

Nemli Havanın Psikrometrik Özelliklerinin Analizi: ASHRAE Matematiksel Modeli

Mehmet Ali DAYIOĞLU

Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları & Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Ankara
dayioglu@agri.ankara.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 01.06.2015 Kabul Tarihi (Accepted): 13.07.2015

Özet: Bu makalede, nemli havanın termodinamik özellikleri ASHRAE tarafından verilen eşitlikler kullanılarak 5 farklı matematiksel model için çözümlenmiştir. Psikrometrik diyagram ve çizelgeler kullanılmadan, termodinamik analizlerin yapılabilmesi için Microsoft Excel’de bir VBA Makro programı yazılmıştır. Program 5 girdi kombinasyonuna göre tanımlanmıştır: 1) Kuru termometre ve yaş termometre sıcaklıkları, 2) Kuru termometre ve çığ noktası sıcaklıkları, 3) Kuru termometre sıcaklığı ve bağıl nem, 4) Kuru termometre ve nem içeriği, 5) Kuru termometre ve özgül entalpi. Çıktı olarak, modele göre yaş termometre sıcaklığı, çığ noktası sıcaklığı, bağıl nem, nem içeriği, buhar basıncı, özgül hacim, doyma derecesi, entalpi gibi diğer psikrometrik özellikler çözümlenmiştir. Yüksek doğrulukla elde edilen model çıktıları psikrometrik diyagram üzerinde gösterilmiştir. Programı test etmek için birçok sayısal çözümleme yapılmıştır. Örnek vermek gerekirse, atmosfer basıncının 101.325 kPa, kuru termometre sıcaklığı 30°C ve bağıl nemin %65 olduğu koşullarda (Model 3), yaş termometre sıcaklığı 24.7°C, çığ noktası sıcaklığı 22.7°C, nem içeriği 17.4 g/kg kuru hava ve entalpi 74.7 kJ/kg kuru hava olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nemli hava, ideal gaz yasası, psikrometrik analiz, matematiksel model

Analysis of Psychrometric Properties of Humid Air: ASHRAE Mathematical Model

Abstract: In this study, psychrometric properties of humid air were solved for five different mathematical models using equations given by ASHREA. A VBA Macro program was written in the Microsoft Excel so that thermodynamic analyses could be done without using psychrometric diagrams and tables. The program was defined according to five input combinations: 1) Dry-bulb and Wet-bulb temperatures, 2) Dry-bulb and Dew-point temperatures, 3) Dry-bulb temperature and Relative humidity, 4) Dry-bulb temperature and Moisture content, 5) Dry-Bulb temperature and Specific Enthalpy. According to the model, as output, other psychrometric properties such as wet-bulb temperature, dew-point temperature, relative humidity, moisture content, vapour pressure, specific volume, degree of saturation and specific enthalpy were calculated. The model outputs obtained with high accuracy were shown on psychrometric diagram. Many numerical analyses were conducted to test the program. For example, solution results were calculated as wet-bulb temperature of 24.7°C, dew-point temperature of 22.7°C, humidity ratio of 17.4 g/kg dry air and enthalpy of 74.7 kJ/kg dry air under barometric pressure of 101.325 kPa, dry-bulb temperature of 30°C and relative humidity of 65% conditions (Model 3).

Key Words: Humid air, ideal gas law, psychrometric analysis, mathematical model

GİRİŞ

Nemli havanın fiziksel özelliklerinin saptanması termodinamiğin alt dalı olan psikrometrinin konusudur. Nemli hava kuru hava ve su buharı

karışımından oluşur. Atmosferik hava içinde kuru havanın kompozisyonu sabit kalmasına karşın, su buharı miktarı yoğunlaşma ve buharlaşma nedeniyle

sürekli değişmektedir. Hava içindeki su buharı miktarı az olmasına karşın, termal konforu, hayvan ve bitki sağlığı ile birlikte ürün kalitesini etkileyen bir ölçüttür. Ayrıca, hava içindeki su buharı miktarı yönetilerek enerjinin ve suyun etkin kullanımı, bunların geri kazanımı sağlanabilmektedir.

Nemli havanın psikrometrik özellikleri ideal gaz yasaları ile yüksek doğrulukla matematiksel olarak tanımlanabilmektedir. Nemli havanın psikrometrik özelliklerinin ideal gaz yasalarına dayalı olarak yüksek doğrulukla hesaplanması için bazı termodinamik eşitlikler ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) tarafından verilmiştir (ASHRAE 2009).

Uygulamada, psikrometrik diyagramlar çoğunlukla deniz seviyesi için hazırlanmış olup; diyagramların okunması sırasında bazı hataların olması ve zaman kaybı söz konusudur. Günümüz gelişen teknolojileriyle birlikte, sistem tasarımı ve etkin proses yönetimi için, mühendis, akademisyen ve bilim adamlarının kullanımına açık, dinamik koşullara göre psikrometrik analiz yapabilen birbiri ile etkileşimli bilgisayar programlarına ihtiyaç vardır.

Nemli havanın özelliklerinin belirlenmesi için farklı matematiksel ilişkiler uzun yıllardan günümüze kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. Nemli havanın psikrometrik özelliklerinin belirlenmesi için sistematik prosedürler Devres (1994), Singh ve ark. (2002), Kavanaugh ve ark. (2006) tarafından tartışılmıştır. Wang ve ark. (2002) MATLAB kullanarak, Mittal ve Zhang (2003) yapay sinir ağlarına dayalı olarak sayısal psikrometrik hesaplama araçları geliştirmişlerdir. Bahadori ve ark. (2013) araştırma çalışmalarında kuru termometre sıcaklığı ve kuru termometre ile yaş termometre arasındaki farkı kullanarak bağıl nemi hesaplamak için basit bir hesaplama aracı sunmuşlardır. Estrada-Jaramillo ve ark. (2014) çalışmalarında yaş termometre sıcaklığını ölçülen kuru termometre ve bağıl nem verilerine dayalı olarak hesaplamışlardır. Rogdakis ve Tertipis (2014) psikrometrik hesaplama etkinliğini arttırmak için yüksel hassasiyet seviyeli polinomlara dayalı modeller önermişlerdir.

Bu makalede, nemli hava için ASHRAE tarafından verilen termodinamik eşitlikler kullanılarak beş matematiksel model tanımlanmıştır. Psikrometrik analizlerin yapılması için Microsoft Excel'de VBA Makro programı yazılmıştır. Nemli hava için çözümlenen termodinamik özellikler psikrometrik diyagram üzerinde gösterilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Psikrometrik analiz kuru termometre sıcaklığı ve barometrik basınç ile nemli havayı karakterize eden termodinamik özellikler kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla, 3 girdili 7 çıktılı 5 modelden oluşan hesaplama aracı geliştirilmiştir. Kuru termometre sıcaklığı (t_{db}) ve atmosfer basıncı (p) ana girdiler olmak üzere; yaş termometre sıcaklığı (t_{wb}), çığ noktası sıcaklığı (t_{dp}), bağıl nem (ϕ), nem içeriği (W) ve entalpi (h) sıra ile eşleştirilerek 5 kombinasyonlu 5 matematiksel model tanımlanmıştır.

Farklı rakımlarda (Z) atmosfer basıncının tanımlanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır ASHREA (2009):

$$p = 101.325(1 - 2.25577 \times 10^{-5}Z)^{5.2559} \quad (1)$$

ASHREA (2009)'da nemli havanın termodinamik özellikleri için verilen ve aşağıda (2-14) arasında sıralanan eşitlikler beş matematiksel modelin tanımlanmasında kullanılmıştır.

Nemli Havanın Termodinamik Özellikleri Doyma derecesi

Doyma derecesi havanın nem içeriğinin (W) aynı sıcaklık ve basınçtaki doymuş nem içeriğine (W_s) oranı olarak tanımlanır:

$$\mu = \left[\frac{W}{W_s} \right]_{t,p} \quad (2)$$

Nem içeriği

Hava içindeki su buharı kısmi basıncının (p_v) ve atmosfer basıncının (p) fonksiyonu olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$W = 621.945 \frac{p_v}{p - p_v} \left(\frac{\text{g su buharı}}{\text{kg kuru hava}} \right) \quad (3)$$

Bağıl nem

Bağıl nem su buharı kısmi basıncının (p_v) aynı sıcaklıktaki doymuş su buharı kısmi basıncına (p_s) oranının yüzde olarak ifadesidir. Bağıl nem boyutsuz doyma derecesini gösterir:

$$\phi = \left[\frac{p_v}{p_{vs,t}} \right] \times 100 \quad (4)$$

Özgül hacim

Özgül hacim kuru termometre sıcaklığı (t_{db}), nem içeriği (W) ve atmosfer basıncına (p) göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$v = \frac{0.287042(t_{db} + 273.15)(1 + 1.607858W)}{p} \quad (5)$$

Özgül Entalpi

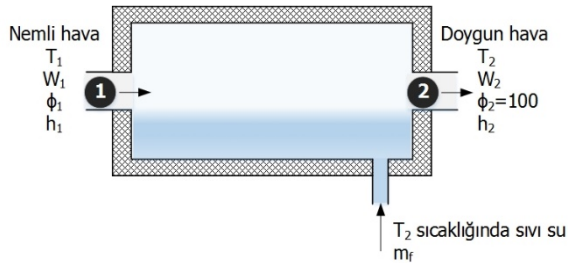
Hava – su buharı karışımı içindeki kuru hava miktarı sabit kalır; ancak su buharı miktarı değişir. Bu nedenle, atmosferik havanın entalpisi hava – su buharı karışımının birim kütlesi yerine birim kuru hava kütlesine göre tanımlanır.

Yaş termometre sıcaklığı

Bağıl nemin belirlenmesi için genellikle iki yöntem kullanılır:

1. Adyabatik doyma işleminden yaş termometre sıcaklığının saptanması,
2. Havanın çığ noktası sıcaklığından p_v buhar basıncının saptanması.

Şekil 1’de gösterildiği gibi, nemli hava (1) kanalına T_1 sıcaklığı ve W_1 nem oranında girer; sürekli akışla suyun üzerinden geçerken bir miktar su buharlaşarak havaya karışır. Akış sırasında havanın nem içeriği artar; sıcaklığı ise azalır. Burada suyun buharlaşma gizli ısısının bir kısmı havanın duyulur ısısından karşılanır. (2) noktasındaki hava, doymun olarak ($\phi=100$), adyabatik doyma sıcaklığında (T_2) çıkar.



Şekil 1. Adyabatik doyma işlemi

Adyabatik doyma işlemi şekil 2’deki T-s diyagramında (1-2) yolunu izler. Eğer kanal içine buharlaşma hızını karşılayacak şekilde (T_2) sıcaklığında su verilirse, burada tanımlanan adyabatik doyma işlemi analiz edilebilir. İşlem sırasında dışarıdan ısı giriş ve çıkışı yoktur. İki girişi ve bir çıkışı olan sistemin kütle ve enerji dengeleri aşağıda tanımlanmıştır:

Kütle dengesi:

1. Kuru hava kütlesi akış hızı sabit kalır:

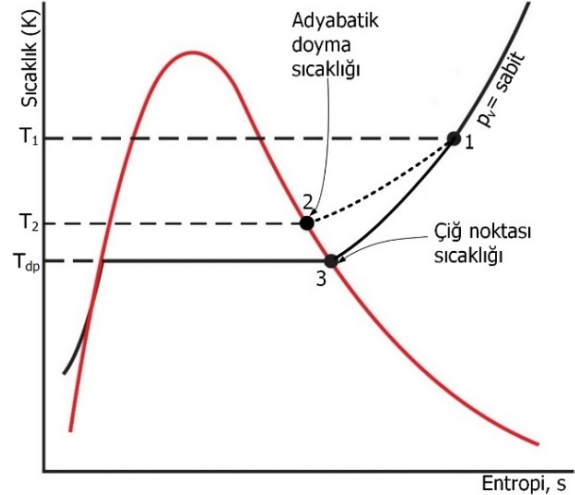
$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$
2. Hava içindeki su buharı kütlesi akış hızı buharlaşma hızı miktarına eşit şekilde artar.

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_f = \dot{m}_{v2}$$

$$\dot{m}_a W_1 + \dot{m}_f = \dot{m}_a W_2$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a (W_2 - W_1)$$

3. Nem içeriği W_1 ’den W_2 ’e kadar artar.
4. Birim kuru hava başına eklenen suyun kütlesi ($W_2 - W_1$) kadardır.



Şekil 2. Yaş termometre ve çığ noktası sıcaklıklarının T-s diyagramında gösterimi

Enerji dengesi:

1. İşlem sırasında dışarıdan ısı giriş ve çıkışı yoktur:

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_f h_{f2} = \dot{m}_a h_2$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (W_2 - W_1) h_{f2} = \dot{m}_a h_2$$
2. Adyabatik işlem sırasında nemli havaya ve eklenen su buharının entalpileri toplamı yaş termometre sıcaklığında doymun havanın entalpisine eşittir:

$$h_1 + (W_2 - W_1) h_{f2} = h_2$$
3. Nemli havanın entalpisi:

$$h_1 = 1.006t_1 + W_1(2501 + 1.86t_1) \quad (6)$$

4. Nemli havaya eklenen enerji:

$$(W_2 - W_1) h_{f2}$$
5. h_{f2} t_2 sıcaklığında eklenen suyun özgül entalpisi

$$h_{f2} = 4.186t_2$$
6. (1) ve (2) noktaları arasındaki entalpi dengesinde bileşenler yerine konularak (1) noktası için nem içeriği eşitliği elde edilir:

$$W_1 = \frac{(2501 - 2.326t_2)W_2 - 1.006(t_1 - t_2)}{2501 + 1.86t_1 - 4.186t_2} \quad (7)$$

7. $\phi=100$ için (2) noktasının nem içeriği:

$$W_2 = \frac{0.621945 p_{v2}}{p_2 - p_{v2}} \quad (8)$$

Kanalın giriş ve çıkış noktalarındaki basınç ve sıcaklıklar ölçülerek, W_1 ve W_2 eşitliklerinden havanın bağıl nemi belirlenebilir. Kanala giren hava doygunsa, $T_1=T_2$ ve $W_1=W_2$ olacaktır. Genel olarak, adyabatik doyma sıcaklığı giriş ve çıkış noktaları sıcaklıkları arasında olacaktır. Uygulamada, adyabatik doyma prensibine göre çalışan yaş termometreler kullanılır.

Çiğ noktası sıcaklığı

Hava sabit basınçta soğutulduğu zaman yoğuşmanın başladığı sıcaklık, çiğ noktası sıcaklığı olarak tanımlanır. Şekil 2'de gösterildiği gibi, hava sabit basınçta soğurken, p_v buhar basıncı sabit kalır. Bu nedenle, (1) noktasında havadaki su buharı (3) noktasındaki doygun buhar eğrisine ulaşana kadar sabit basınçta soğuma işleminin etkisindedir. Sıcaklık entropi diyagramında (3) noktasındaki sıcaklık T_{dp} çiğ noktası sıcaklığıdır. Sıcaklığın düşmeye devam etmesi durumunda buharın bir bölüme yoğuşarak karışımdan ayrılır. Bunun sonucu olarak havadaki su buharı miktarı azalır; buhar kısmi basıncı (p_v) düşer. Hava yoğuşma işlemi sırasında doygun halde olup; doyma eğrisini takip ederken bağıl nem %100'dür. Buharın hal değişimi doymuş buhar eğrisini izler. Doymuş havanın çiğ noktası sıcaklığı ve kuru termometre sıcaklığı aynıdır.

Nemli havanın çiğ noktası sıcaklığı W_3 (p , T_{dp}) nem içeriğine göre T_{dp} (p , W_1) çiğ noktası sıcaklığının çözümü olarak tanımlanır. Mükemmel gaz için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$p_{v3}(t_{dp}) = p_{v1} = \frac{pW_1}{0.621945 + W_1} \quad (9)$$

Burada p_v nemli havanın su buhar basıncı, $p_{v3}(t_{dp})$ çiğ noktası sıcaklığındaki doygun buhar basıncıdır. $0 \leq t_{db} \leq 93^\circ\text{C}$ ve $t_{db} < 0$ için çiğ noktası sıcaklıkları sırasıyla aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir:

$$t_{dp} = 6.54 + 14.526\alpha + 0.7389\alpha^2 + 0.09486\alpha^3 + 0.4569(p_v)^{0.1984} \quad (10)$$

$$t_{dp} = 6.09 + 12.608\alpha + 0.4959\alpha^2 \quad (11)$$

Burada $\alpha = \ln(p_v)$ olup; p_v kPa olarak su buharı kısmi buhar basıncıdır.

Doygun nem içeriği

Doygun nem içeriği doygun buhar basıncı ve atmosfer basıncının fonksiyonudur:

$$W_s(t) = 0.621945 \frac{p_{vs}(t)}{p - p_{vs}(t)} \quad (12)$$

Burada, doygun nem içeriği $t = t_{db}$ kuru termometre sıcaklığına göre $W_s(t_{db})$ ya da $t = t_{wb}$ yaş termometre sıcaklığına göre $W_s^*(t_{wb})$ doygun nem içeriklerini gösterir.

Doygun buhar basıncı

Kuru termometre sıcaklık aralığı $-100 < t_{db} < 0^\circ\text{C}$ için buz üzerindeki doyma basıncı için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$\ln(p_{vs}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln T \quad (13)$$

Bu eşitliğin katsayıları $C_1=-5674.5359$, $C_2=6.3925247$, $C_3=-9.677843 \times 10^{-3}$, $C_4=6.2215701 \times 10^{-7}$, $C_5=2.0747825 \times 10^{-9}$, $C_6=-9.4840240 \times 10^{-13}$, $C_7=4.1635019$ 'dir.

Kuru termometre sıcaklık aralığı $0 < t_{db} < 200^\circ\text{C}$ için su üzerindeki doygun buhar basıncı için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$\ln(p_{vs}) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln(T) \quad (14)$$

$C_8=-5800.2206$, $C_9=1.3914993$, $C_{10}=-4.8640239 \times 10^{-2}$, $C_{11}=4.1764768 \times 10^{-5}$, $C_{12}=-1.4452093 \times 10^{-8}$ ve $C_{13}=6.5459673$ şeklinde tanımlanmış olup; $T (=t+273.15 \text{ K})$ mutlak sıcaklıktır. Ayrıca, doygun buhar basınçları sıcaklıklara göre $p_{vs}(t_{db})$ ya da $p_{vs}^*(t_{wb})$ olarak hesaplanabilir.

ASHREA Matematiksel modeli

Beş farklı psikrometrik modelin çözümü Microsoft Excel VBA'da yazılan Makro programı ile sağlanmıştır. Hesaplamalarda doğrusal olmayan tek bilinmeyenli denklemlerin kökleri "İkiye Bölme (Bisection)" yöntemi uygulanarak 30 iterasyonda çözümlenmiştir.

Modeller $t_{db}=-10, 10, 20, 30, 40, 60$ °C kuru termometre sıcaklarında ve $p=101.325$ kPa atmosfer basıncında test edilmiş olup; 5 farklı girdi kombinasyonu için çözüm aşamaları ve elde edilen çıktılar Çizelge 1'de verilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Ele alınan beş model Çizelge 1'de verilen geniş aralıklarda test edilmiştir. Burada, 3 girdi – 7 çıktı seti ile 42 psikrometrik büyüklük, toplam 210 hesaplama

yapılmıştır. Çözüm sonuçları CIBSE (2007) referans verileri ile karşılaştırılmıştır. Tüm modeli kapsayan toplam 210 psikrometrik sonuç ve 210 CIBSE referans verisi toplam 420 sayısal veri irdelenmiştir.

Hesaplanan psikrometrik verilerin doğruluğu aşağıda sıralanan faktörlere bağlıdır:

- (10), (11) ve (13), (14) nolu eşitliklerin ampirik olması küçük sapmalara neden olabilmektedir. Bu eşitliklerin ortalama hataları %0.012-0.04 arasındadır (Rodakis ve ark. 2014).
- Çalışmada "Bisection" sayısal çözümleme yöntemi kullanılmış olup; doğru çözüm iterasyon sayısına bağlıdır. İterasyon sayısı yaş termometre sıcaklığının saptanmasında önemli olmaktadır.

Öncelikli olarak, Model 1 kapsamında elde edilen bulgular Çizelge 2 'de CIBSE (2007) referans verileri ile bir arada verilmiştir. Değerlendirme ölçütü olarak, Model (1)'in CIBSE'ye göre normalize edilmiş yüzde fark değerleri Çizelge 3'de gösterilmiştir. Çizelge 3'e göre, fark değerleri % 0 ile % 0.772 arasında değişmiştir. En yüksek fark değeri 1 nolu veri setinde bağıl nem için elde edilmiş olup; model verisi %66.57, CIBSE verisi %66.06 'dır. Elde edilen sonuçlar sayısal çözümleme açısından yeterlidir (Estrada-Jaramillo ve ark., 2014; Rogdakis ve Tertipis, 2014).

Benzer şekilde, Model 2, 3, 4, 5 için sayısal çözümleme sonuçları ile CIBSE referans verileri Çizelge 4, 5, 6, 7'de sırasıyla gösterilmiştir. Yüzde fark değerleri Model 1'e benzer değişimler göstermektedir.

Ancak, bu fark değerleri bir hata olarak ele alınmamalıdır. Elde edilen sayısal çözümlerin bazıları Şekil 3'de verilen ASHREA psikrometrik diyagram üzerinde gösterilmiştir.

Model 1'de 10°C kuru termometre ve 8°C yaş termometre sıcaklıkları için %76.7 bağıl nem, 6.13 °C çığ noktası sıcaklığı, 5.84 g/kg kuru hava nem içeriği

ve 24.8 kJ/kg kuru hava entalpi verileri diyagram üzerinde gösterilmiştir. Model 2'de 20°C kuru termometre ve 10°C çığ noktası sıcaklığı için, bağıl nem %52.5, yaş termometre sıcaklığı 14.1°C, nem içeriği 7.63 g/kg kuru hava ve entalpi 39.5 kJ/kg kuru hava olarak saptanmıştır.

Çizelge 1. ASHREA matematiksel modeli işlem aşamaları (p=101.325 kPa)

Model	Girdiler	Eşitlik No	Çıktılar
1 [t_{db} ; t_{wb}]	[-10;-11] [10; 8] [20; 16] [30; 19.9] [40; 35] [60; 45]	12-7	W
		9	p_v
		13-14-4	ϕ
		10-11	t_{dp}
		5	v
		2	μ
6	h		
2 [t_{db} ; t_{dp}]	[-10; -16] [10; 6] [20; 10] [30; 20] [40; 20] [60; 51]	10-11	p_v
		13-14-4	ϕ
		3	W
		7	t_{wb}
		5	v
		12-2	μ
6	h		
3 [t_{db} ; ϕ]	[-10; 50.06] [10; 80.2] [20; 30.5] [30; 65] [40; 85] [60; 37]	13-14	p_{vs}
		3	W
		7	t_{wb}
		10-11	t_{dp}
		5	v
		12-2	μ
6	h		
4 [t_{db} ; W]	[-10; 0.804] [10; 5.055] [20; 11.8] [30; 12.02] [40; 14.73] [60; 134.9]	9	p_v
		13-14-4	ϕ
		7-12	t_{wb}
		10-11	t_{dp}
		5	v,
		2	μ
6	h		
5 [t_{db} ; h]	[-10; -7] [10; 18.16] [20; 53] [30; 52.5] [40; 111] [60; 300.4]	6	W
		9	p_v
		13-14-4	ϕ
		12-7	t_{wb}
		10-11	t_{dp}
		5	v
2	μ		

Çizelge 2. Model (1) (t_{db} - t_{wb}) için psikrometrik analiz sonuçları ve CIBSE referans verileri (p=101.325 kPa)

1	1		2		3		4		5		6	
	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE
	$t_{db} = -10^\circ\text{C}$, $t_{wb} = -11^\circ\text{C}$		$t_{db} = 10^\circ\text{C}$ $t_{wb} = 8^\circ\text{C}$		$t_{db} = 20^\circ\text{C}$ $t_{wb} = 16^\circ\text{C}$		$t_{db} = 30^\circ\text{C}$ $t_{wb} = 19.9^\circ\text{C}$		$t_{db} = 40^\circ\text{C}$ $t_{wb} = 35^\circ\text{C}$		$t_{db} = 60^\circ\text{C}$ $t_{wb} = 45^\circ\text{C}$	
t_{dp}	-14.5	-14.6	6.126	6.0	13.62	13.6	14.64	14.6	33.91	33.9	42.98	43.0
ϕ	66.57	66.06	76.71	76.22	66.55	66.53	39.19	39.03	71.86	71.58	43.38	43.34
W	1.064	1.061	5.836	5.821	9.703	9.736	10.383	10.38	34.365	34.37	58.07	58.26
v	0.747	0.746	0.8097	0.8092	0.8434	0.8431	0.8731	0.8728	0.9361	0.9355	1.0319	1.031
p_v	0.173	0.172	0.9420	0.9354	1.557	1.555	1.664	1.656	5.305	5.28	8.652	8.632
μ	0.665	0.66	0.7649	0.76	0.6603	0.66	0.3817	0.38	0.703	0.70	0.381	0.38
h	-7.419	-7.421	24.77	24.72	44.75	44.82	56.73	56.71	128.7	128.7	212.1	212.4

Çizelge 3. Model (1) : ($t_{db}-t_{wb}-p$) yüzde fark değerleri

1	1	2	3	4	5	6
	Fark (%)					
t_{dp}	0.685	0.350	0.147	0.274	0.029	0.047
ϕ	0.772	0.643	0.030	0.410	0.391	0.092
W	0.283	0.258	0.339	0.029	0.015	0.326
v	0.134	0.062	0.036	0.034	0.064	0.087
p_v	0.581	0.706	0.129	0.483	0.473	0.232
μ	0.758	0.645	0.045	0.447	0.429	0.263
h	0.027	0.202	0.156	0.035	0.000	0.141

Çizelge 4. Model (2) ($t_{db}-t_{dp}$) için psikrometrik analiz sonuçları ve CIBSE referans verileri ($p=101.325$ kPa)

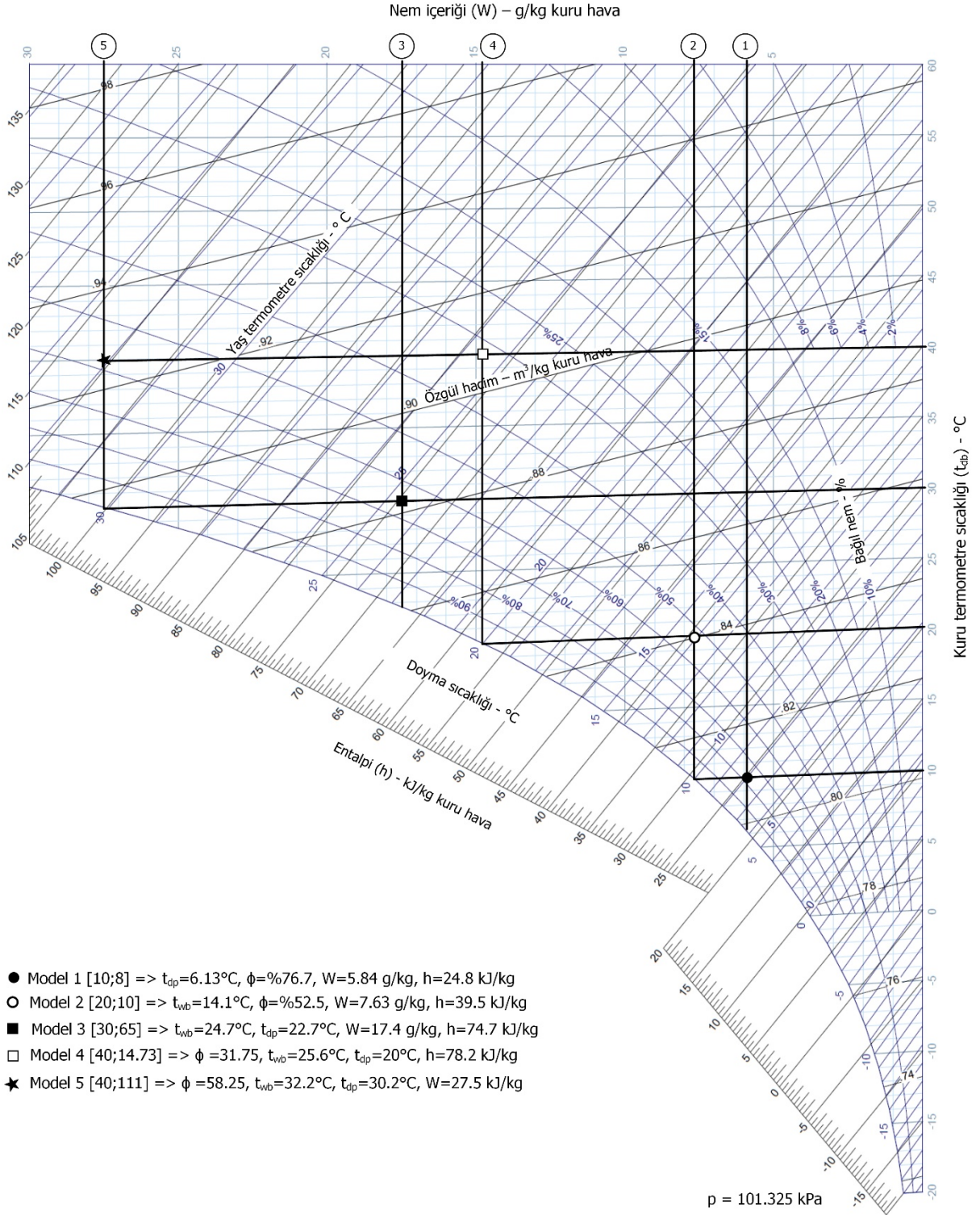
2	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE
	$t_{db} = -10^\circ\text{C}$, $t_{dp} = -16^\circ\text{C}$		$t_{db} = 10^\circ\text{C}$ $t_{dp} = 6^\circ\text{C}$		$t_{db} = 20^\circ\text{C}$ $t_{dp} = 10^\circ\text{C}$		$t_{db} = 30^\circ\text{C}$ $t_{dp} = 20^\circ\text{C}$		$t_{db} = 40^\circ\text{C}$ $t_{dp} = 20^\circ\text{C}$		$t_{db} = 60^\circ\text{C}$ $t_{dp} = 51^\circ\text{C}$	
t_{wb}	-11.26	-11.4	7.95	8.0	14.13	14.1	22.94	22.9	25.57	25.6	51.77	51.8
ϕ	57.97	58.06	76.16	76.22	52.51	52.59	55.08	55.08	31.68	31.64	65.06	65.17
W	0.926	0.932	5.794	5.821	7.63	7.67	14.695	14.75	14.695	14.73	91.35	91.99
v	0.7466	0.746	0.8096	0.8092	0.8407	0.8403	0.8791	0.8788	0.9081	0.9078	1.0824	1.082
p_v	0.1507	0.1510	0.9352	0.9354	1.228	1.229	2.339	2.336	2.339	2.333	12.98	12.98
μ	0.5791	0.58	0.7594	0.76	0.5192	0.52	0.5402	0.54	0.3006	0.30	0.5993	0.60
h	-7.760	-7.74	24.66	24.72	39.49	39.58	67.75	67.87	78.09	78.16	299.0	300.4

Çizelge 5. Model (3) ($t_{db}-\phi$) için psikrometrik analiz sonuçları ve CIBSE referans verileri ($p=101.325$ kPa)

3	1		2		3		4		5		6	
	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE
	$t_{db} = -10^\circ\text{C}$, $\phi = \% 50.06$		$t_{db} = 10^\circ\text{C}$ $\phi = \% 80.2$		$t_{db} = 20^\circ\text{C}$ $\phi = \% 30.5$		$t_{db} = 30^\circ\text{C}$ $\phi = \% 65$		$t_{db} = 40^\circ\text{C}$ $\phi = \% 85$		$t_{db} = 60^\circ\text{C}$ $\phi = \% 37$	
t_{wb}	-11.50	-11.6	8.31	8.3	10.93	10.9	24.67	24.7	37.46	37.5	42.62	42.6
t_{dp}	-17.56	-17.6	6.77	6.7	2.141	2.1	22.70	22.7	36.96	37.0	39.96	40.0
W	0.800	0.804	6.115	6.127	4.408	4.425	17.421	17.48	41.00	41.24	48.773	49.06
v	0.7464	0.7459	0.8100	0.8096	0.8363	0.8360	0.8828	0.8825	0.9456	0.9452	1.0187	1.018
p_v	0.1302	0.1302	0.9865	0.9841	0.7131	0.7127	2.761	2.757	6.267	6.269	7.368	7.37
μ	0.50	0.5	0.8014	0.8	0.2999	0.3	0.6404	0.64	0.8388	0.84	0.32	0.32
h	-8.073	-8.06	25.47	25.50	31.31	31.35	74.72	74.85	145.8	146.4	187.78	188.4

Çizelge 6. Model (4) ($t_{db}-W$) için psikrometrik analiz sonuçları ve CIBSE referans verileri ($p=101.325$ kPa)

4	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE
	$t_{db} = -10^\circ\text{C}$, $W=0.804$ gkg ⁻¹		$t_{db} = 10^\circ\text{C}$ $W=5.055$ gkg ⁻¹		$t_{db} = 20^\circ\text{C}$ $W = 11.8$ gkg ⁻¹		$t_{db} = 30^\circ\text{C}$ $W=12.02$ gkg ⁻¹		$t_{db} = 40^\circ\text{C}$ $W=14.73$ gkg ⁻¹		$t_{db} = 60^\circ\text{C}$ $W=134.9$ gkg ⁻¹	
ϕ	50.33	50.06	66.52	66.27	80.67	80.37	45.25	45.07	31.75	31.64	90.55	90.14
t_{wb}	-11.49	-11.6	7.083	7.1	17.76	17.7	21.1	21.1	25.59	25.6	58.01	58.0
t_{dp}	-17.50	-17.6	4.071	4.0	16.60	16.5	16.89	16.8	20.05	20.0	57.87	57.8
v	0.7464	0.7459	0.8087	0.8082	0.8462	0.8458	0.8754	0.875	0.9081	0.9078	1.1485	1.146
p_v	0.1309	0.1302	0.8175	0.8133	1.8895	1.878	1.9239	1.912	2.3463	2.333	18.059	17.96
μ	0.5031	0.5	0.6630	0.66	0.8042	0.8	0.4425	0.44	0.3016	0.30	0.8850	0.88
h	-8.063	-8.06	22.81	22.79	50.12	50.06	60.96	60.89	78.21	78.16	412.77	412.4



Şekil 3. Psikrometrik diyagram

Çizelge 7. Model (5) (t_{db} -h) için psikrometrik analiz sonuçları ve CIBSE referans verileri ($p=101.325$ kPa)

5	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE	Model	CIBSE
	$t_{db} = -10^{\circ}\text{C}$, $h = -7.0$ kJkg ⁻¹		$t_{db} = 10^{\circ}\text{C}$ $h = 18.16$ kJkg ⁻¹		$t_{db} = 20^{\circ}\text{C}$ $h = 53$ kJkg ⁻¹		$t_{db} = 30^{\circ}\text{C}$ $h = 52.5$ kJkg ⁻¹		$t_{db} = 40^{\circ}\text{C}$ $h = 111$ kJkg ⁻¹		$t_{db} = 60^{\circ}\text{C}$ $h = 300.4$ kJkg ⁻¹	
ϕ	75.61	76.05	42.74	42.3	88.71	88.25	33.29	32.95	58.25	57.88	65.48	65.17
t_{wb}	-10.73	-10.8	4.833	4.8	18.71	18.7	18.68	18.6	32.18	32.1	51.88	51.8
t_{dp}	-13.11	-13.1	-2.139	-2.0	18.10	18.0	12.15	12.0	30.21	30.1	51.11	51.0
W	1.209	1.221	3.239	3.217	13.001	12.98	8.80	8.739	27.543	27.49	91.93	91.99
v	0.7469	0.7464	0.8063	0.8059	0.8478	0.8473	0.8709	0.8705	0.9264	0.9258	1.0834	1.082
p_v	0.1965	0.1977	0.5249	0.5190	2.0748	2.062	1.4137	1.398	4.301	4.269	13.059	12.98
μ	0.7556	0.76	0.4244	0.42	0.8847	0.88	0.3235	0.32	0.5640	0.56	0.6037	0.60

TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu makalede, nemli havanın termodinamik özellikleri ASHRAE tarafından verilen eşitlikler kullanılarak 5 farklı matematiksel model için çözümlenmiştir. Psikrometrik diyagram ve çizelgeler kullanılmadan, termodinamik analizlerin yapılabilmesi için Microsoft Excel'de VBA Makro programı yazılmıştır. Barometrik basınç ve kuru termometre sıcaklığı, sırasıyla yaş termometre sıcaklığı, çığ noktası sıcaklığı, bağıl nem, nem içeriği ve özgül entalpi ile

eşleştirilerek üç girdili 5 model hazırlanmıştır. Modele göre, yaş termometre sıcaklığı, çığ noktası sıcaklığı, bağıl nem, nem içeriği, buhar basıncı, özgül hacim, doyma derecesi, entalpi gibi psikrometrik özellikler çözümlenmiştir. Nemli hava için elde edilen veriler psikrometrik diyagram üzerinde gösterilmiştir. Geliştirilen Microsoft Excel VBA makro programı seraların, hayvan barınaklarının, mantar işletmelerinin, kurutma sistemlerinin, depoların iklimlendirilmesinde ve tasarımında etkili bir araç olarak kullanılabilir.

LİTERATÜR LİSTESİ

- ASHRAE, 2009. Psychrometrics, Ch1: 1.1-1.16, In: *Fundamentals (SI Edition)*.
- Bahadori, A., Zahedi, G., Zendehboudi, S., Hooman, K., 2013. Simple predictive tool to estimate relative humidity using wet bulb depression and dry bulb temperature, *Applied Thermal Engineering*, 50(1): 511-515.
- CIBSE 2007. Properties of humid air, 1-67, In: *Reference Data, Guide C*, Cibse, London.
- Devres, Y., 1994. Psychrometric properties of humid air: calculations procedures, *Applied Energy* 48, 1-8
- Estrada-Jaramillo, M., Vera-Romero, I., Martínez-Reyes, J., Ortiz-Soriano, A., Barajas-Ledesma, E., 2014. Empirical Model to Calculate the Thermodynamic Wet-Bulb Temperature of Moist Air, *Engineering*, 6, 500-506.
- Kavanaugh, S., McCrary, B., Woodbury, K., 2006. Psychrometric spreadsheet, *ASHRAE J.* 48(1): 28-32.
- Mittal, G. S., Zhang, J., 2003. Artificial neural network- based psychrometric predictor, *Biosystems Engineering*, 85 (3), 283-289.
- Rogdakis, E., Tertipis, D., 2014. An accurate and computationally efficient approximation to psychrometric calculations, *International Journal of Latest research in Science and Technology* 3 (3), 15-24.
- Singh, A. K., Singh, H., Singh, S. P. Sawhney, R. L., 2002. Numerical Calculation of Psychrometric Properties on a Calculator. *Building and Environment*, 37, 415-419.
- Wang, D. C., Fang, W., Fon, D. S., 2002. Development of a Digital Psychrometric Calculator Using MATLAB. *Acta Hort*, 578, 339-344.