



**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ**

## **MÜHENDSİLİK FAKÜLTESİ**

### **Makina Mühendisliği Bölümü**

#### **MAK 315 ISI TRANSFERİ**

**Isı Transferine Giriş, İletim, Taşınım, Işınım  
Mekanizmaları ve Bu Mekanizmaların Kanunları,  
Isı Transferinin Uygulama Alanları**

#### **1. Hafta**

*özenilen üniversite*

**T**ermodinamik dersinde, bir sistemle çevresi arasındaki etkileşimler sonucu enerji aktarımının olabileceğini öğrendiniz. Bu etkileşimler, iş ve ısı diye adlandırılır. Fakat termodinamik, etkileşimin olduğu işlemin başlangıç ve son halleri ile ilgilenir, etkileşimin neden kaynaklandığı veya hangi hızla geliştiği konusunda bilgi vermez.

Bu kitabın amacı, termodinamik çözümlemeyi, ısı geçişinin türlerini inceleyerek ve birim zamanda ısı geçişini hesaplayacak bağıntıları geliştirerek, genişletmektir. Bu bölümde, kitapta ele alınan konuların temelini oluşturan bilgiler, çeşitli sorular ortaya atılarak açıklanmıştır. *Isı geçişi nedir? Isı nasıl geçer? İncelenmesi neden önemlidir?* Bu sorular yanıtlanırken, ısı geçişi işlemlerinin temelini oluşturan fiziksel mekanizmalar ve bu işlemlerin, endüstri ve çevre sorunları ile ilgileri kavranacaktır.

## 1.1

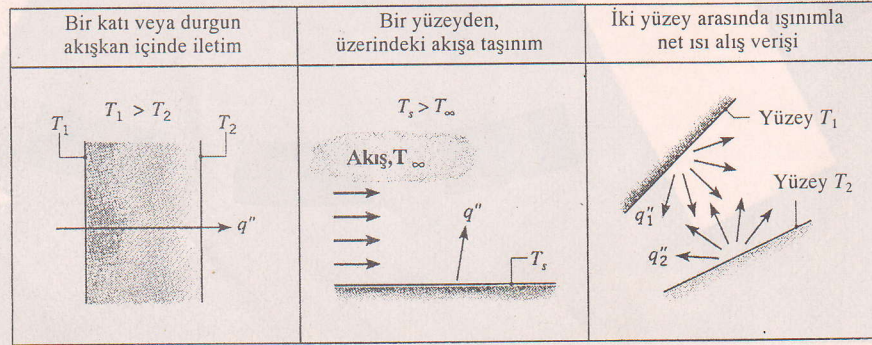
### Ne ve Nasıl?

“Isı geçişi nedir?” sorusuna doyurucu bir yanıt, basit ancak genel bir tanımlama ile verilebilir:

*Isı geçişi (veya ısı), sıcaklık farkından kaynaklanan enerji aktarımıdır.*

Bir ortam içinde veya ortamlar arasında, bir sıcaklık farkı mevcut olan her durumda, ısı geçişi mutlaka gerçekleşir.

Şekil 1.1’de gösterildiği gibi, ısı geçişinin gerçekleşmesine yol açan farklı mekanizmalar, *ısı geçişinin türleri* olarak adlandırılır. Katı veya akışkan bir durgun ortam içinde, bir sıcaklık farkı olması durumunda, ortam içinde gerçekleşen ısı geçişi için, *iletim* terimi kullanılır. Buna karşın, bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan farklı sıcaklıklarda ise, aralarında gerçekleşen ısı geçişi, *taşıma* terimi ile anılır. Isı geçişinin üçüncü türü ise, *ışınım* olarak adlandırılır. Sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyler, elektromagnetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Dolayısıyla, farklı sıcaklıklardaki iki



Şekil 1.1 İletim, taşıma ve ışınlama ile ısı geçişi.

yüzey arasında, birbirlerini görmeye engel olan bir ortam yoksa, ısınlımla net ısı alışverişı gerçekteşir.

## 1.2 Fiziksel Esaslar ve Birim Zamandaki Isı Geçişi Bağlılıları

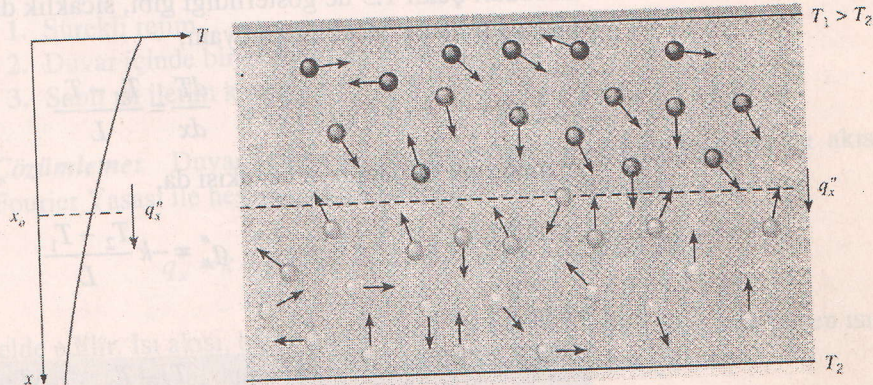
Isı geçişi türlerinin esaslı olan *fiziksel mekanizmaların* anlaşılması ve birim zamanda aktarılan enerjiyi hesaplayan temel bağlılıların kullanılabilmesi, mühendisler için önemlidir.

### 1.2.1 İletim

*İletim* kelimesi, *atomik ve moleküler faaliyeti çağrıştırmalıdır*, çünkü ısı geçişinin bu türü, atomik ve moleküler düzeyde hareketle ilişkilidir. İletim, bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklardan daha düşük enerjili parçacıklarına, bu parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucunda enerjinin aktarılması olarak düşünülebilir.

İletimin fiziksel mekanizması, bir gaz göz önüne alınarak ve termodinamik alt yapıdan bilinen düşünceler kullanılarak, kolayca açıklanabilir. İçinde sıcaklık farkı olan bir gaz göz önüne alınsın ve *hiçbir kitlesel hareket olmadığı* kabul edilsin. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi bu gaz, farklı sıcaklıklarda tutulan iki yüzey arasındaki hacmi kaplıyor olabilir. Herhangi bir noktadaki sıcaklık, o noktanın yakın çevresinde bulunan gaz moleküllerinin enerjisi ile ilişkilidir. Bu enerji, moleküllerin dönme ve titreşim hareketleriyle olduğu kadar, rastgele ötelenme hareketleri ile de ilişkilidir.

Daha yüksek enerjili moleküller, daha yüksek sıcaklıktadırlar ve komşu moleküller sürekli olarak çarpışırken, daha çok enerjili moleküllerden daha az enerjili moleküllere bir enerji aktarımı mutlaka gerçekteşir. Öyleyse, bir sıcaklık farkı olması durumunda, sıcaklığın azaldığı yönde iletim ile enerji aktarımı gerçekteşmelidir. Bu aktarım, Şekil 1.2'de açıkça görülmektedir.  $x_0$  konumundaki hayali yüzey, sürekli bir biçimde, *rastgele* hareketlere



Şekil 1.2 İletimle ısı geçişinin, moleküler faaliyete bağlı olan enerji yayılımıyla ilişkisi.

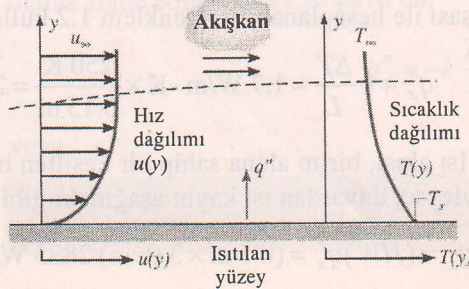
**Yorum:** Isı geçişinin yönüne ve ısı akısı ile birim zamanda geçen ısı arasındaki farka dikkat edilmelidir.

### 1.2.2 Taşınım

Taşınım ile ısı geçişi, *iki mekanizmadan oluşmaktadır. Rastgele moleküler hareket (yayılım) sonucunda enerji aktarımının yanı sıra, akışkanın kitle veya makroskopik hareketi ile de enerji aktarımı olur.* Bu akışkan hareketi herhangi bir anda, çok sayıda molekülün, topluca veya kümelenmiş olarak hareket etmesi ile ilgilidir. Bir sıcaklık gradyanı olması durumunda, böylesi bir hareket, ısı geçişine katkıda bulunur. Küme içindeki moleküller rastgele hareketlerini de korudukları için, toplam ısı geçişi, moleküllerin rastgele hareketi ile ve akışkanın kitle hareketi ile oluşan enerji aktarımlarının bir toplamıdır. Bu toplam aktarım söz konusu olduğunda, *taşınım* terimi; akışkanın kitle hareketi ile oluşan aktarım söz konusu olduğunda ise, *adveksiyon* terimi kullanılır.

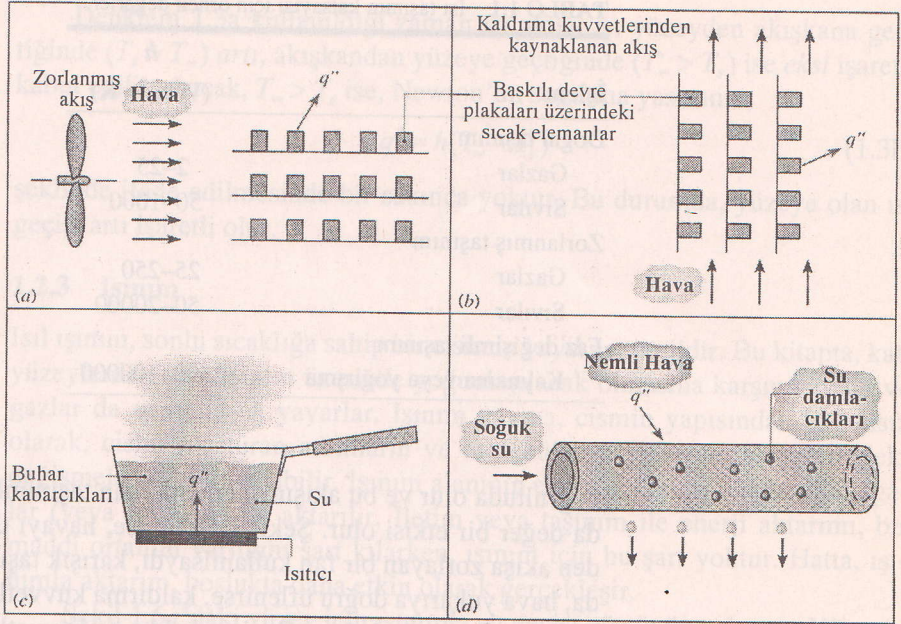
Bu kitapta, hareket halindeki bir akışkan ile onu çevreleyen yüzey arasında sıcaklık farkı olduğu zaman gerçekleşen taşınım ile ısı geçişi ele alınmıştır. Şekil 1.4'deki ısıtılan yüzey üzerinde bir akış göz önüne alınsın. Akışkan-yüzey etkileşiminin bir sonucu olarak, akışkanın hızı yüzeydeki sıfır değerinden, akış ile ilgili bir  $u_\infty$  hızına ulaşır. Bu akışkan bölgesi, *hidrodinamik sınır tabaka* veya *hız sınır tabakası* olarak adlandırılır. Dahası, yüzey ve akış sıcaklıkları farklı ise, akışkan içinde sıcaklığın,  $y = 0$ 'da  $T_s$  değerinden, dış akışta  $T_\infty$  değerine değiştiği bir akışkan bölgesi oluşur. *Isıl sınır tabaka* olarak adlandırılan bu bölge, hızın değiştiği tabakadan daha ince, daha kalın veya aynı kalınlıkta olabilir. Her durumda,  $T_s > T_\infty$  ise, yüzey ile dış akış arasında taşınım ile ısı geçişi gerçekleşir.

Taşınım ile ısı geçişi, sınır tabaka içindeki akışkanın hem rastgele moleküler hareketi, hem de kitle hareketi ile beslenir. Rastgele moleküler hareketin (yayılım) katkısı, akışkan hızının düşük olduğu yüzeye yakın kısımda etkindir. Hatta, yüzey ile akışkan arasındaki ara yüzeyde ( $y = 0$ ) akışkan hızı sıfırdır ve ısı geçişi yalnızca bu mekanizma ile olur. Akışkanın kitle hareketinin katkısı, akış  $x$  doğrultusunda gelişirken sınır tabakanın *büyümesi* olgusuna dayanır. Yani, bu tabakaya iletimle geçen ısı, akış yönünde süpürülür



**ŞEKİL 1.4**

Taşınım ile ısı geçişinde sınır tabaka gelişimi.



ŞEKİL 1.5 Taşınım ile ısı geçişi işlemleri. (a) Zorlanmış taşınım. (b) Doğal taşınım. (c) Kaynama (d) Yoğuşma.

ve sonuçta, sınır tabaka dışındaki akışkana aktarılır. Taşınım ile ısı geçişinin anlaşılması için, sınır tabaka kavramının da iyi anlaşılması gereklidir. Bu nedenle, kitabın sonraki bölümlerinde yer alan taşınım konularında, akışkanlar mekaniklerinin önemli katkısı olacaktır.

Taşınım ile ısı geçişi, akışın türüne göre sınıflandırılabilir. Akış, bir fan, bir pompa veya atmosferik rüzgarlar gibi bir dış etki ile oluşuyorsa, *zorlanmış taşınım* söz konusudur. Örnek olarak, elektronik devre elemanlarının bir fanın oluşturduğu veya zorladığı akış sonucu taşınım ile soğutulması gösterilebilir (Şekil 1.5a). Buna karşın, *doğal* (veya *serbest*) taşınım da akış, akışkan içindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu yoğunluk farklarından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri ile ilişkilidir. Buna karşın, *doğal* (veya *serbest*) taşınım da akış, akışkan içindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu yoğunluk farklarından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri ile ilişkilidir. Örnek olarak Şekil 1.5b'de gösterilen durgun hava içindeki sıcak elektronik devre elemanlarını ele alalım. Elemanlar ile temas eden havanın sıcaklığında bir artış, dolayısıyla da yoğunluğunda bir azalma olur. Bu hava çevredeki havadan daha hafif olduğu için oluşan kaldırma kuvvetleri, levhalardan yükselen ılık havanın yerini, daha serin çevre havasının aldığı bir düşey hareketi başlatır.

Şekil 1.5a'daki zorlanmış taşınım ve Şekil 1.5b'deki *salt* doğal taşınımın yanı sıra, *zorlanmış* ve *doğal taşınımın* birlikte yer aldığı durumlar da oluşabilir. Örneğin, Şekil 1.5a'daki akış hızları küçük ise ve/veya kaldırma kuvvetleri büyük ise, dışarıdan zorlanan akış ile kıyaslanabilir bir ikinci akış oluşabilir. Kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan akış, zorlanmış akışa dik

TABLO 1.1 Isı taşınım katsayısı için örnek değerler.

İşlem	$h$ (W/m <sup>2</sup> · K)
Doğal taşınım	
Gazlar	2–25
Sıvılar	50–1000
Zorlanmış taşınım	
Gazlar	25–250
Sıvılar	50–20000
Faz değişimli taşınım	
Kaynama veya yoğuşma	2500–100000

doğrultuda olur ve bu akışın, elemanlardan taşınım ile ısı geçişi üzerinde kayda değer bir etkisi olur. Şekil 1.5b’de ise, havayı devre levhalarının üzerinden akışa zorlayan bir fan kullanılsaydı, karışık taşınım oluşurdu. Bu durumda, hava yukarıya doğru üflenirse, kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan akış desteklenir, aşağı doğru üflenirse kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan akışa karşı konmuş olur.

Taşınım ile ısı geçişi, bir akışkan içinde, iletimin ve kitle hareketinin birleşik etkileri ile oluşan enerji aktarımı olarak tanımlanır. Burada, aktarılan enerji, akışkanın *duyulur* veya iç ısı enerjisidir. Ancak, buna ek olarak, *gizli* ısı alışverişinin de olduğu taşınım işlemleri vardır. Gizli ısı alışverişi, akışkanın sıvı ve buhar fazları arasındaki geçişi ile ilgilidir. Bu kitapta ilgilenilen iki özel durum, *kaynama* ve *yoğuşma* olaylarıdır. Örneğin, bir tava içinde kaynamakta olan suyun dibinde oluşan buhar kabarcıklarının (Şekil 1.5c) veya bir soğuk su borusunun dış yüzeyinde su buharı yoğuşmasının (Şekil 1.5d) yol açtığı akışkan hareketleri, taşınım ile ısı geçişine neden olur.

Taşınım ile ısı geçişinin tüm türleri için kullanılan denklem,

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (1.3a)$$

şeklinde dir. Burada, taşınım ile ısı akısı  $q''$  (W/m<sup>2</sup>), yüzey ve akışkan sıcaklıklarının arasındaki fark  $(T_s - T_\infty)$  ile doğru orantılıdır. Bu ifade, *Newton’un soğutma yasası* olarak bilinir ve orantı katsayısı  $h$  (W/m<sup>2</sup> · K) *ısı taşınım katsayısı* olarak adlandırılır. Bu değer, yüzey geometrisine, akışkan hareketinin türüne ve akışkanın bazı termodinamik ve aktarım özelliklerine göre belirlenen sınır tabakadaki koşullara bağlıdır.

Herhangi bir taşınım incelemesi, sonuçta,  $h$ ’nın belirlenebilmesi için kullanılan yöntemlerin incelenmesine indirgenir. Bu yöntemlerin ele alınması Bölüm 6’ya bırakılsa da, iletim problemlerinin çözümünde (2 ila 5. Bölümler), taşınım ile ısı geçişi bir sınır koşulu olarak sık sık ortaya çıkacaktır. Bu tür problemlerin çözümünde, Tablo 1.1’de verilen örnek değerler kullanılarak,  $h$ ’nın önceden bilindiği kabul edilecektir.

Denklem 1.3a kullanıldığı zaman ısı akısı, ısı yüzeyden akışkana geçtiğinde ( $T_s > T_\infty$ ) *artı*, akışkandan yüzeye geçtiğinde ( $T_\infty > T_s$ ) ise *eksi* işaretli kabul edilir. Ancak,  $T_\infty > T_s$  ise, Newton'un soğutma yasasının,

$$q'' = h(T_\infty - T_s) \quad (1.3b)$$

şeklinde ifade edilmesinde bir sakınca yoktur. Bu durumda, yüzeye olan ısı geçişi *artı* işaretli olur.

### 1.2.3 Işınım

Isıl ışıınım, sonlu sıcaklığa sahip bir cisimin yaydığı enerjidir. Bu kitapta, katı yüzeylerden olan ışıınım üzerinde yoğunlaşılacak olmasına karşın, sıvılar ve gazlar da ışıınımla ısı yayarlar. Işıınım yayma, cismin yapısından bağımsız olarak, cismi oluşturan atomların ve moleküllerin elektron düzenlerindeki değişmelere yorumlanabilir. Işıınım alanının enerjisi, elektromagnetik dalgalar (veya fotonlar) ile aktarılır. İletim veya taşıınım ile enerji aktarımı, bir maddi ortamın varlığını şart kılarken, ışıınım için bu şart yoktur. Hatta, ışıınımla aktarım, boşlukta daha etkin olarak gerçekleşir.

Şekil 1.6a'daki yüzey için ışıınımla ısı geçişi göz önüne alınsın. Yüzeyin yaydığı ışıınım, yüzeyin sardığı cismin ısı enerjisinden kaynaklanır ve birim zamanda birim yüzeyden serbest bırakılan enerji ( $W/m^2$ ) yüzeyin yayma gücü  $E$  olarak adlandırılır. Yayma gücünün, Stefan-Boltzmann yasası ile tanımlanan bir üst sınırı vardır:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (1.4)$$

Burada,  $T_s$ , yüzeyin mutlak sıcaklığı (K) olup  $\sigma$ , Stefan-Boltzmann sabitidir ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ ). Böyle bir yüzey, ideal ışıınım yayıcı veya siyah cisim olarak adlandırılır.

Gerçek bir yüzeyin yaydığı ısı akısı, aynı sıcaklıkta bulunan bir siyah cismin yaydığından daha azdır ve aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (1.5)$$

Burada,  $\epsilon$ , yayma oranı olarak adlandırılır ve yüzeyin bir ışıınım özeliğidir.  $0 \leq \epsilon \leq 1$  aralığında değerler alan bu özellik, bir yüzeyin, siyah cisme göre ne denli etkin enerji yaydığının bir ölçüsüdür. Yüzeyi oluşturan malzemeye ve yüzeyin nasıl işlenmiş olduğuna kuvvetle bağlı olan bu özellik için temsili değerler, Tablo A.11'de verilmiştir.

Bir yüzey üzerine çevresinden gelen ışıınım da söz konusudur. Güneş gibi, ya da söz konusu yüzeyin görme alanında olan diğer yüzeyler gibi birtakım kaynaklardan ışıınım gelebilir. Kaynaklardan bağımsız olarak, yüzeyin birim alanına, birim zamanda gelen bu ışıınımın tümü, *gelen ışıınım*  $G$  olarak adlandırılır (Şekil 1.6a).

Gelen ışıınımın bir kısmı veya tümü yüzey tarafından yutulabilir ve bu nedenle, malzemenin ısı enerjisinde bir artış gerçekleşir. Yüzeyin birim alanında birim zamanda yutulan ışıınım enerjisi, yüzeyin bir ışıınım özeliği

olan yutma oranı  $\alpha$  bilindiği takdirde hesaplanabilir. Bu özellik,  $0 \leq \alpha \leq 1$  olmak üzere,

$$G_{\text{abs}} = \alpha G \quad (1.6)$$

şeklinde tanımlanır.  $\alpha < 1$  ve yüzey ısıtım-geçirmez ise, gelen ışıının bir kısmı yansıtılır. Eğer yüzey yarı geçirgen ise, gelen ışıının bir kısmı geçirilir. Fakat, yüzeyin yuttuğu ve yaydığı ışıınlar, maddenin ısı enerjisini, sırasıyla, artırdığı ve azalttığı halde, yansıtılan ve geçirilen ışıınlar, bu enerji üzerinde etki yapmaz.  $\alpha$  değeri, yüzeyin kendisine olduğu kadar, gelen ışıının doğasına da bağlıdır. Örneğin, bir yüzeyin, güneşten gelen ışıın için yutma oranı, bir fırının duvarlarından yayılan ışıını yutma oranından farklı olabilir.

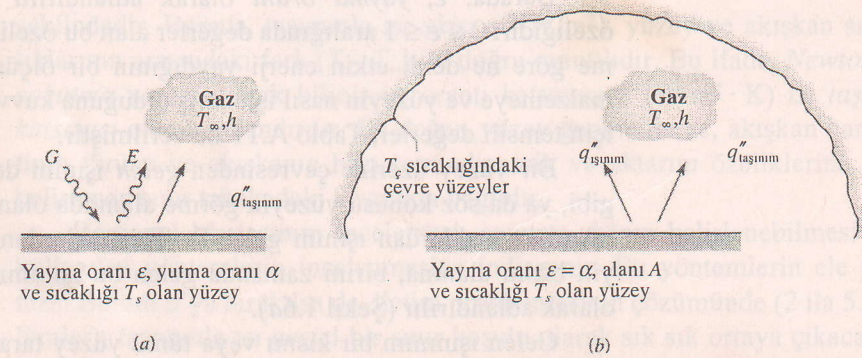
Çok sık karşılaşılan bir özel durum,  $T_s$  sıcaklığındaki küçük bir yüzey ile, bu yüzeyi tamamen çevreleyen, sabit sıcaklıktaki daha büyük bir yüzey arasında ışıınla ısı alışverişidir (Şekil 1.6b). Örneğin, bir odanın veya fırının içindeki bir cismin yüzeyi, bu cismi çevreleyen yüzeylerin, yani bu odanın veya fırının duvar yüzeylerinin sıcaklığı olan  $T_\infty$  değerinden farklı bir sıcaklıktadır ( $T_s \neq T_\infty$ ). Bölüm 12'de gösterildiği gibi, gelen ışıın, bu durumda,  $T_\infty$  sıcaklığındaki bir siyah cismin yaydığı ışıın olarak düşünülebilir ve  $G = \sigma T_\infty^4$  olur. Eğer söz konusu yüzey için,  $\alpha = \varepsilon$  (gri yüzey) kabulü yapılırsa, yüzeyin birim alanından birim zamanda ışıınla net ısı geçişi için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$q''_{\text{ışıın}} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (1.7)$$

Bu eşitlik, yayılan ışıın enerjisi ile yutulan ışıın enerjisi arasındaki fark olan ışıınla net ısı geçişini verir.

Uygulamadaki birçok durumda, ışıınla net ısı alışverişinin aşağıdaki gibi ifade edilmesi uygun olur:

$$q''_{\text{ışıın}} = h_r A (T_s - T_\infty) \quad (1.8)$$



ŞEKİL 1.6 Işıınla ısı alışverişi: (a) bir yüzeyde ve (b) bir yüzey ile daha büyük çevre yüzeyleri arasında.

Isınım ile ısı geçiş katsayısı  $h_r$  ise, Denklem 1.7'den,

$$h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_s + T_\infty)(T_s^2 + T_\infty^2) \quad (1.9)$$

olarak yazılabilir. Burada, ısınım ile ısı geçişi, taşınım ile ısı geçişine benzer şekilde modellenmiştir. Böylece, ısınım için an denklemi, *doğrusallaştırılmış* olur. Başka bir deyişle ısı geçişi, iki sıcaklığın dördüncü kuvvetlerinin farkı yerine, bir sıcaklık farkı ile doğru orantılı kılınır. Ancak dikkat edilirse,  $h_r$  sıcaklığa şiddetle bağlıdır. Oysa, ısı taşınım katsayısı  $h$ 'nın sıcaklığa bağımlılığı, genellikle zayıftır.

Şekil 1.6'daki yüzeylerden kendilerini saran bir gaza, aynı zamanda, taşınım ile da ısı geçişi olabilir. Bu durumda, Şekil 1.6b'deki şartlar için, yüzeyden birim zamandaki toplam ısı geçişi,

$$q = q_{\text{taşınım}} + q_{\text{ışınım}} = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (1.10)$$

olur.

### ÖRNEK 1.2

İçindeki havanın ve duvarlarının sıcaklıkları  $25^\circ\text{C}$  olan bir odadan, yalıtımsız bir buhar borusu geçmektedir. Borunun dış çapı 70 mm, yüzeyinin sıcaklığı ve yayma oranı, sırasıyla,  $200^\circ\text{C}$  ve 0.8'dir. Yüzeyin ısınım yayma gücünü ve yüzeye gelen ısınımı hesaplayın. Yüzeyden havaya doğal taşınım ile ısı geçiş katsayısı  $15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  olduğuna göre, borunun yüzeyinden, borunun birim uzunluğu için, birim zamandaki ısı kaybı ne kadardır?

### ÇÖZÜM

**Bilinen:** Duvar ve hava sıcaklıkları sabit olan bir oda içindeki, çapı, yüzeyinin ısınım yayma oranı ve sıcaklığı verilen yalıtımsız boru.

**İstenen:**

1. Yüzeyin ısınım yayma gücü ve yüzeye gelen ısınım.
2. Birim uzunluk için boru yüzeyinden ısı kaybı,  $q'$ .

**Şekil:**

