

# TEKSTİL MATERYALLERİNDE MEYDANA GELEN ISI VE KÜTLE TRANSFERİ MEKANİZMALARININ GİYSİ TERMAL KONFORU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Sibel KAPLAN - Ayşe OKUR  
Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü.

## Özet

Kişinin vücudu ile çevre arasındaki fizyolojik, psikolojik ve fiziksel uyum sonucu ortaya çıkan memnuniyet duygusu olarak tanımlanabilen termal konforu etkileyen en önemli parametreler, giysi sisteminin deriyle teması sonucu ortaya çıkan soğukluk ve ıslaklık hisleridir. Bu hisler ise giysi sistemi-çevre havası arasında, giysinin katmanları arasında ve kumaş içerisinde meydana gelen ısı ve kütle transferi mekanizmalarına bağlı olarak ortaya çıkar. Kumaş ve giysilerin termal konfor performanslarının incelenmesi için yapılan çalışmalarda, vücutta meydana gelen fizyolojik değişimlerin yanında bu değişimlere yol açan ısı ve kütle transferi mekanizmalarının da incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, bu konuda uzun yıllardır yapılan teorik ve pratik çalışmalardan bir kısmını inceleyerek çalışmaların hangi doğrultuda ilerlediğini tespit etmektir.

Anahtar Kelimeler: kumaş, giysi sistemi, ısı ve kütle transferi mekanizmaları, termal konfor

## EFFECTS OF HEAT AND MASS TRANSFER MECHANISMS IN TEXTILE MATERIALS ON CLOTHING THERMAL COMFORT

### Abstract

Thermal comfort, which can be defined as 'a pleasant state of physiological, psychological and physical harmony between human body and its environment' is mainly controlled by the sensations of coldness and dampness arising from skin contact with the garment system. These sensations are originated from heat and mass transfer mechanisms occurring between garment system-environment, between clothing layers and within fabric structure. In order to investigate the thermal comfort performances of fabrics and garment systems, besides physiological changes in human body, heat and mass transfer mechanisms ensuring these changes should also be analyzed. The aim of this paper is to examine some of the theoretical and experimental studies about heat and mass transfer mechanisms occurring in fabric and garment systems and determine the direction of these studies.

Keywords: fabric, garment system, heat and mass transfer mechanisms, thermal comfort

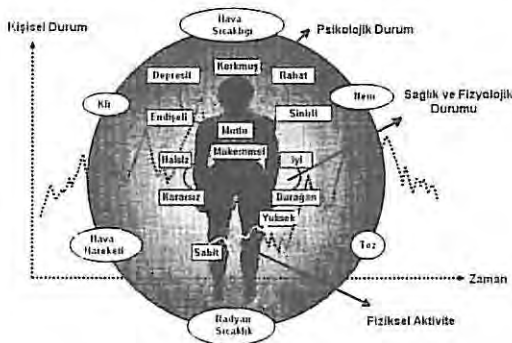
## 1. TERMAL KONFOR

Son yüzyılda yapılan tüketici araştırmaları göstermiştir ki modern tüketiciler giysi ihtiyaçlarını daha dinamik ve rahat olan yeni hayat stilleri doğrultusunda karşılamaktadırlar. Bu şartlar altında konfor, tüm dünya çapındaki tüketiciler için giysi seçiminde en önemli kriterlerden birisi haline gelmiştir (Li, 1998). Konfor birçok fiziksel, psikolojik ve fizyolojik faktörü içeren karmaşık bir kavramdır. Genel olarak konfor, 'vücut ve çevre arasındaki fizyolojik, psikolojik ve fiziksel uyum sonucu ortaya çıkan memnuniyet duygusu' olarak tanımlanabilir (Slater, 1986; Xiaoming, 2001). Birçok araştırmacının ortak fikri, konforun nötr bir his olduğudur. Bir kişinin konforlu sayılabilmesi için hava sıcaklığı, rüzgar hızı, gürültü, ışık, nem gibi çevresel faktörlerle ilgili bir uyarının beyne gönderilmemiş olması gerekir. Bu çevresel faktörlerden herhangi birine, giysilerimiz veya psikolojik durumumuza bağlı olarak hissedilen memnuniyetsizlik duygusu konforu ortadan kaldıracaktır (Kadolph, 1998).

Hatch'e göre (1993), psikolojik ve fizyolojik açıdan konfor aşağıdaki bileşenlere ayrılabilir:

- Termofizyolojik konfor, sıcaklık ve ıslaklık açısından konforun sağlanmasıdır; kumaşa meydana gelen ısı ve kütle transfer mekanizmalarını kapsar.
- Dokunsal konfor, tekstil materyalinin deriyle teması sonucu ortaya çıkan nörolojik algıdır.
- Vücut hareket konforu, giysinin vücut hareketlerine imkan tanınması, vücuda uygulanan basıncı minimuma indirmesidir.
- Estetik konfor, kişinin psikolojisini etkileyen giysi özelliklerinin duyu organlarıyla (göz, kulak, deri vb.) algılanan kısmıdır (Li, 2001).

Kişinin konforunu etkileyen faktörler Şekil 1.1'de şematik olarak gösterilmiştir (Kılınç, 2004).



Şekil 1.1 Kişi konforunu etkileyen temel faktörler (El Mogahzy, 2002)

Konforun en önemli bileşenlerinden biri olan termal konfor, deri yüzeyinde ve alt katmanlarındaki termoreseptörlerden gelen sinyallerin bileşiminden oluşan bir çeşit termoregülasyon sistemi olarak tanımlanabilir. ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) standartlarına göre ise termal konfor, çevrenin termal şartlarına karşı duyulan memnuniyet olarak ifade edilmiştir (Wang, 2002). İnsanın termal konforu çok dar bir sıcaklık aralığında söz konusudur. Eğer vücut kontrol altına alabileceğinden daha fazla ısı üretirse veya belirli bir vücut sıcaklığına yetecek kadar ısı üretilmezse termal konfor ortadan kalkacaktır.

Vücuttaki ısı denge (1) numaralı denklemle ifade edilebilir

$$\begin{aligned} \text{(Searle, 1990):} \\ M - W &= Q_{sk} + Q_{res} \quad (1) \\ &= (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) \end{aligned}$$

Burada,

M = Metabolik enerji üretim miktarı ( $W/m^2$ )

W = Yapılan mekanik iş miktarı ( $W/m^2$ )

$Q_{res}$  = Solunumla kaybedilen toplam ısı miktarı ( $W/m^2$ )

$Q_{sk}$  = Deri yüzeyinden kaybedilen toplam ısı miktarı (iletim, taşınım, radyasyon ve buharlaşma mekanizmaları vasıtasıyla) ( $W/m^2$ )

$C_{res}$  = Solunum esnasında taşınım ile kaybedilen ısı miktarı ( $W/m^2$ )

$E_{res}$  = Solunum esnasında buharlaşmayla kaybedilen ısı miktarı ( $W/m^2$ )

$C + R$  = Deri yüzeyinden meydana gelen hissedilir ısı kaybı ( $W/m^2$ )

$E_{sk}$  = Deri yüzeyinde buharlaşmayla meydana gelen toplam ısı kaybı ( $W/m^2$ ). olarak tanımlanmıştır.

## 2. Nörofizyoloji ve Konfor

Vücudun farklı noktalarıyla devamlı temas halinde olan giysi sistemine bağlı olarak vücutta çok sayıda mekanik, termal, kimyasal ve elektriksel uyarı ortaya çıkar. Bundan dolayı, konfor üzerindeki en etkili parametre, deriye dışarıdan etkiyen farklı uyarıcılar sonucunda ortaya çıkan hisler olarak tanımlanabilen 'dokunma'dır (Wong, 2002). Çevreden vücuda gelen uyarılar, duyu organlarına bağlı reseptörlerle alınır ve uygun kodlara dönüştürülerek merkezi sinir sistemi sinir yolları vasıtasıyla beyne iletilir. Beyin bu uyarıları işler, uyarıya karşı bir algı geliştirir ve kendine has araçlarla eski deneyimlerle karşılaştırmalı bir değerlendirme ortaya koyar (Kılınç, 2004).

Vücut, çevreden gelen sıcaklıkla ilgili uyarıları termoreseptörler vasıtasıyla algılar ve bu algılara bağlı olarak aktif hale gelen biyolojik mekanizmalar tarafından termal denge sağlanır. Hensel

(1981) fizyolojik termoregülasyonu çok sayıda sensör, geri besleme döngüsü ve çıkıştan oluşan karmaşık bir sistem olarak ifade etmiştir. Bu sistemde kontrol değişkeni, birçok sıcaklık değerinin (merkezi sinir sistemi sıcaklığı, vücut merkez sıcaklığı ve deri sıcaklığı) ortak etkisiyle ortaya çıkan bir değerdir. Sıcak ve soğuk reseptörler vasıtasıyla alınan uyarılara bağlı olarak ortaya çıkan terleme gibi ısı uzaklaştırma mekanizmaları veya titreme gibi ısı üretim mekanizmaları farklı referans sıcaklığı değerlerine sahip olabilir. Bu yüzden, termoregülasyonun etkili olmadığı bir termal nörlük noktası mevcuttur (Li, 2001).

Termal konforu etkileyen en önemli hisler soğukluk ve ıslaklıktır. Bu hisler, vücut-giysi sistemi-çevre arasında gerçekleşen çok sayıda karmaşık ısı ve kütle transfer mekanizmasına bağlı olarak ortaya çıkar. Bu yüzden giysilerin termal konfor performanslarının belirlenmesi için bu mekanizmaların incelenmesi gerekmektedir.

### 3. Tekstil Materyallerinde Meydana Gelen Isı ve Kütle Transfer Mekanizmaları

#### 3.1 Tekstil Materyallerinde Meydana Gelen Isı Transfer Mekanizmaları

Vücudun termal dengeye gelebilmesi için vücut-giysi-çevre sisteminde ısı transferi dört farklı mekanizmaya göre gerçekleşir. Tekstil materyalinde hal değişiminin etkin olmadığı durumda gerçekleşen iletim, taşınım ve radyasyon mekanizmaları 'kuru' veya 'hissedilir' ısı transferi olarak adlandırılırlar. Düşük aktivite sırasında vücut yüzeyinden meydana gelen toplam ısı kaybının yaklaşık % 75'i kuru ısı transferiyle gerçekleşir (Holcombe, 1983). Deri - giysi sistemi arasında meydana gelen ısı akışı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Çoğunlukla bir ortamdaki sıcaklık dağılımı hissedilir ısı transferi mekanizmaları ve buharlaşmanın ortak etkileri sonucu ortaya çıkar ve bu yüzden bir mekanizmayı diğerlerinden tamamen ayırabilmek mümkün değildir.



Şekil 3.1 Deri sıcaklığının çevre sıcaklığından yüksek olduğu durumda deri-giysi sistemi arasında meydana gelen ısı akışı (Kılınç, 2004)

Isı transferi mekanizmaları kısaca şöyle açıklanabilir:

**1- İletim (Kondüksiyon):** Bu mekanizmada ısı transferi, madde içerisindeki atom ve moleküllerin enerjilerini komşu atom ve moleküllere aktarması sonucu gerçekleşir. Isı alışveriş oranı iki yüzey arasındaki sıcaklık farkına, transfer doğrultusuna dik yöndeki yüzey alanına ve maddelerin ısı geçirgenliklerine bağlıdır (Saville, 2000).

Örneğin x yönündeki ısı transfer hızı (2) numaralı denklemle aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2)$$

Burada  $Q_x$  pozitif x yönünde A alanı boyunca gerçekleşen ısı transfer oranını, k ise materyalin ısı iletkenliğini gösterir ve materyalin lif içeriğine göre farklılık gösterir.

**2-Taşınım (Konveksiyon):** Bu mekanizmaya göre ısı, katı üzerinde hareket eden bir akışkan (sıvı veya gaz) vasıtasıyla taşınır. Sıvı içerisindeki sıcaklık alanı sıvının hareketinden etkilendiği için buradaki sıcaklık dağılımının ve ısı transfer oranının belirlenmesi karmaşık bir işlemdir.  $T_w$  sıcaklığındaki bir yüzeyle ona temas eden  $T_f$  ortalama sıcaklığına sahip bir akışkan arasındaki ısı transferi (3) numaralı denklemle ifade edilir (Özışık, 1977):

$$q = h(T_f - T_w) \quad (3)$$

Burada h ortamın ısı transfer katsayısıdır.

**3-Radyasyon (Işınım):** Farklı sıcaklıklardaki iki materyal vakumla birbirlerinden ayrıldıklarında aralarında iletim veya taşınım mekanizmalarına dayalı bir ısı transferinin gerçekleşmesi söz konusu değildir. Radyasyon, ısı transferinin elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla gerçekleştiği bir mekanizmadır. Dalgalar, çok az bir kayıpla hava içerisinde geçebilirler, fakat bir nesneye çarptıklarında enerjilerinin büyük bir kısmı ısıya dönüşür. Radyasyon büyük oranda ( $T$  oranında) materyalin sıcaklığına bağlı olduğu için mutlak sıcaklığı çok yüksek olmayan ortamlar için etkisi ihmal edilebilir. Bu mekanizma daha çok güneş, radyan ısıtıcılar ve ateş gibi yüksek sıcaklığa sahip nesnelere ısı kazancı için geçerlidir. (Saville, 2000).

$T_1$  sıcaklığında A alanına sahip siyah bir cismin  $T_2$  sıcaklığında bir ortamda bulunduğu düşünülürse, cisim  $As T_1^4$  oranında radyasyon enerjisi (W) yayarken  $As T_2^4$  oranında enerjiyi (W) de absorblayacaktır. Cismin kaybettiği net radyasyon enerjisi (4) numaralı denklemle ifade edildiği şekilde hesaplanır.

$$Q = As (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

Burada S Stefan-Boltzman sabitidir (Özışık, 1977).

**4- Buharlaşma:** Sıvı suyun su buharı haline gelmesi büyük miktarlarda ısı enerjisi gerektirir. Vücut yüzeyinden suyun buharlaşması için gereken enerji, temasta bulunduğu yüzeyden ve çevresinden alınarak burada soğumaya neden olur. Çevre sıcaklığı vücut yüzey sıcaklığına eriştiğinde, taşınım ve radyasyon vasıtasıyla gerçekleşen ısı kaybı son bulur. Çevre sıcaklığının vücut sıcaklığından yüksek veya eşit olduğu durumlarda ısı vücuttan uzaklaştırılması için tek yol vücudun terlemesi ve oluşan bu terin vücut yüzeyinden buharlaşmasıdır. Buharlaşmayla vücut yüzeyinden uzaklaştırılan enerji (5) numaralı denklemle ifade edilebilir:

$$Q_{EV} = mA(P_S - P_A) \quad (5)$$

Burada  $m$  giysinin geçirgenlik katsayısı,  $A$  yüzey alanı,  $P_s$  vücut sıcaklığındaki kısmi buhar basıncı,  $P_a$  çevre sıcaklığındaki kısmi buhar basıncıdır (Song, 2003).

Tekstil materyallerinin termal konfor performanslarını, sadece kuru ısı transfer davranışları açısından inceleyen çalışmalar mevcuttur. Bu konudaki çalışmalarında Schacher ve arkadaşları (2000), mikropoliester ve klasik poliesterden üretilen kumaşların ısı iletkenliği ve buna bağlı olarak sebep oldukları sıcaklık/soğukluk hislerini inceledikleri çalışmalarında, mikropoliesterden üretilen kumaşın, basınç uygulandığında değişen kumaş temas alanına bağlı olarak veya ortamda bir hava akımının bulunduğu durumda klasik poliesterden üretilen kumaşa göre daha fazla yalıtım sağladığı ve sıcaklık hissi verdiğini gözlemişlerdir. İç çamaşırı kumaşlarının kalınlıkları ve termal dirençleri arasındaki ilişkiyi, yıkamanın etkilerini de göz önünde bulundurarak inceleyen Holcombe ve Hoschke (1983) ise, düşük sıklığa sahip bu kumaş tipinde termal direncin başlıca kumaş kalınlığı tarafından belirlendiğini, lif özellikleri (termal iletkenlik, lif inceliği, paketlenme yoğunluğu) ve kumaş konstrüksiyonunun daha düşük oranlarda etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Yaygın bir çalışma konusu olan sentetik ve doğal liflerin termal konfor performanslarının karşılaştırılmasına yönelik yaptıkları çalışmalarında Frydrych ve arkadaşları (2002), farklı yapısal parametrelere sahip pamuk ve Tencel kumaşların termal özellikleriyle ilgili yaptıkları ölçümlerle hammadde, kumaşın fiziksel parametreleri ve uygulanan farklı bitim işlemlerinin kumaşların termal yalıtım özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta, Tencel iplikten dokunan kumaşın daha düşük termal iletkenlik ve absorpsiyon değerleri verdiği gözlenmiştir. Bu kumaşların termal difüzyon ve direnç değerleri ise daha yüksek olarak ölçülmüştür. Her iki hammadde için de, kumaş örgüsünün termal özellikler üzerindeki etkisi gözlenmiştir.

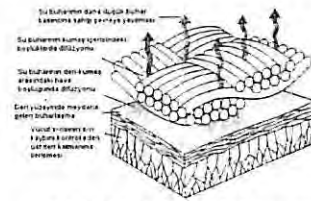
### 3.2 Tekstil Materyallerinde Meydana Gelen Kütle (Sıvı ve Buhar) Transfer Mekanizmaları

Liflerin farklı yapısal formlarda birleştiği gözenekli yapılar olarak tanımlanabilen tekstil materyallerinde kütle transferi, lifler arasındaki boşluklardan gerçekleşir. Mecheels (1971), bir tekstil materyalinden suyun (sıvı veya buhar halinde) geçiş yollarını aşağıdaki gibi özetlemiştir:

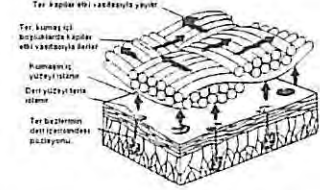
- Lifler arasındaki boşluklara nüfuz etme,
- Absorpsiyon/desorpsiyon mekanizmaları vasıtasıyla lif içerisine nüfuz etme,
- Elyaf/iplikler arasındaki kapiler boşluklarda sıvının transferi,
- Sıvının lif yüzeyinde geçmesi (Wang, 2002).

Konforun sağlanabilmesi için deri yüzeyindeki sıvının mekanik olarak uzaklaştırılması gerekir. Bu, sıvıyı absorblayan lif ve

kumaş sistemlerinin kullanılmasıyla mümkün olur. Bu tür materyaller, ıslak kumaşa vücudun temasından doğan konforsuzluk hissini ortadan kaldırmanın yanında, suyun daha geniş bir kumaş alanına yayılıp daha fazla buharlaşmasına bağlı olarak ısı transferi miktarını da artırır. Kumaşların termal yalıtım, hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği gibi transfer ve geçirgenlik özellikleri özellikle kalınlık ve gözeneklilik olmak üzere direkt olarak geometrilerine bağlıyken, sıvı transfer karakteristikleri büyük oranda lif özelliklerinden etkilenmektedir. Kumaşlardaki sıvı transfer mekanizmaları üzerinde etkili en önemli lif özellikleri ise kapiler kuvvetler ve yüzey özellikleridir. Giysi konforu söz konusu olduğunda kumaşın sıvı transferiyle ilgili en önemli özelliği anlık sıvı emme kapasitesidir (Yoon, 1984). Kumaştan su buharının ve sıvı suyun difüzyonu sırasıyla Şekil 3.2 ve 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Su buharının buhar geçirgen bir kumaştan difüzyonu (Kılınç, 2004)



Şekil 3.3 Sıvının kumaş içerisindeki difüzyonu

Kumaş anizotropik bir yapıya sahip olduğu için farklı yönlerinde farklı sıvı transfer davranışları gösterir ve bu davranışların ayrı ayrı ölçülmesi gerekir. Tekstil materyallerinin ıslanması, lif/hava ara yüzeyinin lif/sıvı ara yüzeyiyle yer değiştirmesi olarak tanımlanır ve ıslanma, kapiler kuvvetlerin etkisiyle sıvının elyaf kütlesi içerisindeki eş zamanlı transferi olarak tanımlanan dikey ilerleme için bir ön şarttır. Karmaşık kapiler boşluklardan oluşan bir sistemde sıvı transferi dikey ilerleme olayı sayılabilir veya bu olaya 'kapiler yayılma' denir (Wang, 2002). Kumaşların absorpsiyon ve ıslanma özelliklerinin belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntemler, bu konuda sınırlı bilgi verebilen 'dikey ıslanma' ve 'gözenekli levha' testleridir. Bu yöntemlerden dikey ıslanma testinde yer çekiminin etkisi, gözenekli levha testinde ise numune üzerine uygulanan basınç miktarı gibi parametreler sonuçların karşılaştırılabilir olmasını önlemektedir. Kumaşın yüzeyi ve kalınlığı yönündeki ıslanmasının incelendiği testler arasındaki korelasyonun düşük olmasına da dayanılarak, kumaş kalınlığı yönündeki ıslanma miktarının kumaş yüzeyi üzerinde gözlenen ıslanma davranışından güvenilir bir şekilde tahminlenemeyeceği sonucu ortaya çıkmıştır. D'Silva ve arkadaşlarının (2000) yaptığı çalışmada ortaya konan metot, 'gözenekli levha' yönteminin geliştirilmesiyle oluşmuştur ve yüksek aktivite sırasında ortaya çıkan ter miktarının simüle edilip, kumaşın absorpsiyon ve ıslanma özellikleriyle ilgili fiziksel parametrelerin objektif ve eş zamanlı olarak ölçülmesine yardımcı olur.

Emilen sıvı ağırlığının değil suyun kumaş üzerindeki yükselme mesafesinin önemli olduğu dikey ıslanmayla ilgili yapılan çalışmalarda (Harnett, 1984; Hsieh, 1992, 1995) suyun çözgü yönündeki yükselme miktarının atkı yönündekine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Araştırmacılar, kumaş içerisindeki boşluk çapının kapiler kuvvetle doğru, suyun yükselme miktarıyla ise ters orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Suyun etkisiyle şişen liflerde, şişme nedeniyle lifler arasındaki kapiler boşluklar azalacağı için materyalin su emme oranında bir azalma görülür (Kim, 2003). Kim ve arkadaşları (2003) yüksek sıvı emme kapasitesine sahip farklı dokuma ve örme kumaşların sıvı emme davranışlarını inceledikleri çalışmalarında ölçümler için Gravimetrik Absorblama Test Sistemi'ni (GATS) kullanmışlardır. Sıvı transferini dinamik olarak eş zamanlı ve hassas bir şekilde incelemeye imkan tanıyan bu sistemle elde ettikleri sonuçlara göre optimum sıvı emme davranışına sahip kumaşların sıklık ve lif inceliği değerleri minimum, kalınlık ve gözenek büyüklüklerinin ise maksimum olması gerekmektedir. Dikey ıslanma testlerinin aksine kumaş kalınlığı boyunca gerçekleşen ıslanmayı ölçen sistemlerin daha gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini belirten araştırmacılar daha önce ortaya konmuş birçok çalışma sonucunun aksine, farklı materyallerden dokunmuş çift katlı kumaşların sıvı emme davranışlarını etkileyen faktörün hammadde değil, kalınlık, sıklık, gözenek büyüklüğü gibi fiziksel özellikler olduğunu iddia etmişlerdir.

Giyisi sistemlerindeki su buharı transferi ise difüzyon (buhar konsantrasyon farkından kaynaklanır) ve taşınım (hava basınç farkına bağlı olarak oluşan hava hareketinden kaynaklanır) olmak üzere iki mekanizma vasıtasıyla gerçekleşir. Gözenekli materyallerde taşınım ısı ve kütle transferi, özellikle yüksek basınç farklarının bulunduğu durumda difüzyonla meydana gelen transferden daha önemlidir. Tekstil materyallerindeki transfer özellikleriyle ilgili çalışmalar çoğunlukla, uygulanmasının kolay oluşu nedeniyle difüzyon mekanizmasının incelendiği metotlar üzerine yoğunlaşmıştır. Fakat bu metotlar, özellikle yüksek hava geçirgenliğine sahip yapılar için hatalı sonuçlara neden olabilir, çünkü küçük bir basınç farkı, gözenekli yapının içerisinden, difüzyonla meydana gelene transferden çok daha fazla oranlarda konvektif akımın oluşmasına neden olur (Gibson, 2000). Su buharı transferini daha kapsamlı bir şekilde ele aldıkları çalışmalarında Gibson ve arkadaşları (2000), konveksiyon/difüzyon test metodunu kullanarak dokuma kumaş ve dokusuz yüzeylerin taşınım ve difüzyona dayalı gaz ve su buharı transfer özelliklerini incelemişlerdir. Bu metot daha önce Gibson ve arkadaşlarının (1995a, 1995b) ortaya koyduğu dinamik sıvı geçirgenlik hücreci (DMPC) prensibine dayanır.

Tekstil materyallerinde sıvı veya buhar halinde suyun transferinin incelendiği çalışmaların bir bölümünde, yapının en küçük birimi olan lifler ile çevre havası arasında gerçekleşen

kütle alışverişi incelenmiştir. Yün liflerinin su buharı absorpsiyon davranışlarını inceledikleri çalışmalarında Downes ve Markay (1958) ve Watt (1960) olayın iki aşamalı bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymuşlardır. Bunlardan birincisinin, hızlı gerçekleşen ve konsantrasyona bağlı olarak denge değerine kadar devam eden ve I. Fick Yasası'na uygun olarak gerçekleşen difüzyon, ikincisinin ise çok daha yavaş gerçekleşen, lif içerisindeki yapısal değişikliklere bağlı olan ve Fick Yasası'na uymayan difüzyon olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılara göre belirtilen aşamaların toplam difüzyon olayındaki payları lifin ilk nem oranı ve absorpsiyonun seviyesine bağlıdır (Wang, 2002). I. Fick Yasası aşağıdaki (6) numaralı denklemle ifade edilebilir (Crank, 1975):

$$Q_w = D_a \frac{DC}{L} \quad (6)$$

Burada,

$Q_w$  : Buhar transfer oranı (kg/m<sup>2</sup>s),

$D_a$  : Su buharı difüzyon katsayısı

$L$  : Kumaş kalınlığı (m)

$DC$  : Buhar konsantrasyon farkıdır.

Wehner (1987), liflerin rutubet sorpsiyonunun kumaş içerisindeki hava boşluklarındaki rutubet akışı üzerindeki etkilerini incelediği çalışmasında iki matematiksel model ortaya koymuştur. Birinci modelde lif içerisindeki difüzyonun hızlı olduğu ve lifin rutubet oranının çevreleyen havayla dengede olduğu kabulünü yapmıştır. Bu durumda sorpsiyon olayındaki etkin kütle transfer direncinin su moleküllerinin havadan lif yüzeyine difüzyonuna karşı etkili olduğunu belirtmiştir. İkinci modelde ise lif sorpsiyon kinetiğinin Fick Yasası'na uygun olarak işlediği ve etkin kütle transfer direncinin suyun lif içerisindeki moleküler difüzyonuna karşı etkili olduğu kabulünü yapmıştır. Bu yüzden lifin rutubet içeriği lif yüzeyindeki havanın rutubet içeriğinden daha yavaş değişim gösterir. Bu modellerde rutubet sorpsiyonu ve bu olaya bağlı olarak ortaya çıkan ısı göz ardı edilmiştir. 1992'de yünlü kumaşlardaki birleşik ısı ve sıvı transferini açıklamak için yaptıkları çalışmada Li ve Holcombe, lifler için daha önce ortaya konan iki aşamalı sorpsiyon kinetiği kurallarını esas alan bir difüzyon modeli geliştirmişlerdir. Daha sonraları bu model iki aşamalı difüzyon olayının uniform bir Fick Difüzyon denklemi ile ifade edilmesiyle daha da geliştirilmiştir. Bu denklem, sistemin dengeye gelmesi için geçen sürenin öncesinde ve sonrasında değişkenlik gösteren bir difüzyon katsayısına sahiptir. Bu geliştirilmiş model hidrofil ve hidrofob yapıdaki tüm lifler için geçerli hale getirilmiştir (Li, 2001). Li ve Luo'nun (2000) farklı lifler üzerinde yaptığı benzer bir simülasyon çalışmasında da higroskopik lifler için iki aşamalı difüzyon olayının geçerli olduğu yönündeki iddia desteklenmiş, daha az higroskopik liflerde ise sabit bir difüzyon katsayısı ile tek aşamalı Fick Difüzyonu'nun geçerli olduğu belirtilmiştir.

Lif ile çevreleyen hava arasındaki rutubet alışverişini inceleyen araştırmacılar Lyons ve Vollers'a göre (1971) bu olay, rutubetin sıvı halde lif yüzeyinde bulunmasına veya buhar halinde iç kısımlarda depolanmasına göre farklılık gösteren karmaşık bir olaydır ve bu olayın anlaşılabilmesi için kumaşların kuruma davranışlarının incelenmesi gerekir. David ve Nordon (1969) ve Farnworth (1986) ise, liflerin sıvı içeriğindeki değişim oranı ile hava ve lifin bağıl nem oranları arasındaki ilişkileri incelemiştir (Li, 2001). King ve Cassie (1939, 1940), MacMahon ve Watt (1965, 1966), Crank (1975), yün lifinin su buharı ve sıvı absorpsiyonu ve bu olay sonucunda meydana gelen ısı alışverişleriyle ilgili çalışmalar yapmışlardır. Tekstil materyalinin ortam atmosferiyle dengeye gelmesi için geçen süre, absorpsiyon kapasitesi ve bu özelliklerin bağlı olduğu parametrelerle ilgili sonuçlar ortaya koymuşlardır. Henry (1939, 1948), Shirley Enstitüsü'nde benzer bir çalışmayı pamuk balyaları üzerinde gerçekleştirmiştir (Li, 2000).

Barnes ve Holcombe (1996) giyim sırasında oluşan terin vücuttan uzaklaştırılması işlemi simüle etmek üzere farklı özellikteki kumaşlar üzerinde yaptıkları çalışmada bir teorik model ortaya koymuşlar ve tasarladıkları sistem vasıtasıyla modelin doğruluğunu kontrol etmişlerdir.

Tekstil materyalinde meydana gelen kütle transferi mekanizmalarının ayrıntılı olarak incelenmesinin yanında, bu mekanizmalara bağlı olarak giyim sırasında ortaya çıkan hisler ve bu hislerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Deri sıcaklığı düştüğünde ve terleme azaldığında, deri yüzeyinden meydana gelen ısı kaybının sınırlandırılması gerekmektedir. Islak kumaşlarda termal yalıtım azaldığı için iletimle gerçekleşen ısı kaybını azaltmak mümkün olmayabilir. Bu konuda çalışan araştırmacılar, vücut yüzeyindeki sıvının uzaklaştırılmasına gerek olmadığını, sadece belirli bir sıcaklıkta tutulması gerektiğini savunmuşlardır. Deride meydana gelen termoregülasyon olayı dinamik bir yapıya sahiptir ve termofizyolojik konforu sağlamanın en etkili yolu, yüksek ısı direncine sahip kumaşlar yerine 'dinamik' kumaşlar kullanmaktır. 'Dinamik' kumaş, sıcak ve nemli vücut üzerinde düşük bir ısı yalıtımına sahipken vücut soğuyup kurudukça yalıtım değerinin artırılabilir kumaştır. Tipik 'dinamik' kumaşlar, sadece deri yüzeyindeki sıvıyı absorblamakla kalmaz, aynı zamanda deriyi ve deriye temas eden kumaş katmanını devamlı kuru bırakacak şekilde sıvıyı transfer edebilen bir yapıya, yani yüksek ısılanma yeteneğine sahiptir. 'Dinamik' olmayan bir kumaş sisteminde ise, absorblanan sıvı kumaş içerisinde birikir ve sistemin ısı direnci kumaş ıslandıktan sonra hep minimumunda ve sabit kalır. Isı direncindeki bu düşüş oranı, suyun kumaş yapısındaki yerine ve yerleşimine göre değişir (Brownless, 1996). Brownless ve arkadaşları (1996) havlı kumaşlarda sıvı sorpsiyonunun kumaşın termal direnci üzerindeki etkilerini de kumaş yapısını basitleştirerek ortaya koydukları model ve yaptıkları hassas fiziksel ve fizyolojik ölçümler vasıtasıyla incelemiştirler.

Bu konudaki çalışmada Hollies (1977), yaptığı subjektif giyim denemeleri sırasında kişilerin konforsuzluk hissettikleri rutubet oranlarını belirlemiştir. Sonuçta, lifler ve iplikler arasındaki kapiler boşlukları dolduracak miktarda sıvı biriktikten sonra başlayan bir olay olan ıslanmanın, konforsuzluk hissini başlattığı rutubet oranından (yaklaşık % 4) oldukça yüksek rutubet değerlerinde gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Bu konuyla ilgili yapılan diğer çalışmalarda (Spencer-Smith, 1977; Goldstein, 1980), bu değer kumaşın kendi ağırlığından kaynaklanan basınç altında % 23-122 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Adler ve Walsh, 1984). Benzer bir çalışma sonucunda Li ve arkadaşları (1993, 1995), ortaya koydukları matematiksel model ve yaptıkları fizyolojik ölçümler sonucunda subjektif ıslaklık hissini oluşturulan matematiksel modelle de tahminlenebilen deri sıcaklık düşüşünün bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir (Wang, 2002).

Giyim konforunu temel olarak polyester, pamuk ve polyester/pamuk karışımı kumaşların termal transfer özelliklerini, yaptıkları objektif ve subjektif ölçümler vasıtasıyla inceledikleri çalışmalarında Yoon ve Buckley (1984), % 50/50 polyester/pamuk karışımı kumaşın sıvı transferi açısından % 100 pamuklu kumaşa yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, pamuğun konfor açısından sahip olduğu avantajın iplik içerisindeki lif paketlenmesine bağlı olduğunu belirterek buhar halindeki suyun geçirgenliği söz konusu olduğunda, 'nefes alabilir' yapıların sadece pamukla özdeşleştirilmesinin doğru olmadığını

iddia etmişlerdir. Long (1999) da farklı hammadde ve yapısal özelliklere sahip çift katlı örme kumaşlar üzerinde yaptığı deneyler sonucunda Yoon ve Buckley'in iddiasını destekleyen sonuçlar ortaya koymuştur. Araştırmacı ayrıca, çift katlı kumaşlarda kumaşın deriye yakın birinci katmanının hidrofob, ikinci katmanın ise hidrofil bir liften oluştuğu durumda maksimum kuruluk ve konforun elde edildiğini belirtmiştir. Bunun nedeni olarak da hidrofob lifin teri kapiler ıslanma hareketi ile dış katmana iletmesi, dış katmanın ise daha geniş bir ıslak bölge alanı oluşturarak daha hızlı buharlaşma sağlamasını göstermiştir. Benzer bir çalışmada Li ve Luo (2000), farklı kumaşlar için hava rutubetinin kumaşa difüzyonunun hızlı, liflere difüzyonunun ise, birleşik ısı ve sıvı transfer mekanizmaları etkin olduğu için, daha yavaş bir olay olduğunu belirtmişlerdir.

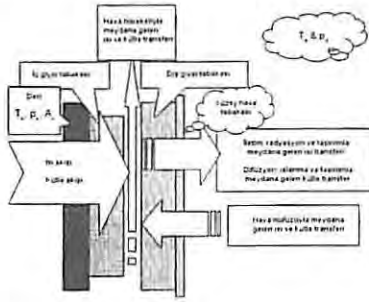
Adler ve Walsh'un (1984) çalışmalarında ise pamuklu, polyester ve karışım dokuma ve örme kumaşlar arasındaki sıvı transferinin başlaması için gereken rutubet oranları belirlenmiştir. Yapılan fiziksel ölçümler, daha önce yapılan birçok çalışmadan farklı olarak gerçek giyim şartlarında ortaya çıkan sıvı, atmosferik şartlar, vücut pozisyon ve hareketleriyle ilgili değişimleri içeren dinamik ortamlarda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hidrofilik bitim işleminin polyester kumaşın ıslanma davranışı üzerindeki etkileri de incelenmiş ve bu işlemin yüksek nem oranlarında ıslanmayı artırdığı gözlenmiştir. Bu işlemin, kumaş yüzeyine uygulandığı, liflerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirmediği için difüzyon ve absorpsiyon kapasitesi üzerinde çok küçük, ıslanma davranışları üzerinde ise büyük oranda etkili olduğu belirtilmiştir. Benzer bir çalışmada Hes (1999) polyester, pamuk ve polyester/pamuk karışım kumaşlardan üretilmiş gömleklerin ani ıslanma davranışlarını incelediği çalışmada gömleklerin termal temas konforlarının açıklanabilmesi için 'sıvı absorbtivitesi' olarak adlandırılan yeni bir parametre tanımlanmış ve kumaş-deri arasındaki sıvı transferini ifade eden basit bir denklem ortaya koymuştur. Kumaşların sıvı absorbtivitesini indirekt olarak ölçmeye yarayan bir metodun da tanımlandığı ve ölçümlerin subjektif giyim denemeleriyle karşılaştırıldığı çalışma sonucunda, % 25-40 oranında klasik polyester içeren polyester/pamuk gömleklerin % 100 pamuklu gömlekle benzer, hatta daha yüksek su buharı geçirgenliğine sahip olduğu, kuru halde daha fazla 'sıcaklık hissi' verdiği ve çok düşük bir farkla daha düşük sıvı absorpsiyonu özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Dahası, modifiye edilmiş özel polyester liflerinin kullanılmasıyla termal konforun daha da artırılabilirliği düşünülmektedir.

Ren ve Ruckman (2004) su geçirmez üç katlı kumaş yapılarının sıvı absorpsiyon davranışlarını, yoğunlaşmanın söz konusu olduğu durumlar için daha önceden ortaya konan ısı ve kütle transferi teorileri ışığında incelemiştir. Çalışmada incelenen çok katlı yapı için sınır şartları belirlenmiş, kumaşın bazı fiziksel özelliklerinin değiştirilmesiyle (su geçirmez zarın kalınlığının veya dış kumaş katmanının inceltilmesi, dış katman veya zar tabakasının ortalama difüzyon katsayısının artırılması, vb.) kumaşın dış kısmındaki su buharı transferinin artırılabilirliği ve kumaş içerisindeki yoğunlaşmanın azaltılabilirliği belirtilmiştir.

### 3.3 Tekstil Materyallerinde Meydana Gelen Birleşik Isı ve Kütle Transfer Mekanizmaları

Gözenekli yapıdaki ısı transferi, yapı içerisindeki katı kısım, yani lifler vasıtasıyla iletim, büyük sıcaklık farklarından kaynaklanan radyasyon ve gözenekli materyale havanın nüfuzu sonucu ortaya çıkan taşınım mekanizmalarıyla gerçekleşir. Bunların yanında sıvı transferi, hava boşluklarındaki buhar difüzyonu, lif içine sıvı difüzyonu (sorption/desorpsiyon), lif yüzeyindeki yoğunlaşma/buharlaşma ve kumaş içerisinde kapiler etkilerle sıvının transferini kapsar. Sıvı sorpsiyon/desorpsiyonu ve yoğunlaşma/buharlaşma olayları sırasında alınan ve ortaya çıkan ısı nedeniyle ısı ve sıvı transfer olaylarının birlikte ele alınması gerekmektedir (Wang, 2002). Tekstil materyallerinde meydana gelen ısı ve kütle transferi mekanizmalarının termal konfor üzerindeki etkilerine bakıldığında ise, kumaşa dokunulduğunda hissedilen soğukluk ve ıslaklık algılarının nöropsikolojik mekanizmalarıyla ilgili yapılan bir dizi psikofiziksel deneme ve nümerik simülasyon (Shitzer ve Chato, 1985; Jones ve ark., 1990) sonucunda, bu mekanizmaların birbirleriyle ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır. Yani, termal konfor üzerindeki etkili subjektif algıların açıklanabilmesi için de su buharı ve sıvı transferinin ısı transferiyle birlikte ele

alınması gerektiği belirtilmiştir (Gretton ve ark., 1996; Matsudaira ve Kondo, 1996) (Suprun, 2003). Bu konuda çok sayıda deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Geliştirilen farklı ölçüm sistemleri ile ısı ve kütle transferi mekanizmalarında etkili olayların mümkün olduğunca hassas bir şekilde ölçümünün yapılması ve ortaya konan matematiksel modellerle gerçeğe yakın tahminlerin yapılması yukarıda değinilen çalışmaların ana konusudur. Geliştirilen bu modellerin çözümünde, ısı ve kütle transferi koronumu kanunu gözenekli materyallerdeki absorpsiyon kinetiği kurallarıyla birleştirilmiş, modellerin doğrulanması için gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Şekil 3.4'te giysi sisteminde meydana gelen ısı ve kütle transferi şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde  $P_a$  ve  $P_s$  sırasıyla çevre havasının ve deri yüzeyinin su buharı basıncını,  $T_a$  ve  $T_s$  sırasıyla çevre havasının ortalama sıcaklığını ve alansal olarak ağırlıklandırılmış ortalama deri yüzey sıcaklığını gösterirken  $A_s$  ise toplam vücut alanını temsil etmektedir.



Şekil 3.4 Giysi sisteminde meydana gelen ısı ve kütle transferi (Qian, 2005)

Tekstil materyallerinde meydana gelen transfer mekanizmalarıyla ilgili hal değişimlerini (sorpsiyon/desorpsiyon, buharlaşma/yoğunlaşma) de göz önünde bulunduran çok sayıda matematiksel model geliştirilmiştir. Bunlar kısaca şöyle özetlenebilir (Wang, 2002):

- **Tek Boyutlu (1D) Kısmi Diferansiyel Denklemlere Dayalı Modeller (PDEs):** Bu modellerde değişken ısı ve sıvı transfer olayları için kısmi diferansiyel denklemleri kütle ve enerjinin korunumu kanunları ile 1. Fick Yasası'na bağlı olarak çıkartılmıştır. Ayrıca Fourier'in ısı iletimi için ortaya koyduğu yasa da değişken transfer durumlarına uyarlanmıştır.

- **Direnç Ağlarına Bağlı Olarak Geliştirilen Modeller:** Bu modellerde, deri-giysi ve giysi katmanları arasındaki hava tabakaları, ısı ve kütle transferine karşı seri bağlı dirençler şeklinde düşünülmüştür. Bu kabul, Farnworth'un (1983) çok katlı yapılar için ortaya koyduğu birleşik ısı ve su buharı transferi sayısal modelinin teorik temelini oluşturmuştur. Her katman için ısı ve kütle dengesini gösteren denklemler verilmiştir.

- **İki ve Üç Boyutlu Modeller:** Isı ve sıvı transferiyle ilgili iki veya üç boyutlu modellerin geliştirilmesinde, tekstil materyalinin iç yapısındaki karmaşıklık nedeniyle bazı zorluklar vardır. Bunlar, gözenekli materyallerin geometrik yapılarının ve fiziksel özelliklerinin matematiksel olarak tanımlanması ve birleşik ısı ve sıvı transferinin fiziksel mekanizmalarının kumaş ve lif düzeyinde matematiksel olarak ifade edilmesi olarak sıralanabilir.

Wang'a göre (2002), bahsedilen transfer modellerinin her birinin kendilerine göre aşağıda sıralanan sınırlamaları vardır:

- Tek boyutlu PDE modellerinde gözenekli yapılarda birbirleriyle

etkileşim halindeki karmaşık ısı ve sıvı transfer olayları birleştirilmemiştir. Bu olaylarla (sorpsiyon/desorpsiyon, yoğunlaşma/buharlaşma, sıvının kapiler transferi, termal radyasyon) ilgili matematiksel ifadeler ayrı ayrı türetilmiştir.

- **Direnç ağı modellerinde transfer mekanizmalarının her birinin izotropik olan katmanlarda gerçekleştiği kabulü ile kumaş katmanının içerisinde ve katmanlardaki lifler içerisindeki dinamik ısı ve sıvı transfer olayları açıklanamaz.**

- **Birden fazla boyutlu modeller ise birleşik ısı ve sıvı transfer etkisini ve bunlara bağlı diğer dinamik ısı ve sıvı transfer olaylarını ihmal eder.**

Sonuçta, ısı direnç esasına dayanan modeller sadece kumaş düzeyinde doğru sonuçlar verebilir. Kumaş ve liflerin dinamik durumları bu modellerle açıklanamaz. İki ve üç boyutlu modellerin ise gerçeğe daha yakın sonuçlar vermeleri beklenirken, bunlar da lif ve kumaşta meydana gelen çok fazlı karmaşık dinamik birleşik ısı ve sıvı akışlarını tam olarak açıklayamazlar.

Tekstil materyallerinin ve giysilerin termal fonksiyonları ve konforlarıyla ilgili teorik ve deneysel veriler ışığında tasarım ve geliştirmeler yapmak amacıyla farklı şartlar ve farklı özellikteki tek ve çok katlı kumaş ve giysi sistemleri için ortaya koyduğu modellerden oluşan kapsamlı çalışmasında Wang (2002) öncelikle, soğukluk ve ıslaklık algılarının nöropsikolojik mekanizmalarıyla ilgili psikofiziksel deneyler ve nümerik simülasyonlar yapmış ve bu mekanizmaların birbirleriyle ilişkilerini incelemiştir. Aşama aşama geliştirdiği modellerinde araştırmacı, öncelikle tekstil materyallerinin izotropik yapıda olduğu kabulüyle radyasyon ve iletimle meydana gelen ısı transferi, kapiler sıvı hareketi, sıvı sorpsiyonu ve yoğunlaşma gibi çoklu olayların etkilerini göz önünde bulundurarak temel bir model ortaya koymuştur. Bu modelde sıvı hareketinin yavaşlığı ve lif boyutlarının küçük olması nedeniyle farklı sıvı fazları arasında bir denge bulunduğu, liflerin radyasyon mekanizması vasıtasıyla ısıyı yaymadığı, lif yüzeyinin ve çevre havasının nem oranları arasında bir denge bulunduğu kabullerini yapmış; liflerin sıvı emilimi nedeniyle şişmelerini, materyale etkileyen eylemsizlik kuvvetini ve zorlanmış taşınımına neden olan parametreleri ihmal etmiştir. Daha sonra bu modeli çok katlı anizotropik yapıdaki sistemlere uygun olarak modifiye etmiş, bu model sayesinde farklı materyallerden üretilmiş karmaşık yapısal özelliklere sahip çok katlı yapılarda meydana gelen transfer olaylarının daha kapsamlı bir şekilde analizinin ve fonksiyonel özelliklerin daha yüksek oranda yansıtılmasının mümkün olduğunu belirtmiştir. Kumaşlar bazında ortaya koyduğu modellerde; su buharı difüzyonu, iletim ve radyasyonla ısı transferi, sıvı absorpsiyon/desorpsiyonu ve buharlaşma/yoğunlaşma gibi hal değiştirme olayları, farklı higroskopik ve ıslanma yeteneklerine sahip liflerde meydana gelen kapiler sıvı transfer mekanizmaları, kumaş yüzeyine bağlanmış su geçirmez tabakalar ve kumaş katmanlarının temas durumları gibi birbirleriyle etkileşim halindeki birçok parametre göz önünde bulundurulmuştur. Modeller, hassasiyetle yapılmış fiziksel deneme sonuçlarıyla uyum göstermiş ve buna dayanılarak yapılan hesaplamalarda su buharı transferinin farklı şekilleri arasındaki ilişkiler ile ısı ve kütle transferi olaylarının birbirleri üzerindeki etkileri daha ayrıntılı bir şekilde tanımlanmıştır. Daha önceden ortaya konan dinamik birleşik ısı ve sıvı transferi modellerini kontrol edip geliştiren araştırmacılardan Li ve Zhu (2003) ve Dent (2001) sırasıyla, gözenekli tekstil yapılarındaki sıvı difüzyonu olayının ve terlemenin başlangıcından itibaren ortaya çıkan mekanizmaların ayrıntılı analizlerini yaparak ortaya koydukları kapsamlı modeller ve fiziksel ölçümlerle gerçek giyim şartlarını büyük oranda simüle edebildiklerini belirtmişlerdir.

Fohr ve arkadaşları (2002) da ısı ve kütle transferinde etkili parametreleri kapsamlı bir şekilde ele alarak ortaya koydukları tek boyutlu dinamik modelin doğruluğunun kontrolünü daha önce bu konuda yapılan deneysel çalışmalar vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir. Tasarladığı termal manken sistemi vasıtasıyla vücut hareketleri ve rüzgarın termal konfor üzerindeki etkilerini araştırdığı çalışmasında Qian (2005), etkili en önemli parametreler olarak termal yalıtım ve su buharı direncini izotropik ve anizotropik şartlar için tahminlemeye yönelik modeller ortaya koymuştur. Modellerin yanı sıra tasarlanan termal manken sistemiyle de modellerin doğruluğu kontrol edilmiştir.

Tek ve çok katlı kumaş sistemlerinin yanında tüm vücudu ve giysi sistemini ele alan termoregülasyon modelleri de uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir konudur (Mitchell, 1972; Hensel, 1973; Gagge, 1977; Wenner, 1977; Hayward, 1977; Stolwijk, 1977; Li, 1998). Kumaştan yola çıkılarak giysi sisteminin ve vücudun fizyolojik tepkilerinin de göz önünde bulundurulduğu bu çalışmalar, ısı ve kütle transferiyle ilgili yapılan çalışmalar içerisinde, termal konforla ilgili daha kapsamlı ve gerçeğe yakın sonuçlar verdiği için bir ileri aşama olarak kabul edilebilir (Li, 2001). Vücudun farklı sayıda bölümlerden oluştuğunu kabul eden tek ve çok boyutlu bu tür modellerle ilgili çalışmalar son yıllarda vücudun daha fazla bölüme ayrılması, fizyolojik vücut kontrol mekanizmasının bağımsız olarak kabul edilmesi, ek giysi düğüm noktaları ve farklı çevre şartları için taşınım ve radyasyonla meydana gelen ısı kayıplarının daha hassas bir şekilde hesaplanması yönünde ilerlemektedir (Wang, 2002).

Bu konudaki temel çalışmalardan biri olarak kabul edilen Gagge ve arkadaşlarının (1971) ortaya koyduğu iki düğümlü termoregülasyon modelinde vücudun, merkez ve deri olarak iç içe geçmiş iki katmandan oluştuğu kabul edilmiştir. Deri, msk kütlelerine sahip ince bir katman olarak, vücudun iç kısmı ise mcv kütlelerine sahip merkezi bir çekirdekle temsil edilmiştir. Vücudun toplam kütlesi (m), bu iki kütle değerinin toplamına eşittir (Li, 2001).

Kumaşlar için ortaya koyduğu transfer modellerini geliştirdiği çalışmasında Wang (2002), Gagge'in iki-düğümlü modelinden yola çıkarak tek boyutlu bir simülasyon modeli ortaya koymuştur. Bu model vasıtasıyla hem giysi sisteminin dinamik fiziksel durumunu hem de vücudun dinamik termal fizyolojisini açıklayıp termoregülasyona etki eden mekanizmalar hakkında bilgi vermiştir. Bu modelde daha önce izotropik kumaş sistemleri için çıkartılan kütle ve enerji korunum denklemlerinden de yararlanılmıştır. Simülasyon çalışmalarının sonucuna göre, aynı çevresel şartlar ve fizyolojik aktivite seviyesinde bile farklı ısı ve su buharı transfer özelliklerine sahip tekstil materyallerinin termal regülasyon karakteristiklerinin önemli oranda farklılıklar gösterdiği belirtilmiştir. Wang'a göre, daha önceden geliştirilen simülasyon ve modellerde vücudun fizyolojik tepkileri üzerinde yoğunlaşıldığı, giysi sisteminde meydana gelen dinamik ısı ve kütle transferi yeterince ayrıntılı bir şekilde ele alınmadığı için, ortaya koyduğu model özellikle bu olayların önem kazandığı fonksiyonel giysiler için önemlidir. Ortaya koyduğu tüm modellerin doğruluğunu kumaşlar üzerinde yaptığı fiziksel ölçümler ve subjektif giyim denemeleri ile kontrol eden Wang, bu tür çalışmalarda genellikle karşılaşılan bir problem olarak lif düzeyindeki ölçümlerin zorluğundan bahsetmiştir. Çünkü ölçümler

sırasında lif üzerinden ölçüm alınması için yapılan bir müdahale, kumaşların sıvı sorpsiyon davranışlarında ölçüm hatalarına neden olabilmektedir. Bu konuda bazı kabuller yapılarak materyale temas etmeden ölçüm yapan infrared ölçüm sistemleri kullanılmıştır.

Tekstil materyallerinde meydana gelen ısı ve kütle transfer mekanizmalarını objektif ve subjektif ölçümler vasıtasıyla inceledikleri çalışmalarında De Dear ve arkadaşları (1989), ortam havasının bağıl nem değerindeki değişimin termal konfor üzerindeki etkilerini termal manken ve giyim denemeleri ile elde ettikleri sonuçlar vasıtasıyla incelemişlerdir. Çalışmada, bağıl nem değişimlerine bağlı olarak farklı liflerden üretilmiş giysilerin absorpsiyon/desorpsiyonu ile meydana gelen ısı değişimlerinin kişinin ısı dengesi üzerindeki etkileri konusunda sonuçlar ortaya konmuştur (Li, 2001).

### 3.3.1 Isı ve Sıvı Transferinin Birleşik Etkileri

#### *Isı Transferi ve Sıvı Difüzyonu*

Sıvı difüzyonu ısı transferi üzerinde önemli ölçüde etkilidir. Sıvı kumaş içerisinde yayıldıkça ve boşlukları doldurdukça iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı kumaşın termal iletkenliğindeki artışa bağlı olarak önemli ölçüde düşer. Bu durum, giysilerimiz ıslanmış durumda üşümemizin sebebinin açıklar ve giysi tasarımı sırasında sıvı suyun difüzyonunun önlenmesi için de bir gerektirir.

#### *Isı Transferi ve Buhar Difüzyonu*

Sıvı suyun difüzyonu ve kumaştaki boşlukların büyük kısmını doldurması ile buharın, sıvının varlığından dolayı doygunluğa ulaştığı kabul edilir. Bu durumda buhar konsantrasyonu sıcaklığın bir fonksiyonu olan doymuş buhar konsantrasyonu olarak kabul edilir. Kumaş içerisinde sıvının bulunmadığı veya çok az bulunduğu durumda ise buhar difüzyonu sıvının lifler tarafından sorpsiyonunun belirgin olduğu ilk aşama dışında başlıca rutubet konsantrasyon farkı tarafından belirlenir.

#### *Isı Transferi ve Rutubet Sorpsiyonu*

Liflerin sıvı içeriği, sırasıyla sıcaklık ve buhar konsantrasyon farkları tarafından belirlenen bağıl nemin dağılımına büyük oranda bağlıdır. Çünkü lifin rutubet sorpsiyon miktarı, lif yüzeyindeki sıvıya, o da çevreleyen havanın bağıl nem değerine bağlıdır. Bu sorpsiyon olayı, iç yüzeyden orta kısma doğru kumaş sıcaklığında bir artışa neden olur ve bu da dış yüzeye yansarak buradaki sıcaklık düşüşünü azaltır.

#### *Isı Transferi ve Yoğuşma:*

Buharlaştırma ve yoğuşma olayları kumaşın sıcaklık dağılımına bağlıdır. Belirli bir noktada sıcaklık çığ noktası sıcaklığının altına düşerse orada yoğuşma görülür. Bu sıcaklığın üzerine çıkarsa da buharlaşma görülür. Sıvıyla direkt temas bulunmadığı durumda su buharı transferi sırasında yoğuşma, sıcaklığın çığ noktası sıcaklığının altına düşmesi nedeniyle öncelikle dış yüzeyde gerçekleşir. Sıvıyla direkt temas ve sıvı difüzyonu durumunda ise, ilk dakikalarda yoğuşma sadece dış katmanlarda gözlenir, çünkü bu periyotta sıvı su dış katmana henüz ulaşmamıştır. Bu durumda yoğuşmaya bağlı olarak vücuttan olan ısı kaybı hızla artar ve kumaş sıcaklığı düşer. Bu yüzden ısı transferi mekanizmasının yoğuşma/buharlaştırma olayları üzerinde önemli oranda etkili olduğu belirtilebilir (Wang, 2002).



## 4. Sonuç

Bu makalede, giysi sisteminde meydana gelen ısı ve kütle transfer mekanizmalarının giysi termal konforu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılan teorik ve deneysel çalışmaların bir kısmı incelenmiştir. Tekstil materyalinin karmaşık anizotropik yapısı nedeniyle, meydana gelen ısı ve kütle transfer olaylarını modeller vasıtasıyla tahminlemek veya materyaller üzerinde hassas ölçümler yapmak oldukça güçtür. Bu konuda uzun yıllardır çok sayıda araştırmacı, etkili tüm parametreleri mümkün olduğunca göz önünde bulundurarak tek ve çok boyutlu matematiksel modeller ortaya koymuşlardır. Bu modellerin doğruluğu, tasarlanan ölçüm cihazları/sistemleri veya kişiler üzerinde yapılan giyim denemeleri vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Çok boyutlu modellerin, beklenenin aksine karmaşık tekstil yapılarında meydana gelen transfer olaylarını ifade etmede iyi sonuçlar vermediği gözlenmiş ve son yıllarda çalışmalar, objektif ölçümlerle doğruluğu kontrol edilebilen tek boyutlu modeller ve vücutta meydana gelen fizyolojik değişimleri de göz önünde bulunduran termoregülasyon modelleri üzerinde yoğunlaşmıştır.

### KAYNAKLAR

- Adler, M. M., Walsh, W. K., Mayıs 1984. Mechanisms of Transient Moisture Transport Between Fabrics, TRJ, s. 334-342.
- Barnes, J.C., Holcombe B.V., Aralık 1996. Moisture Sorption and Transport in Clothing During Wear, TRJ, 66 (12), s. 777-786.
- Brownless, N.J., Anand, S.C., Holmes, D.A., Rowe, T., 1996. The Dynamics of Moisture Transportation Part I: The Effect of 'Wicking' on the Thermal Resistance of Single and Multi-Layer Fabric Systems, JTI, 87, Bölüm:1, No:1, s. 172-182.
- Dent, R. W., 2001. Transient Comfort Phenomena Due to Sweating, TRJ, 71 (9), s. 796-806.
- D'Silva, A.P., Greenwood, C., Anand, S.C., Holmes, D.H., Whatmough, N., 2000. Concurrent Determination of Absorption and Wickability of Fabrics: A New Test Method, JTI, 91, Bölüm I, No:3, s. 383-396.
- Fohr, J.P., Couton, D., Treguier, G., 2002. Dynamic Heat and Water Transfer Through Layered Fabrics, TRJ, 72 (1), s. 1-12.
- Frydrych, I., Dziworska, G., Bilska, J., Kasım/Aralık-2002. Comparative Analysis of the Thermal Insulation Properties of Fabrics Made of Natural and Man-Made Cellulose Fibres, Fibres and Textiles in Eastern Europe, s. 40-44.
- Gibson, P., Rivin, D., Kendrick, C., 2000. Convection/Diffusion Test Method for Porous Textiles, IJCST, Sayı:12, No:2, s. 96-113.
- Hes, L., 1999. Optimisation of Shirt Fabrics' Composition from the Point of View of Their Appearance and Thermal Comfort, IJCST, Sayı:11, No: 2/3, s. 105-115.
- Holcombe, B.V., Hoschke, B.N., Haziran 1983. Dry Heat Transfer Characteristics of Underwear Fabrics, TRJ, s. 368-374.
- Kadelph, S. J., 1998. Quality Assurance for Textiles and Apparel, IOWA State University, Fairchild Publications, 581 sayfa, New York, USA.
- Kılınc, F. S., Mayıs-2004. A Study of Nature of Fabric Comfort: Design-Oriented Fabric Comfort Model, Doktora Tezi, Auburn University, Auburn, Alabama.
- Kim, S.H., Lee, J.H., Lim, D.Y., 2003. Dependence of Sorption Properties of Fibrous Assemblies on Their Fabrication and Material Characteristics, TRJ, 73(5), s. 455-460.
- Li, Y., Luo, Z.X., 2000. Physical Mechanisms of Moisture Diffusion into

- Hygroscopic Fabrics During Humidity Transients, JTI, No: 2, s. 302-316.
- Li, Y., 2001. The Science of Clothing Comfort, Textile Institute Publications, Textile Progress, Volume: 31, Number: 1/2, 138 s., UK.
- Li, Y., Zhu, Q., 2003. Simultaneous Heat and Moisture Transfer with Moisture Sorption, Condensation and Capillary Liquid Diffusion in Porous Textiles, TRJ, 73 (6), s. 515-524.
- Long, Hai-Ru, 1999. Water Transfer Properties of Two-Layer Weft Knitted Fabric, IJCST, Sayı: 11, No: 4, s. 198-205.
- Özışık, N., 1977. Basic Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, USA.
- Qian, X., Nisan-2005. Prediction of Clothing Thermal Insulation and Moisture Vapour Resistance, Doktora Tezi, The Hong Kong Polytechnic University, Institute of Textiles and Clothing, Hong Kong.
- Ren, Y. J., Ruckman, 2004. J. E., Condensation in Three-layer Waterproof Breathable Fabrics for Clothing, International Journal of Clothing Science and Technology, Sayı: 16, No:3, 2004, s. 335-347.
- Saville, B. P., 2000. Physical Testing of Textiles, The Textile Institute Publications, 310 s., England.
- Schacher, L., Adolphe, D.C., Drean, J.Y., 2000. Comparison Between Thermal Insulation and Thermal Properties of Classical and Microfibres Polyester Fabrics, IJCST, Sayı: 12, No:2, s. 84-95.
- Searle, C. M., 1990. Evaluation of the Comfort Properties of Selected Lingerie Fabrics, Doktora Tezi, Kansas State University, College of Human Ecology, Manhattan, Kansas.
- Slater K., 1993. Physical Testing and Quality Control, The Textile Institute Publications, Textile Progress, Sayı: 23, No: 1/2/3, 171 sayfa, England.
- Song, C. Y., 2003. The Development of a Perspiring Fabric Manikin for the Evaluation of Clothing Thermal Comfort, Doktora Tezi, The Hong Kong Polytechnic University, Institute of Textiles and Clothing, Hong Kong.
- Suprun, N., 2003. Dynamics of Moisture Vapour and Liquid Water Transfer Through Composite Textile Structures, International Journal of Clothing Science and Technology, Sayı: 15, No: 3/4, s. 218-223.
- Wang, Z. W., 2002. Heat and Moisture Transfer and Clothing Thermal Comfort, Doktora Tezi, The Hong Kong Polytechnic University, Institute of Textiles and Clothing, Hong Kong.
- Wang, Z., Li, Y., Kowk, Y.L., 2002. Mathematical Simulation of the Perception of Fabric Thermal and Moisture Sensations, TRJ, 72 (4), s. 327-334.
- Wong, A. S. W., Mayıs 2002. Prediction of Clothing Sensory Comfort Using Neural Networks and Fuzzy Logic, Doktora Tezi, Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
- Yoon, H. N., Buckley, A., Mayıs 1984. Improved Comfort Polyester Part I: Transport Properties and Thermal Comfort of Polyester/Cotton Blend Fabrics, TRJ, s. 289-298.

### Tanımlar:

- Absorpsiyon: Emme, içine çekme, soğurma.
- Adsorpsiyon: Yüzeze tutunma
- Sorpsiyon: Absorpsiyon veya adsorpsiyon olayları vasıtasıyla soğurma, içine çekme, emme.
- Desorpsiyon: Koyverme, yüzden salma, geri bırakma.
- Nem: Havada bulunan su buharı, hafif ıslaklık.
- Rutubet: Materyalin ıslaklığı, içerisinde bulundurduğu buhar veya sıvı miktarı.
- Higroskopiklik: Bir materyalin, çevresinde bulunan rutubeti emme yeteneği.
- Hidrofilite: Suyu karşı yüksek bir afinitesi olan (suyu çeken), suyla ıslatılabilen.