

## Entalpi

Özellikle güç üretimi ve soğutmayla ilgili bazı sistemler ve hal değişimlerinde birkaç özeliğin bileşiminden oluşan “ $u + Pv$ ” ifadesi kullanılır. Kolaylık ve anlatım sadeliği açısından bu ifade entalpi adı verilen ve  $H$  ile gösterilen yeni bir termodinamik özellik olarak tanımlanmıştır.

$h = u + Pv$  (J/kg) ve  $H = U + PV$  (J) olarak yazılır ( $u$  iç enerji,  $P$  basınç ve  $v$  özgül hacimdir).

## Özelik Tabloları

Birçok madde için termodinamik özellikler arasındaki ilişkiler basit denklemlerle ifade edilemeyecek kadar karmaşıktır. Bu nedenle özellikler genellikle tablolar aracılığıyla verilir. Termodinamik özellikler her madde için birden çok tabloyla sunulmuştur. Kızgın buhar, sıkıştırılmış sıvı, ıslak buhar bölgeleri gibi her bölge için ayrı bir tablo söz konusudur.

Termodinamik I ve II derslerinde aşağıda verilen adreste yer alan tablolar kullanılacaktır.

<https://www.huseyingunerhan.com/TermoDers/2021-TermoTablolar.pdf>

### Tablo Kullanımı: Doymuş Sıvı (DS)-Doymuş Buhar (DB) Karışımı (Islak Buhar) Tablosu

Suyun doymuş sıvı ve doymuş buhar özellikleri için yukarıda adresi verilen tablolar içinde yer alan **Tablo A-4** ve **Tablo A-5** kullanılacaktır. Her iki tablo da aynı bilgileri içermektedir. Tablo A-4 doyma sıcaklığı ile Tablo A-5 ise doyma basıncı ile başlamaktadır. Bu nedenle sıcaklık verildiğinde Tablo A-4'ün kullanılması, basınç verildiğinde ise Tablo A-5'in kullanılması önerilir.

Alt indis **f** doymuş sıvı özelliklerini ve alt indis **g** doymuş buhar özelliklerini belirtir. Alt indis **fg** ise doymuş buhar ile doymuş sıvı değerleri arasındaki farkı göstermek için kullanılır.

$v_f$  = doymuş sıvının özgül hacmi,

$v_g$  = doymuş buharın özgül hacmi ve

$v_{fg}$  =  $v_g$  ile  $v_f$ 'nin farkını ( $v_{fg} = v_g - v_f$ ) göstermektedir.

$h_{fg}$  büyüklüğü, buharlaşma entalpisi (veya buharlaşma gizli ısı) diye adlandırılır ve verilen bir basınç veya sıcaklıkta doymuş sıvının birim kütlelerini buharlaştırmak için gereken enerjiyi belirtir. Buharlaşma entalpisi, sıcaklık veya basınç arttıkça azalır ve kritik noktada sıfır olur.

Buharlaşma (kaynama) sırasında maddenin bir bölümü sıvı fazında, bir bölümü ise buhar fazındadır. Diğer bir anlatımla madde doymuş sıvıyla doymuş buharın bir karışımıdır. Bu karışımın özelliklerini düzgün bir şekilde belirlemek için karışımdaki sıvı ve buhar fazlarının oranını bilmek gerekir. Bu çerçevede buhar kütlelerinin toplam kütleyle oranı olarak kuruluk derecesi (karışımın kalitesi) tanımlanmıştır:

$$x = \frac{m_{\text{buhar}}}{m_{\text{toplam}}} \rightarrow m_{\text{toplam}} = m_{\text{sıvı}} + m_{\text{buhar}} = m_f + m_g \quad (\text{kg})$$

Kuruluk derecesinin sadece doymuş karışımlar için anlamı ve önemi vardır. Sıkıştırılmış sıvı ve kızgın buhar bölgelerinde bir anlam taşımaz. Değeri her zaman 0 (%0) ile 1 (%100) arasındadır. Doymuş sıvı halindeki bir sistemin kuruluk derecesi 0 (sıfır), doymuş buhar halindeki bir sistemin kuruluk derecesi ise 1 (bir) değerindedir. Doymuş sıvı-doymuş buhar karışımlarında kuruluk derecesi, hali tanımlamak için gerekli yeğin özelliklerden biri olabilir. Buharlaştırma sırasında doymuş sıvının özellikleri değil sadece miktarı değişir. Aynı durum doymuş buhar içinde geçerlidir.

Tüm doymuş sıvı-buhar karışımı halleri doyma eğrisinin altındadır ve bu bölge için doymuş sıvı-buhar özelliklerinin bilinmesi yeterlidir.

### **Tablo Kullanımı: Kızgın Buhar (KB) Tablosu**

Doymuş buhar eğrisinin sağdaki bölgede ve kritik nokta sıcaklığının üzerindeki sıcaklıkta madde kızgın buhardır. Kızgın buhar bölgesi tek fazlı (sadece gaz fazı) bir bölge olduğundan, sıcaklık ve basınç artık birbirlerine bağlı değildir. Dolayısıyla bu iki özellik kullanılarak hal kızgın buhar tablosundan belirlenebilir. **Tablo A-6** ile değişik basınç değerlerindeki özelliklerin sıcaklığa göre değişimi verilmiştir. Tabloda verilen ilk hal doymuş buhar halidir. Doyma sıcaklığı basınç değerinin ardından parantez içinde gösterilmiştir.

### **Tablo Kullanımı: Sıkıştırılmış Sıvı (SS) Tablosu**

Sıkıştırılmış sıvı tablosu Tablo A-7 ile verilmiştir. Tablo A-7'nin düzenlenişi kızgın buhar tablolarının hemen hemen aynıdır. Sıkıştırılmış sıvı özelliklerinin basınçla değişimi çok azdır. Örneğin basıncın 100 kat artması, özelliklerin yüzde 1 daha az değişmesine neden olur. **Sıkıştırılmış sıvıya ilişkin bilgilerin yokluğunda, sıkıştırılmış sıvı özelliklerini doymuş sıvı özelliklerine eşit almak, genellikle benimsenen bir uygulamadır.** Bunun nedeni, sıkıştırılmış sıvı özelliklerinde basınçtan çok sıcaklığın etkili olmasıdır.

Termodinamik kitaplarında verilen sıkıştırılmış sıvı (su) tabloları **5 MPa** basınç değerinden başlamaktadır. Verilen basınç değeri doyma basıncından büyükse veya verilen sıcaklık değeri doyma sıcaklığından küçükse sıkıştırılmış sıvı (SS) bölgesi söz konusu olmaktadır ve **5 MPa** basınç değerinden küçük basınçlar için verilen sıcaklıktaki doymuş sıvı özellikleri yaklaşık olarak alınmaktadır. Verilen sıcaklık için yaklaşık olarak alınan doymuş sıvı özelliklerinin içerdiği hata oranları için aşağıda verilen örnek incelenebilir.

**Örnek:** 100°C sıcaklık ve 15 MPa basıncındaki suyu ele alalım. Verilen sıcaklık olan  $T = 100^\circ\text{C}$  değeri için doyma basıncı  $P_{\text{doyma}} = 101.42 \text{ Pa}$  değerindedir ve verilen basınç  $P = 15 \text{ MPa} = 15000 \text{ kPa}$  için  $P > P_{\text{doyma}}$  olmaktadır. Bu durumda verilen değerler sıkıştırılmış sıvı bölgesine düşmektedir. [Doyma basıncı değeri,  $T = 100^\circ\text{C}$  için sıcaklık değerinin ilk sütunda olduğu doymuş sıvı-doymuş buhar (ıslak buhar) tablosundan okunur].

Verilen basınç olan  $P = 15000 \text{ kPa}$  değeri için doyma sıcaklığı  $T_{\text{doyma}} = 342.16^\circ\text{C}$  değerindedir ve verilen basınç  $T = 100^\circ\text{C}$  için  $T < T_{\text{doyma}}$  olmaktadır. Bu durumda verilen değerler sıkıştırılmış sıvı bölgesine düşmektedir. [Doyma sıcaklığı değeri,  $P = 15000 \text{ kPa}$  için basınç değerinin ilk sütunda olduğu doymuş sıvı-doymuş buhar (ıslak buhar) tablosundan okunur].

**P = 15 MPa** ve **T = 100°C** için sıkıştırılmış sıvı tablosu vardır ve tablodan gerçeğe yakın tüm özellikler okunabilir:

$$\begin{aligned}\text{Özgül hacim } v &= 0.0010361 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \text{İç enerji } u &= 414.85 \text{ kJ/kg} \\ \text{Entalpi } h &= 430.39 \text{ kJ/kg} \\ \text{Entropi } s &= 1.2958 \text{ kJ/kgK}\end{aligned}$$

**T = 100°C** için doymuş sıvı-doymuş buhar (ıslak buhar) tablosundan okunan değerler:

$$\begin{aligned}\text{Özgül hacim } v_f &= 0.001043 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ (Hata \%0.66)} \\ \text{İç enerji } u_f &= 419.06 \text{ kJ/kg} \text{ (Hata \%1)} \\ \text{Entalpi } h_f &= 419.17 \text{ kJ/kg} \text{ (Hata \%2.6)} \\ \text{Entropi } s_f &= 1.3072 \text{ kJ/kgK} \text{ (Hata \%0.87)}\end{aligned}$$

Entalpi değeri hariç, sadece sıcaklık değeri göz önüne alınarak doymuş sıvı-doymuş buhar (ıslak buhar) tablosundan okunan değerler ile gerçek değerler arasındaki hata oranı %1 ve %1 değerinin altında oluşmaktadır. Yani, verilen değerler için sıkıştırılmış sıvı tablosu yoksa, sadece sıcaklık değeri kullanılarak özgül hacim, iç enerji ve entropi için doymuş sıvı-doymuş buhar (ıslak buhar) tablosundan **doymuş sıvıya** ait değerler alınabilir. Entalpi için ise aşağıda verilen yöntem uygulanmalıdır.

**5 MPa** basınç değerinin altındaki basınçlar için sıkıştırılmış sıvıya ait entalpi değeri aşağıda verildiği gibi iki şekilde hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}h - h_f &= (u - u_f) + v_f (P - P_{\text{doyma}}) \\ h - (419.17 \text{ kJ/kg}) &= (414.85 - 419.06) \text{ kJ/kg} + (0.001043 \text{ m}^3/\text{kg})(15000 - 101.42) \text{ kPa} \\ h &= 430.50 \text{ kJ/kg} \text{ (Hata : \%0.026)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h - h_f &\cong v_f (P - P_{\text{doyma}}) \\ h - (419.17 \text{ kJ/kg}) &= (0.001043 \text{ m}^3/\text{kg})(15000 - 101.42) \text{ kPa} \\ h &= 434.71 \text{ kJ/kg} \text{ (Hata : \%1)}\end{aligned}$$

Sadece entalpi değeri hesabı için eğer sıkıştırılmış sıvı tablosu yoksa yukarıda verilen iki denklemden biri kullanılabilir. Birinci denklemden hata değeri çok küçük, ikinci denklemden ise kabul edilebilir derecede küçüktür. Termodinamik kitaplarında genelde ikinci denklem önerilir.

Not: **P = 15000 kPa** için doymuş sıvı-doymuş buhar (ıslak buhar) tablosundan okunan değerler:

$$\begin{aligned}\text{Özgül hacim } v_f &= 0.001657 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \text{İç enerji } u_f &= 1585.5 \text{ kJ/kg} \\ \text{Entalpi } h_f &= 1610.3 \text{ kJ/kg} \\ \text{Entropi } s_f &= 3.6848 \text{ kJ/kgK}\end{aligned}$$

Doymuş sıvı-doymuş buhar (ıslak buhar) tablosundan  $T = 100^\circ\text{C}$  sıcaklığına karşılık gelen özellikler yerine,  $P = 15000 \text{ kPa}$  basıncına karşılık gelen özellikleri okumak, yukarıda verilen değerlerden de görüldüğü gibi çok büyük ölçüde hata içermektedir. Bu kapsamda **5 MPa**

değerinden küçük basınçlar için sıkıştırılmış sıvı özelliklerinden **ölgül hacim, iç enerji ve entropi** değerleri sadece sıcaklığın başta olduğu doymuş sıvı-doymuş buhar (ıslak buhar) tablosundan verilen **sıcaklık** değeri kullanılarak okunmalıdır. Entalpi değeri ise yukarıda verilen eşitliklerden hesaplanmalıdır.

## **YARARLANILAN KAYNAKLAR:**

**“Thermodynamics: An Engineering Approach”**, 9th Edition, Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Mehmet Kanoglu, McGraw-Hill Education, 2019.

**“Termodinamiğin Temelleri”**, SI Basım, Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag, Sekizinci Baskıdan Çeviri, (Hüseyin Günerhan, çeviri editörü yardımcıları arasında yer almaktadır), Palme Yayıncılık, 2018, Ankara.

**“Principles of Engineering Thermodynamics”**, SI Edition, John R. Reisel, Cengage Learning, 2016.

**“Termodinamik-Mühendislik Yaklaşımıyla”**, Yedinci Baskıdan Çeviri, (Hüseyin Günerhan, editör yardımcıları arasında yer almaktadır), Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Palme Yayıncılık, 2015.

**“Engineering Thermodynamics”**, 8th Edition, Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, John Wiley, 2014.

**Bu bilgi notunun bazı bölümleri, yukarıda verilen kitaplardan ve/veya ilgili sunumlarından yararlanılarak veya ilham alınarak hazırlanmıştır.**

*“Termodinamik 1” derslerine ait bilgi notları; Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN tarafından çeşitli kaynaklardan da yararlanılarak ve emek ve zaman harcanarak hazırlanmış özgün bir eserdir. İzin alınmadan çoğaltılması ve kullanılması telif hakları gereği yasaktır.*

*(Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu, Kanun Numarası: 5846, Kabul Tarihi: 5/12/1951, Yayımlandığı Resmi Gazete: 13/12/1951 Sayı: 7981, Yayımlandığı Düstur: Tertip 3 Cilt 33 Sayfa 49).*