



bu bir MMO
yayıdır

MMO, bu makaledeki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan ve basım hatalarından sorumlu değildir.

Nemli Havanın Fiziksel Özelliklerinin Bilgisayar Yardımıyla Hesaplanması

ONUR DEVRES

İ.T.Ü. GIDA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

NEMLİ HAVANIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BİLGİSAYAR YARDIMI İLE HESAPLANMASI

Y. Onur DEVRES

ÖZET

Nemli havanın işgören akışkan olarak kullanıldığı iklimlendirme, soğuk muhafaza ve kurutma gibi işlemlerde, nemli havanın termodinamik özellikleri ile ilgili bilgilere ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada işlem için gerekli yedi ana termodinamik özelliğin (kuru ve yaş termometre ile çiylenme noktası sıcaklıkları, atmosferik basınç (nemli havanın toplam basıncı), nem oranı, bağıl nem ve entalpi) hesaplanması için detaylı çözüm yolları sunulmuştur. Gibbs Faz Kuralı nemli havaya uygulandığında yedi ana özellik arasından herhangi üç özelliğin bilinmesi, geriye kalan özelliklerin hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. Konu ile ilgili bilgisayar programı geliştirilerek, yedi ana özelliğin üçlü kombinasyonları ile ortaya çıkan 35 ayrı olasılık için çözümler elde edilmiş ve çözüm sırasında izlenen yollar çalışma içinde sunulmuştur.

GİRİŞ

Psikrometri konusu kapsamında nemli havanın termodinamik özelliklerinin saptanması ve bu özelliklerinden yararlanarak nemli havanın kullanıldığı işlemlerin ve koşulların analizi yapılmaktadır.

Atmosferik hava, çok sayıda gaz bileşenin yanı sıra su buharı ile çeşitli kirlenici maddelerden (duman, polen ve kirliliğin kaynağından uzak noktalarda normalde havada bulunmayan gazlar) oluşmaktadır.

Kuru hava tanımı ile içinde bulunan tüm su buharı ve kirleniciler uzaklaştırılmış hava tanımlanmaktadır. Yapılan çok sayıda ölçümler sonucunda kuru hava içeriğinin; zaman, coğrafi yerleşim ve yüksekliğe göre küçük değişimler göstermesine rağmen genelde sabit olduğu saptanmıştır. Hacimsel olarak kuru havanın içeriği %78.084 azot, %20.9476 oksijen, %0.934 argon, %0.0314 karbondioksit, %0.001818 neon, %0.000524 helyum, %0.0002 metan, %0-0.0001 sülfürdioksit, %0.00005 hidrojen, %0.0002 kadar kripton, xenon ve ozon gibi gazlardan oluşmaktadır. Kuru havanın moleküler ağırlığı 28.9645 (kmol/kg) ve gaz sabiti ise $R=287.055$ (J/kg K) olarak bilinmektedir (1).

Nemli hava ise, kuru hava ve su buharından oluşan ikili bir karışım olmaktadır. İçindeki su buharı miktarı sıfır (kuru hava) ile sıcaklığa ve basınca bağlı olarak değişen bir maksimum değer arasında değişmektedir. Maksimum su buharı içeriği ile doyma durumu tanımlanmakta ve nemli hava ile yoğunlaşmış su fazı arasındaki denge durumu belirtilmektedir. Suyun moleküler ağırlığı 18.01534 (kmol/kg), su buharının gaz sabiti de $R=461.52$ (J/kg K)'dir (1).

STANDART ATMOSFER

Yukarıda da belirtildiği gibi, atmosferik havanın sıcaklığı ve basıncı yüksekliğe bağlı olarak değişebildiği gibi, coğrafi yerleşim ve hava koşullarına bağlı olarak da farklılıklar gösterebilmektedir. Standart atmosfer tanımı ile havayı iş gören akışkan olarak kullanan mühendislerin, değişik yüksekliklerdeki havanın özelliklerini belli bir standart çerçevesinde hesaplamalarına olanak sağlanması amaçlanmıştır. Deniz seviyesinde standart sıcaklık 15°C ve standart barometrik basınç 101.325 (kPa) olarak alınmaktadır. Troposfer (alt atmosfer) boyunca sıcaklığın lineer olarak

stratosferin alt kademelerinde sabit olacak şekilde azaldığı; alt atmosferin, ideal gaz olarak davranan kuru havadan oluştuğu kabul edilmektedir. Yerçekimi ivmesi de $9.807 \text{ (m/s}^2\text{)}$ olarak sabit alınmaktadır. Çizelge 1'de 0 ile 10 000 m yükseklikler arasındaki sıcaklık ve basınç değerleri verilmiştir (1).

ÇİZELGE 1. Çeşitli yükseklikler için Standart Atmosfer verileri

Yükseklik (m)	Sıcaklık (°C)	Basınç (Pa)
-500	18.2	107 478
0	15.0	101 325
500	11.8	95 461
1000	8.5	89 874
2000	2.0	79 495
3000	-4.5	70 108
4000	-11.0	61 640
5000	-17.5	54 020
6 000	-24.0	47 181
7 000	-30.5	41 061
8 000	-37.0	35 600
9 000	-43.5	30 742
10 000	-50.0	26 436

DOYMA DURUMUNDA SUYUN TERMODİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Nemli havanın termodinamik özelliklerinin saptanabilmesi için öncelikle doyma durumundaki suyun basınç ve sıcaklığının bilinmesi gerekmektedir. Çizelge 2'de doyma durumundaki suyun -100°C ile 200°C aralığındaki sıcaklığı bilindiğinde doyma basıncının, Çizelge 3'de ise 1 ile 1 555 099 Pa aralığındaki doyma basıncı bilindiğinde buna karşılık gelen sıcaklığın hesaplanması ile ilgili eşitlikler verilmiştir. Eşitliklerin elde edilmesi sırasında ASHRAE'nin verileri en küçük kareler yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve değişik aralıklar için polinomal eşitlikler elde edilmiştir (2-4).

ÇİZELGE 2. Sıcaklığa bağlı su buharı doyma basıncının değişik sıcaklık aralıklarında hesaplanması

$$\alpha = A \cdot T^2 + B \cdot T + C + D \cdot T^{-1}, T \text{ (K)}$$

$$p_{ws} = 1000 \cdot \exp(\alpha), p_{ws} \text{ (Pa)}$$

S I C A K L I K (K)					
	$213.15 \leq T < 273.15$	$273.15 \leq T < 322.15$	$322.15 \leq T < 373.15$	$373.15 \leq T < 423.15$	$423.15 \leq T < 473.15$
A	$-0.7297593707 \cdot 10^{-5}$	$+0.1255001965 \cdot 10^{-4}$	$+0.1246732157 \cdot 10^{-4}$	$+0.1204507646 \cdot 10^{-4}$	$+0.1069730183 \cdot 10^{-4}$
B	$+0.5397420727 \cdot 10^{-2}$	$-0.1923595289 \cdot 10^{-1}$	$-0.1915465806 \cdot 10^{-1}$	$-0.1866650553 \cdot 10^{-1}$	$-0.1698965754 \cdot 10^{-1}$
C	$+0.2069880620 \cdot 10^{-2}$	$+0.2705101899 \cdot 10^{-2}$	$+0.2702388315 \cdot 10^{-2}$	$+0.2683629403 \cdot 10^{-2}$	$+0.2614073298 \cdot 10^{-2}$
D	$-0.6042275128 \cdot 10^{-4}$	$-0.6344011577 \cdot 10^{-4}$	$-0.6340941639 \cdot 10^{-4}$	$-0.6316972063 \cdot 10^{-4}$	$-0.6220781230 \cdot 10^{-4}$

ÇİZELGE 3. Basınca bağlı su buharı doyma sıcaklığının değişik basınç aralıklarında hesaplanması

$$T = E \cdot \beta^4 + F \cdot \beta^3 + G \cdot \beta^2 + H \cdot \beta + K, T \text{ (K)}$$

$$\beta = \ln(p_{ws}), p_{ws} \text{ (Pa)}$$

B A S I N Ç (Pa)					
	$1 \leq p < 6112$	$611 \leq p < 12350$	$12350 \leq p < 101420$	$101420 \leq p < 476207$	$476207 \leq p < 1555099$
E	$+0.1004926534 \cdot 10^{-2}$	$+0.5031062503 \cdot 10^{-2}$	$+0.1209512517 \cdot 10^{-4}$	$+0.2467291016 \cdot 10^{-1}$	$+0.2748402484 \cdot 10^{-4}$
F	$+0.1392917633 \cdot 10^{-2}$	$-0.8826779380 \cdot 10^{-1}$	$-0.3545542105 \cdot 10^{-0}$	$-0.9367112883 \cdot 10^{-0}$	$-0.1068661307 \cdot 10^{-1}$
G	$+0.2815151574 \cdot 10^{-0}$	$+0.1243688446 \cdot 10^{-1}$	$+0.5020858479 \cdot 10^{-1}$	$+0.1514142334 \cdot 10^{-2}$	$+0.1742964962 \cdot 10^{-2}$
H	$+0.7311621119 \cdot 10^{-1}$	$+0.3388534296 \cdot 10^{-1}$	$-0.2050301050 \cdot 10^{-2}$	$-0.9882417501 \cdot 10^{-2}$	$-0.1161208532 \cdot 10^{-3}$
K	$+0.2125893734 \cdot 10^{-3}$	$+0.2150077993 \cdot 10^{-3}$	$+0.2718585432 \cdot 10^{-3}$	$+0.4995092948 \cdot 10^{-3}$	$+0.5472618120 \cdot 10^{-3}$

HAVANIN İÇERDİĞİ NEM İLE İLGİLİ TANIMLAMALAR

Havanın içinde bulunan nem miktarı işlemin tasarlanması sırasındaki hesaplamalarda önem taşımaktadır. Konu ile ilgili değerlendirmelerin daha sağlıklı yapılabilmesi için geliştirilen tanımlamalar aşağıda sunulmuştur (1).

Nem oranı (W) : Ele alınan kuru hava ve su buharından oluşan karışım içindeki su buharı kütlesinin, o karışım içindeki kuru hava kütlesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Aynı ifade bazı kaynaklarda nem içeriği ya da karışım oranı olarak da tanımlanmaktadır.

$$W = \frac{m_w}{m_a}$$

Mol oranı (x_i) : Karışım içindeki (i) bileşenin mol sayısının (n_i), o karışımı oluşturan tüm bileşenlerin mol sayıları toplamına (n) oranı, söz konusu bileşenin mol oranını (x_i) vermektedir. Kuru havanın mol oranı x_a, su buharının nem oranı x_w, doyma durumundaki su buharının mol oranı x_{ws} ile gösterilmektedir. Nemli hava için,

$$x_a + x_w = 1$$

olmaktadır. Yukarıda tanımlanan nem oranı aynı zamanda, kuru hava ve su buharı mol oranlarının moleküler ağırlıkları ile çarpımlarının birbirlerine oranına da eşit olmaktadır.

$$W = \frac{M_w x_w}{M_a x_a} = \frac{18.01534 x_w}{28.9645 x_a} = 0.62198 \frac{x_w}{x_a}$$

Özgül nem (q) : Karışım içindeki su buharı kütlesinin, toplam nemli hava kütlesine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$q = \frac{m_w}{m_w + m_a}$$

Nem oranı ile aynı eşitlik tanımlanırsa,

$$q = \frac{W}{1+W}$$

elde edilmektedir.

Mutlak nem (d_v) : Karışım içindeki su buharı kütlesinin, o karışımın toplam hacmine oranı olmaktadır. Bazı kaynaklarda su buharı yoğunluğu olarak da raslanılmaktadır.

$$d_v = \frac{m_w}{V}$$

Yoğunluk (ρ) : Karışımın toplam kütlesinin toplam hacime oranı, o karışımın yoğunluğunu vermektedir.

$$\rho = \frac{m_a + m_w}{V}$$

DOYMA DURUMUNDAKİ NEM İLE İLGİLİ TANIMLAMALAR

İşlem sırasında nemli havanın doyma durumunun dikkate alındığı ya da karşılaştırıldığı koşullar için aşağıda verilen tanımlamalar geliştirilmiştir (1).

Doyma nem oranı (W_s) : Aynı sıcaklık ve basınçtaki suya bağlı olarak doyma durumuna geçen nemli havanın içerdiği nem olarak tanımlanmaktadır.

Doyma derecesi (μ) : Aynı sıcaklık ve basınçtaki doymuş havanın nem oranı W_s ile havanın nem oranı W arasındaki oran olmaktadır.

$$\mu = \frac{W}{W_s} \Big|_{T,p}$$

Bağıl nem (ϕ) : Ele alınan nemli hava kütleindeki su buharının mol oranı x_w 'nin aynı sıcaklık ve basınçtaki doyma durumundaki nemli hava kütleindeki su buharının mol oranı x_{ws} 'e oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\phi = \frac{x_w}{x_{ws}} \Big|_{T,p}$$

Aynı ifade daha önceki bilgilerden yararlanarak,

$$\phi = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \cdot x_{ws}}$$

şeklinde de yazılabilmektedir.

Çiylenme noktası sıcaklığı (T_d) : Ele alınan nemli hava kütleinin, aynı nem oranı W ile aynı basınçta doyma durumuna geçtiği andaki sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır.

$$W_s(p, T_d) = W$$

Yaş termometre sıcaklığı (T^*) : Söz konusu kuru termometre sıcaklığı T ve nem oranı W 'de bulunan havanın, basınç sabit kalmak üzere nem verilerek adyabatik olarak doyma durumuna getirilmesi sırasında elde edilen sıcaklığa yaş termometre sıcaklığı adı verilmektedir.

KURU VE NEMLİ HAVA İÇİN İDEAL GAZ TANIMLAMALARI

Nemli hava, birbirinden bağımsız iki ideal gazın karışımı olarak ele alındığında, her birinin ayrı ayrı ideal gaz kanununa uyduğu kabul edilmektedir (1) :

$$\begin{aligned} p_a \cdot V &= n_a \cdot R \cdot T \\ p_w \cdot V &= n_w \cdot R \cdot T \end{aligned}$$

burada p_a kuru havanın kısmi basıncı, p_w su buharının kısmi basıncı, V karışımın toplam hacimi, n_a kuru havanın mol sayısı, n_w su buharının mol sayısı, R genel gaz sabiti ($=8.31441 \text{ J/gmol K}$) ve T mutlak sıcaklık olmaktadır. Kuru hava ve su buharından oluşan karışım da ideal gaz kanununa uymaktadır :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

veya

$$(p_a + p_w) \cdot V = (n_a + n_w) \cdot R \cdot T$$

olmaktadır. Kuru hava ve su buharının nem oranları :

$$x_a = \frac{p_a}{p_a + p_w} = \frac{p_a}{P}$$

$$x_w = \frac{p_w}{p_a + p_w} = \frac{p_w}{P}$$

olarak yazılabilmektedir. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak nem oranı W ile doyma nem oranı W_s aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir. Eşitlikte kullanılan p_{ws} , verilen T sıcaklığındaki suyun doyma basıncı olmaktadır.

$$W = 0.62198 \frac{p_w}{p - p_w}$$

$$W_s = 0.62198 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}}$$

Bağıl nem ile ilgili tanımdan yararlanarak,

$$\phi = \frac{x_w}{x_{ws}} \Big|_{T,p} = \frac{p_w}{p_{ws}} \Big|_{T,p} = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \cdot (p_{ws} / p)}$$

yazılabilmektedir. Hem ϕ hem de μ değerleri kuru hava için sıfır, doymuş nemli hava için 1 olmaktadır. Ara değerler ise, özellikle yüksek sıcaklıkta birbirlerinden farklı olmaktadır.

Entalpi (h) : Bir karışımın entalpisi, o karışımı oluşturan her bir elemanın entalpileri toplamına eşit olmaktadır. Bu nedenle nemli havanın entalpisi,

$$h = h_a + W \cdot h_g$$

olarak yazılabilmektedir. Burada h_a kuru havanın, h_g ise karışımın sıcaklığında bulunan doymuş su buharının özgül entalpisini göstermektedir. Bu değerler yaklaşık olarak,

$$h_a = T \quad (\text{kJ/kg})$$

$$h_g = 2501 + 1.805 \cdot T \quad (\text{kJ/kg})$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada T ($^{\circ}\text{C}$) havanın kuru termometre sıcaklığı olmaktadır. Böylelikle nemli havanın entalpisi,

$$h = T + W \cdot (2501 + 1.805 \cdot T) \quad (\text{kJ/kgKH})$$

şeklini almaktadır. Entalpi aynı zamanda yaş termometre sıcaklığı ile ilgili tanımlardan yararlanarak,

$$h = h_s^* - (W_s^* - W) \cdot h_w^*$$

olarak da ifade edilebilmektedir. Termodinamik yaş termometre sıcaklığında bulunan suyun entalpisi,

$$h_w^* = 4.186 \cdot T^* \quad (\text{kJ/kg})$$

olmaktadır.

NEMLİ HAVANIN TERMODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI

Nemli havanın işgören akışkan olarak kullanıldığı iklimlendirme, soğuk muhafaza ve kurutma gibi işlemlerde nemli havanın termodinamik özellikleri ile ilgili bilgilere ihtiyaç bulunmaktadır. Genel olarak bu bilgiler yukarıda verilen eşitliklerden ya da daha önceden belirli toplam basınç ya da yükseklik (çoğu kere deniz seviyesi) için hazırlanmış çizge ve çizelgelerden yararlanarak elde edilebilmektedir. Bu işlem için iki özelliğin bilinmesi, diğer özelliklerin saptanması için yeterli olmaktadır. Bununla birlikte deniz seviyesinden farklı bir yerde inşa edilecek bir tesisin hesaplamaları sırasında, piyasada kolaylıkla bulunabilen deniz seviyesi için hazırlanmış çizelgelerden yararlanılması ileride bir takım problemlere yol açabilecektir. Bunun önüne geçmenin en kolay yolu ideal gaz kanunu ile geliştirilen yukarıdaki eşitlikler olmasına rağmen, uzun hesaplamalar açısından pratikte bir takım uygulama problemleri bulunmaktadır. Uzun hesaplamaların ve gerekiyorsa iterasyonların bilgisayar ortamında yapılması uygulamaya çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır (2).

Nemli havanın termodinamik özelliklerini yedi ana başlık altında toplayabiliriz : Kuru ve yaş termometre ile çiylenme noktası sıcaklıkları, atmosferik basınç (nemli havanın toplam basıncı), nem oranı, bağıl nem ve entalpi (1,2). Gibbs Faz Kuralı'na göre azot, oksijen ve su buharından oluştuğu kabul edilen bir sistemin serbestlik derecesi dört olmaktadır. Uygulama kolaylığı açısından oksijen ile azot arasındaki kütle oranları sabit kabul edildiğinde, söz konusu serbestlik derecesi üçe düşmektedir (5). Böylelikle herhangi üç özellik bilindiği takdirde, diğer özelliklerin hesaplanması mümkün olabilecektir. Yukarıda verilen yedi ana özelliğin üçlü kombinasyon kümeleri oluşturulduğunda ortaya 35 ayrı olasılık çıkmaktadır. Bu kümeler Çizelge 4'de sunulmuştur.

ÇİZELGE 4. Nemli havanın yedi ana termodinamik özelliğinin üçlü kombinasyon kümeleri (2)

1	T	T*	T _D	2	T	T _D	P	3	T	P	W	4	T	W	φ	5	T	φ	h
6	T	T*	P	7	T	T _D	W	8	T	P	φ	9	T	W	h				
10	T	T*	W	11	T	T _D	φ	12	T	P	h								
13	T	T*	φ	14	T	T _D	h												
15	T	T*	h																
16	T*	T _D	P	17	T*	P	W	18	T*	W	φ	19	T*	φ	h				
20	T*	T _D	W	21	T*	P	φ	22	T*	W	h								
23	T*	T _D	φ	24	T*	P	h												
25	T*	T _D	h																
26	T _D	P	W	27	T _D	W	φ	28	T _D	φ	h								
29	T _D	P	φ	30	T _D	W	h												
31	T _D	P	h																
32	P	W	φ	33	P	φ	h												
34	P	W	h																
35	W	φ	h																

T	Kuru termometre sıcaklığı
T*	Yaş termometre sıcaklığı
T _D	Çiylenme noktası sıcaklığı
P	Basınç
W	Nem oranı
φ	Bağıl nem
h	Entalpi

Hazırlanan bu çalışmada yukarıdaki çizelgede verilen her bir olasılık için çözüm yolları sunulmuştur (2). Bu amaçla tüm eşitlikler Çizelge 5'de toplanmış ve sonrasında bu eşitlikler kullanılarak elde edilen çözüm yolları Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelge 5'in ikinci sütununda verilen özelliğin hesaplanması için üçüncü sütunda belirtilen özellik/özelliklerin bilinmesi yeterli olmaktadır. Çizelge 6'da ise o an için bilinenler kullanılarak adım adım bilinmeyenler elde edilmektedir. Bu sırada bazı durumlarda sonuca doğrudan ulaşılrken, çoğu durumda çözüm ancak sayısal analiz yöntemleri ile elde edilebilmektedir.

ÇİZELGE 5. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin hesaplanması

Eşit. No	Elde Edilen	Bilinenler	Eşitlik	Açıklama
1	p_{ws}	T	$\alpha = A \cdot T^2 + B \cdot T + C + D \cdot T^{-1}$	$p_{ws} = 1000 \cdot \exp(\alpha)$, T (K), p_{ws} (Pa)
2	T	p_{ws}	$T = E \cdot \beta^4 + F \cdot \beta^3 + G \cdot \beta^2 + H \cdot \beta + K$	$\beta = \ln(p_{ws})$, T (K), p_{ws} (Pa)
3	p_w	T_D	$\alpha = A \cdot T_D^2 + B \cdot T_D + C + D \cdot T_D^{-1}$	$p_w = 1000 \cdot \exp(\alpha)$, T_D (K), p_w (Pa)
4	T_D	p_w	$T_D = E \cdot \beta^4 + F \cdot \beta^3 + G \cdot \beta^2 + H \cdot \beta + K$	$\beta = \ln(p_w)$, T_D (K), p_w (Pa)
5	p_{ws}^*	T^*	$\alpha = A \cdot T^{*2} + B \cdot T^* + C + D \cdot T^{*-1}$	$p_{ws}^* = 1000 \cdot \exp(\alpha)$, T^* (K), p_{ws}^* (Pa)
6	h	T, W	$h = T + W \cdot (2501 + 1805 \cdot T)$	T (°C), h (kJ/kg)
7	T	h, W	$T = \frac{h - 2501 \cdot W}{1 + 1805 \cdot W}$	T (°C), h (kJ/kg)
8	W	h, T	$W = \frac{h - T}{2501 + 1805 \cdot T}$	T (°C), h (kJ/kg)
9	W	P, p_w	$W = 0.62198 \cdot \frac{p_w}{P - p_w}$	P (Pa), p_w (Pa)
10	P	p_w, W	$P = 0.62198 \cdot \frac{p_w}{W} + p_w$	P (Pa), p_w (Pa)
11	p_w	P, W	$p_w = \frac{P \cdot W}{W + 0.62198}$	P (Pa), p_w (Pa)
12	W_s	P, p_{ws}	$W_s = 0.62198 \cdot \frac{p_{ws}}{P - p_{ws}}$	P (Pa), p_{ws} (Pa)
13	P	p_{ws}, W_s	$P = 0.62198 \cdot \frac{p_{ws}}{W_s} + p_{ws}$	P (Pa), p_{ws} (Pa)
14	p_{ws}	P, W_s	$p_{ws} = 0.62198 \cdot \frac{P - W_s}{W_s + 0.62198}$	P (Pa), p_w (Pa)
15	W_s^*	P, p_{ws}^*	$W_s^* = 0.62198 \cdot \frac{p_{ws}^*}{P - p_{ws}^*}$	P (Pa), p_{ws}^* (Pa)
16	P	p_{ws}^*, W_s^*	$P = 0.62198 \cdot \frac{p_{ws}^*}{W_s^*} + p_{ws}^*$	P (Pa), p_{ws}^* (Pa)
17	p_{ws}^*	P, W_s^*	$p_{ws}^* = \frac{P \cdot W_s^*}{W_s^* + 0.62198}$	P (Pa), p_{ws}^* (Pa)
18	W_s^*	h, W, T^*	$W_s^* = \frac{h_s - h}{h_w^*} + W$	$h_s^* = T^* + (2501 + 1805 \cdot T^*) \cdot W_s^*$ $h_w^* = 4.186 \cdot T^*$; h, h_s^*, h_w^* (kJ/kg), T^* (°C)
19	W	W_s^*, h, T^*	$W = \frac{h - h_s^*}{h_w^*} + W_s^*$	$h_s^* = T^* + (2501 + 1805 \cdot T^*) \cdot W_s^*$ $h_w^* = 4.186 \cdot T^*$; h, h_s^*, h_w^* (kJ/kg), T^* (°C)
20	W	W_s^*, T, T^*	$W = \frac{(2501 - 2.381 \cdot T^*) \cdot W_s^* - (T - T^*)}{2501 + 1805 \cdot T - 4.186 \cdot T^*}$	T (°C), T^* (°C)
21	T^*	W_s^*, W, T	$T^* = \frac{2501 \cdot (W_s^* - W) - T \cdot (1 + 1805 \cdot W)}{2.381 \cdot W_s^* - 4.186 \cdot W - 1}$	T (°C), T^* (°C)
22	W_s^*	W, T, T^*	$W_s^* = \frac{(2501 + 1805 \cdot T - 2.381 \cdot T^*) \cdot W + (T - T^*)}{2501 - 2.381 \cdot T^*}$	T (°C), T^* (°C)
23	T	W_s^*, W, T^*	$T = \frac{(2501 - 2.381 \cdot T^*) \cdot W_s^* - (2501 - 4.186 \cdot T^*) \cdot W + T^*}{1 + 1805 \cdot W}$	T (°C), T^* (°C)
24	ϕ	p_w, p_{ws}	$\phi = p_w / p_{ws}$	p_w (Pa), p_{ws} (Pa)
25	p_w	ϕ, p_{ws}	$p_w = \phi \cdot p_{ws}$	p_w (Pa), p_{ws} (Pa)
26	p_{ws}	ϕ, p_w	$p_{ws} = p_w / \phi$	p_w (Pa), p_{ws} (Pa)
27	μ	W, W_s	$\mu = W / W_s$	
28	v	T, P, W	$v = R_a \cdot T \cdot (1 + 16078 \cdot W) / P$ $R_a = 287.055$ (J/kgK)	v (m ³ /kg), T (K), P (Pa)

ÇİZELGE 6. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin Çizelge 4'de verilen değişik kombinasyonlar için hesaplanması

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
1	T, T*, T _D	1	p_{ws}	1	Eşitlik 9 ve 15'i 18 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_{ws}^*	5	
		3	p_w	3	
		4	P	9, 15, 18	
		5	W	9	
		6	W _s	12	
		7	W _s *	15	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	
2	T, T _D , P	1	p_{ws}	1	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_w	3	
		3	W	9	
		4	W _s	12	
		5	T*	15, 21	
		6	p_{ws}^*	5	
		7	W _s *	15	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	
3	T, W, P	1	p_{ws}	1	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_w	11	
		3	T _D	4	
		4	W _s	12	
		5	T*	15, 21	
		6	p_{ws}^*	5	
		7	W _s *	15	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	
4	T, W, ϕ	1	p_{ws}	1	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_w	25	
		3	P	10	
		4	T _D	4	
		5	W _s	12	
		6	T*	15, 21	
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W _s *	15	
		9	h	6	
5	T, ϕ , h	1	p_{ws}	1	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_w	25	
		3	W	8	
		4	P	10	
		5	T _D	4	
		6	W _s	12	
		7	T*	15, 21	
		8	p_{ws}^*	5	
		9	W _s *	15	

ÇİZELGE 6. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin Çizelge 4'de verilen değişik kombinasyonlar için hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım No.	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
6	T, T*, P	1	p_{ws}	1	
		2	p_{ws}^*	5	
		3	W_s^*	15	
		4	W	20	
		5	W_s	12	
		6	p_w	11	
		7	T_D	4	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	
7	T, T_D , W	1	p_{ws}	1	
		2	p_w	3	
		3	P	10	
		4	W_s	12	
		5	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		6	p_{ws}^*	5	
		7	W_s^*	15	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	
8	T, ϕ , P	1	p_{ws}	1	
		2	p_w	25	
		3	W	9	
		4	W_s	12	
		5	T_D	4	
		6	T*	15, 21	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W_s^*	15	
		9	h	6	
9	T, W, h				ÇÖZÜM YOK
10	T, T*, W	1	p_{ws}	1	
		2	p_{ws}^*	5	
		3	W_s^*	22	
		4	P	16	
		5	W_s	12	
		6	p_w	11	
		7	T_D	4	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	
11	T, T_D , ϕ				ÇÖZÜM YOK

ÇİZELGE 6. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin Çizelge 4'de verilen değişik kombinasyonlar için hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım No.	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
12	T, h, P	1	p_{ws}	1	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	W	8	
		3	p_w	11	
		4	T_D	4	
		5	W_s	12	
		6	T^*	15, 21	
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W_s^*	15	
		9	ϕ	24	
13	T, T^* , ϕ	1	p_{ws}	1	Eşitlik 9'u 20 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen ikinci dereceden denklemleri çözün
		2	p_w	25	
		3	T_D	4	
		4	p_{ws}^*	5	
		5	P	9, 20	
		6	W	9	
		7	W_s	12	
		8	W_s^*	15	
		9	h	6	
14	T, h, T_D	1	p_{ws}	1	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	W	8	
		3	p_w	3	
		4	P	10	
		5	W_s	12	
		6	T^*	15, 21	
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W_s^*	15	
		9	ϕ	24	
15	T, T^* , h	1	p_{ws}	1	
		2	W	8	
		3	p_{ws}^*	5	
		4	W_s^*	22	
		5	P	16	
		6	p_w	11	
		7	T_D	4	
		8	W_s	12	
		9	ϕ	24	
16	T^* , T_D , P	1	p_w	3	
		2	p_{ws}^*	5	
		3	W_s^*	15	
		4	W	9	
		5	T	23	
		6	p_{ws}	1	
		7	W_s	12	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	

ÇİZELGE 6. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin Çizelge 4'de verilen değişik kombinasyonlar için hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım No.	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
17	T^*, P, W	1	p_w	11	
		2	T_D	4	
		3	p_{ws}^*	5	
		4	W_s^*	15	
		5	T	23	
		6	p_{ws}	1	
		7	W_s	12	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	
18	T^*, W, ϕ	1	p_{ws}^*	5	
		2	T	1, 10, 20, 25	Eşitlik 25'i 10 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri 1 ve 25 nolu eşitlikleri kullanarak sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		3	p_{ws}	1	
		4	P	10, 25	
		5	W_s	12	
		6	W_s^*	15	
		7	p_w	11	
		8	T_D	4	
		9	h	6	
19	T^*, ϕ, h	1	p_{ws}^*	5	
		2	T	8, 9, 15, 18, 25	Eşitlik 9 ve 25'i 8 nolu eşitliğe yerleştirin ve $P(T)$ 'yi elde edin, daha sonra bu denklemi 18 nolu eşitliğe, 15 nolu eşitliği de kullanarak yerleştirin ve elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün ikinci adımda bulunan $P(T)$ 'den yararlanın
		3	P		
		4	p_{ws}	1	
		5	W_s	12	
		6	p_w	25	
		7	T_D	4	
		8	W	9	
		9	W_s^*	15	
20	T^*, T_D, W	1	p_w	3	
		2	P	10	
		3	p_{ws}^*	5	
		4	W_s^*	15	
		5	T	23	
		6	p_{ws}	1	
		7	W_s	12	
		8	h	6	
		9	ϕ	24	
21	T^*, ϕ, P	1	p_{ws}^*	5	
		2	W_s^*	15	
		3	T	9, 20, 25	Eşitlik 9 ve 25'i 20 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemleri sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		4	p_{ws}	1	
		5	W_s	12	
		6	W	9	
		7	p_w	25	
		8	T_D	4	
		9	h	6	

(devam ediyor)

ÇİZELGE 6. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin Çizelge 4'de verilen değişik kombinasyonlar için hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım No.	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama	
22	T^*, W, h	1	p_{ws}^*	5		
		2	T	7		
		3	p_{ws}	1		
		4	W_s^*	22		
		5	P	16		
		6	p_w	11		
		7	T_D	4		
		8	W_s	12		
		9	ϕ	24		
23	T^*, T_D, ϕ	1	p_w	3		
		2	p_{ws}^*	5		
		3	p_{ws}	26		
		4	T	2		
		5	P	9, 15, 20		Eşitlik 9 ve 15'i 20 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen ikinci dereceden denklemi çözün
		6	W	9		
		7	W_s^*	15		
		8	W_s	12		
		9	h	6		
24	T^*, P, h	1	p_{ws}^*	5		
		2	W_s^*	15		
		3	W	19		
		4	p_w	11		
		5	T_D	4		
		6	T	7		
		7	p_{ws}	1		
		8	W_s	12		
		9	ϕ	24		
25	T^*, T_D, h	1	p_{ws}^*	5		
		2	p_w	3		
		3	P	9, 15, 18		Eşitlik 9 ve 15'i 18 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen ikinci dereceden denklemi çözün
		4	W	9		
		5	T	7		
		6	p_{ws}	1		
		7	W_s	12		
		8	W_s^*	15		
		9	ϕ	24		
26	T_D, P, W	ÇÖZÜM YOK				
27	T_D, W, ϕ	1	p_w	3		
		2	p_{ws}	26		
		3	T	2		
		4	P	10		
		5	W_s	12		
		6	T^*	15, 21		Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		7	p_{ws}^*	5		
		8	W_s^*	15		
		9	h	6		

(devam ediyor)

ÇİZELGE 6. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin Çizelge 4'de verilen değişik kombinasyonlar için hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım No.	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
28	T_D, ϕ, h	1	p_w	3	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_{ws}	26	
		3	T	2	
		4	W	8	
		5	P	10	
		6	W_s	12	
		7	T^*	15, 21	
		8	p_{ws}^*	5	
		9	W_s^*	15	
29	T_D, P, ϕ	1	p_w	3	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_{ws}	26	
		3	T	2	
		4	W	9	
		5	W_s	12	
		6	T^*	15, 21	
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W_s^*	15	
		9	h	6	
30	T_D, W, h	1	p_w	3	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	P	10	
		3	T	7	
		4	p_{ws}	1	
		5	W_s	12	
		6	T^*	15, 21	
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W_s^*	15	
		9	ϕ	24	
31	T_D, P, h	1	p_w	3	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	W	9	
		3	T	7	
		4	p_{ws}	1	
		5	W_s	12	
		6	T^*	15, 21	
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W_s^*	15	
		9	ϕ	24	
32	P, W, ϕ	1	p_w	11	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	T_D	4	
		3	p_{ws}	26	
		4	T	2	
		5	W_s	12	
		6	T^*	15, 21	
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W_s^*	15	
		9	h	6	

ÇİZELGE 6. Nemli havanın termodinamik özelliklerinin Çizelge 4'de verilen değişik kombinasyonlar için hesaplanması (devam)

Komb. No.	Bilinen Özellikler	Adım No.	Elde Edilen	Eşitlik No.	Açıklama
33	P, ϕ , h	1	T	6, 9, 25	Eşitlik 9 ve 25'i 6 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_{ws}	1	
		3	W_s	12	
		4	p_w	25	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		5	T_D	4	
		6	W	9	
		7	T^*	15, 21	
		8	p_{ws}^*	5	
		9	W_s^*	15	
34	P, W, h	1	T	7	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_{ws}	1	
		3	p_w	11	
		4	T_D	4	
		5	W_s	12	
		6	T^*	15, 21	
		7	p_{ws}^*	5	
		8	W_s^*	15	
		9	ϕ	24	
35	W, ϕ , h	1	T	7	Eşitlik 15'i 21 nolu eşitliğe yerleştirin, elde edilen denklemi sayısal analiz yöntemleri ile çözün
		2	p_{ws}	1	
		3	p_w	25	
		4	T_D	4	
		5	P	10	
		6	W_s	12	
		7	T^*	15, 21	
		8	p_{ws}^*	5	
		9	W_s^*	15	

SONUÇ

Nemli havanın termodinamik özelliklerinin hesaplanması için geliştirilen bilgisayar programında 35 ayrı olasılıktan 32'sinin çözümü elde edilmiştir. Çizelge 6'da verilen 9, 11 ve 26 nolu kombinasyonlarda, bilinen özellikler aynı eşitlik içinde bulunduğundan, geri kalan eşitlikler çözüme olanak sağlayamamaktadır.

Bilgisayar programı FORTRAN kullanılarak geliştirilmiştir. Çözüm sırasında, çözümü mümkün olan 32 ayrı olasılıktan 21'inde sayısal analiz yöntemleri kullanılmış, 3'ünde ise ikinci dereceden denklem çözümü ile sonuca ulaşılmıştır. Tüm çözümlerde özellikler oldukça küçük hatalar ile saptanmıştır. Özellikle P'nin bilinmediği bazı durumlarda ± 0.5 mertebelerindeki hatalar ortaya çıkmıştır. Bir karşılaştırma yapma amacı ile çözümlerde elde edilen sonuçlar Çizelge 7'de sunulmuştur. Altı nolu kombinasyonda çözüme doğrudan ulaşırlarken, diğerlerinde sayısal analiz yöntemleri kullanılmıştır.

Sonuç olarak nemli havanın termodinamik özelliklerinin, genelde deniz seviyesi için geliştirilen psikrometrik tablolardan bulunması yerine bilgisayar yardımı ile hesaplanması işlem hassasiyetini artıracak, tesisin işletilmesi sırasında çıkabilecek problemleri azaltacaktır.

ÇİZELGE 7. Değişik kombinasyon kümeleri için elde edilen sonuçlar

Özellik	Hesaplamalar				
	Komb. No. 6	Komb. No. 12	Komb. No. 19	Komb. No. 27	Komb. No. 33
T (°C)	20.000	20.000	19.999	20.000	20.000
T* (°C)	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
T _D (°C)	11.755	11.755	11.755	11.755	11.755
P (Pa)	101 325.000	101 325.000	101 323.823	101 324.057	101 325.000
W (g/kg)	8.589	8.589	8.589	8.589	8.589
φ (%)	59.008	59.009	59.008	59.008	59.008
h (kJ/kg)	41.791	41.791	41.791	41.791	41.791
p _{ws} (Pa)	2 338.879	2 338.879	2 338.879	2 338.900	2 338.894
p _{ws} * (Pa)	1 705.505	1 705.518	1 705.505	1 705.524	1 705.518
p _w (Pa)	1 380.122	1 380.142	1 380.126	1 380.138	1 380.135
W _s (g/kg)	14.696	14.696	14.697	14.697	14.696
W _s * (g/kg)	10.648	10.648	10.649	10.649	10.648

Bilinenler

GÖSTERİMLER

- A Çizelge 2'de verilen katsayı
B Çizelge 2'de verilen katsayı
C Çizelge 2'de verilen katsayı
d_v Mutlak nem (kg/m³)
D Çizelge 2'de verilen katsayı
E Çizelge 3'de verilen katsayı
F Çizelge 3'de verilen katsayı
G Çizelge 3'de verilen katsayı
h Nemli havanın entalpisi (kJ/kg)
h_a Kuru havanın entalpisi (kJ/kg)
h_g Doymuş su buharının entalpisi (kJ/kg)
h_s* Nemli havanın yaş termometre sıcaklığındaki doyma durumunun entalpisi (kJ/kg)
h_w* Yoğuşuk suyun yaş termometre sıcaklığı ve 101 325 (Pa)'daki entalpisi (kJ/kg)
H Çizelge 3'de verilen katsayı
K Çizelge 3'de verilen katsayı
m_a Kuru hava kütlesi (kg)
m_w Su buharı kütlesi (kg)
M_a Kuru havanın moleküler ağırlığı (kmol/kg)
M_w Su buharının moleküler ağırlığı (kmol/kg)
n_a Kuru havanın mol sayısı
n_w Su buharının mol sayısı
p_a Kuru havanın kısmi basıncı (Pa)
p_w Nemli havadaki su buharı kısmi basıncı (Pa)
p_{ws} Doymuş saf suyun kısmi basıncı (Pa)
p_{ws}* Yaş termometre sıcaklığında bulunan doymuş saf suyun kısmi basıncı (Pa)
P Nemli havanın toplam basıncı (Pa)
q Özgül nem (kg/kg)
R Gaz sabiti (J/kg K)
R_a Kuru hava için gaz sabiti (J/kg K)
T Kuru termometre sıcaklığı (°C)
T* Yaş termometre sıcaklığı (°C)
T_D Çiylenme noktası sıcaklığı (°C)
v Nemli havanın özgül hacmi (m³/kg)
V Toplam hacim (m³)

W	Nemli havanın nem oranı (kg/kg)
W_s	Doyma durumundaki nemli havanın nem oranı (kg/kg)
W_s^*	Yaş termometre sıcaklığında doyma durumunda bulunan havanın nem oranı (kg/kg)
x_a	Kuru havanın mol oranı
x_w	Su buharının mol oranı
x_{ws}	Doyma durumundaki su buharının mol oranı
α	Çizelge 2'de tanımlanan değişken
β	Çizelge 3'de tanımlanan değişken
ϕ	Doyma derecesi
μ	Bağıl nem
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)

KAYNAKLAR

1. ASHRAE, Fundamentals Handbook, Psychrometrics, Chapter 5, 1-10, 1981.
2. Devres, Y.O., Psychrometric properties of humid air : calculation procedures, Applied Energy, 48 (1) 1-18, 1994.
3. ASHRAE, Fundamentals Handbook, Psychrometric tables, Chapter 6, 1-16, 1981.
4. Devres, Y.O., En küçük kareler yöntemi ile eğri yaklaştırılması (regresyon analizi) VAX paket bilgisayar programı, TÜBİTAK Marmara Bilişsel ve Endüstriyel Araştırma Merkezi, Soğuk Tekniği Araştırma Bölümü Yayınları No.121, 40s, 1989.
5. Agrawal, K.K. and Rao, H.V., A computer model of psychrometric properties of air, ASAE Transactions, 17 (1) 67-69, 1974.

ÖZGEÇMİŞ

Y. Onur Devres, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1983 yılında mezun olmuş, 1985 yılında da aynı üniversitenin Makina Mühendisliği, Enerji Ana Bilim Dalı'nda yüksek mühendis ünvanını kazanmıştır. 1985-1994 yılları arasında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Gıda ve Soğutma Teknolojileri Bölümü'nde uzman olarak çalışmış, 1992 yılında da Makina Mühendisliği, Termodinamik Ana Bilim Dalı, Isı ve Kütle Transferi ve Uygulamaları Bilim Dalı'nda Doçent olmuştur. Halen İTÜ Gıda Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmakta olup, "International Institute of Refrigeration" üyesidir.