A Review of Gaps and Limitations in Test Methods for First Responder Protective Clothing and Equipment*, Final Raporu, National Institute for Occupational Safety and Health.
42. Lee, C., Kim, I. Y., ve Wood, A., (2002), *Investigation and Correlation of Manikin and Bench-Scale Fire Testing of Clothing Systems*, Fire and Materials, 26(6), 269-278.
43. Li, J., Lu, Y., ve Li, X., (2012), *Effect of Relative Humidity Coupled With Air Gap on Heat Transfer of Flame-Resistant Fabrics Exposed to Flash Fires*, Textile Research Journal, 82(12), 1235-1243.
44. Chitrphiromsri, 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.
45. Song, G., Chitrphiromsri, P., ve Ding, D., (2008), *Numerical Simulations of Heat and Moisture Transport in Thermal Protective Clothing under Flash Fire Conditions*, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 14(1), 89-106.
46. 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.
47. Lee, Y. M., ve Barker, R. L., (1986), *Effect of Moisture on the Thermal Protective Performance of Heat-Resistant Fabrics*, Journal of Fire Sciences, 4(5), 315-331.
48. Keiser, C., Becker, C., ve Rossi, R. M., (2008), *Moisture Transport and Absorption in Multilayer Protective Clothing Fabrics*, Textile Research Journal, 78(7), 604-613.
49. Lu, Y., Li, J., Li, X., ve Song, G., (2013), *The Effect of Air Gaps in Moist Protective Clothing on Protection from Heat and Flame*, Journal of Fire Sciences, 31(2), 99-111.
50. He, H., Yu, Z. C., ve Song, G., (2016), *The Effect of Moisture and Air Gap on the Thermal Protective Performance of Fabric Assemblies Used by Wildland Firefighters*, The Journal of The Textile Institute, 107(8), 1030-1036.
51. Ghazy, A., (2014). *Influence of Thermal Shrinkage on Protective Clothing Performance during Fire Exposure: Numerical Investigation*, Mechanical Engineering Research, 4(2), 1-15.
52. Li, X., Lu, Y., Zhai, L., Wang, M., Li, J., ve Wang, Y., (2015), *Analyzing Thermal Shrinkage of Fire-Protective Clothing Exposed to Flash Fire*, Fire Technology, 51(1), 195-211.
53. Song, G., Cao, W., ve Gholamreza, F., (2011), *Analyzing Stored Thermal Energy and Thermal Protective Performance of Clothing*, Textile Research Journal, 81(11), 1124-1138.
54. Mah, T., ve Song, G., (2010b), *Investigation of the Contribution of Garment Design to Thermal Protection. Part 2: Instrumented Female Mannequin Flash-Fire Evaluation System*. Textile Research Journal, 80(14), 1473-1487.
55. Fu, M., Weng, W., ve Yuan, H., (2014). *Effects of Multiple Air Gaps on the Thermal Performance of Firefighter Protective Clothing under Low-Level Heat Exposure*, Textile Research Journal, 84(9), 968-978.
56. Xin, L., Li, X., ve Li, J., (2014), *A New Approach to Evaluate the Effect of Body Motion on Heat Transfer of Thermal Protective Clothing during Flash Fire Exposure*, Fibers and Polymers, 15(10), 2225-2231.
57. Ghazy, A., ve Bergstrom, D. J., (2013). *Numerical Simulation of the Influence of Fabric's Motion on Protective Clothing Performance during Flash Fire Exposure*, Heat and Mass Transfer, 49(6), 775-788.