

## 6 Determinarea mărimilor de stare ale aerului umed

Lucrarea de laborator prezintă modul în care se realizează măsurătorile pentru determinarea mărimilor de stare ale aerului umed, precum și procedura de prelucrare și interpretare a rezultatelor obținute prin diferite metode.

**Scopul lucrării** este însușirea noțiunilor fundamentale cu privire la aerul umed.

### 6.1 Noțiuni teoretice

Atmosfera terestră reprezintă învelișul gazos, cunoscut sub numele de aer, care înconjoară globul terestru. Aerul este un amestec de diferite gaze, conținând în plus: vapori de apă, particule microscopice de origine minerală sau vegetală, ioni (corpusele încărcate cu sarcini electrice pozitive sau negative), microorganisme (bacterii, microbi), micrometeoriti și fum [37].

Din punct de vedere higrometric aerul se caracterizează în funcție de valoarea umidității relative (tabelul 6.1). În atmosferă, apa se poate afla în una din cele trei stări de agregare:

- ☞ în stare de vapori – apa este invizibilă;
- ☞ în stare lichidă – sub formă de ceață, burniță, ploaie și nori constituiți din picături de apă;
- ☞ în stare solidă – sub formă de zăpadă, cristale de gheață și grindină.

Tabel 6.1 Aerul caracterizat din punct de vedere higrometric

Dacă umiditatea relativă este:	Atunci aerul este:	
$\varphi > 100\%$	suprasaturat	
$\varphi = 100\%$	saturat	
$91 < \varphi < 99\%$	nesaturat	foarte umed
$81 < \varphi < 90\%$		umed
$51 < \varphi < 80\%$		normal
$31 < \varphi < 50\%$		uscat
$\varphi < 30\%$		Foarte uscat

Amestecul mecanic dintre aerul uscat și vaporii de apă formează aerul umed [2]:

$$\text{Aer umed} = \text{aer uscat} + \text{vapori de apă} \quad (6.1)$$

Aerul umed care conține cantitatea maximă de umiditate (de vapori de apă) se numește *aer saturat* [2]. Dacă la temperatura aerului umed ( $t_{a,um}$ ) presiunea parțială a vaporilor ( $p_{v,apă}$ ) este egală cu presiunea de saturație, iar vaporii se prezintă sub starea de vapori saturați uscați, spunem că aerul este saturat (cu vapori de apă). La temperatura aerului saturat ( $t_{a,sat}$ ) acesta conține cantitatea maximă de umiditate sub formă de vapori. Orice exces de umiditate rămâne sub formă lichidă [38]:

$$\text{Aer saturat} = \text{aer uscat} + \text{vapori saturați uscați} \quad (6.2)$$

Aerul umed care conține o cantitate mai mică de vapori de apă decât cantitatea maximă se numește *aer nesaturat* [38]. Dacă la presiunea parțială a vaporilor de apă, temperatura aerului ( $t_{a,um}$ ) este mai mare decât temperatura de saturație ( $t_{a,sat}$ ), atunci umiditatea din aer este mai mică decât cantitatea maximă, adică aerul este nesaturat (cu vapori), iar starea acestora este de vapori supraîncălziți:

$$\text{Aer nesaturat} = \text{aer uscat} + \text{vapori supraîncălziți} \quad (6.3)$$

Aerul umed care conține o cantitate mai mare de vapori de apă decât cantitatea maximă se numește *aer suprasaturat*. Dacă temperatura aerului umed ( $t_{a,um}$ ) coboară sub temperatura de saturație ( $t_{a,sat}$ ) a vaporilor cu presiunea parțială ( $p_{v,apă}$ ), excesul de umiditate se condensează sub starea de apă saturată, care poate fi înlăturată prin mijloace mecanice, așadar [38]:

$$\text{Aer suprasaturat} = \text{aer uscat} + \text{vapori saturați uscați} + \text{lichid saturat} \quad (6.4)$$

$$\text{Aer suprasaturat} = \text{aer uscat} + \text{vapori umezi} \quad (6.5)$$

Aerul umed este considerat un amestec de gaze ideale atâta timp cât nu condensează și ca urmare ecuația de stare este ecuația de stare a gazului ideal:

$$p_{a.um} \cdot V_{a.um} = m_{a.um} \cdot R_{a.um} \cdot T_{a.um} \quad (6.6)$$

unde:  $p_{a.um}$  [N/m<sup>2</sup>] este presiunea aerului umed,  $V_{a.um}$  [m<sup>3</sup>] - volumul ocupat de aerul umed,  $m_{a.um}$  [kg] - masa aerului umed,  $R_{a.um}$  [J/kg·K] - constanta de gaz perfect a aerului umed și  $T_{a.um}$  [K] - temperatura aerului umed.

În conformitate cu legea lui Dalton:

$$P_{a.um} = P_{a.us} + P_{v.apa} \quad (6.7)$$

se pot defini următoarele tipuri de presiuni:

- presiunea totală sau presiunea aerului umed ( $p_{a.um}$ ) este presiunea exercitată de aerul umed, deci de amestecul dintre aerul uscat și vaporii de apă;
- presiunea parțială a aerului uscat ( $p_{a.us}$ ) este presiunea pe care ar exercita-o aerul uscat din amestec, dacă la aceeași temperatură ar ocupa singur întregul volum al amestecului, sau:

$$P_{a.us} = P_{a.um} \cdot r_{a.us} \quad (6.8)$$

unde:  $r_{a.us}$  [-] este participația volumică a aerului uscat.

- presiunea parțială a vaporilor de apă ( $p_{v.apa}$ ) este presiunea pe care ar exercita-o vaporii de apă, dacă la aceeași temperatură ar ocupa singuri întregul volum al amestecului, sau:

$$P_{v.apa} = P_{a.um} \cdot r_{v.apa} \quad (6.9)$$

unde:  $r_{v.apa}$  [-] este participația volumică a vaporilor de apă.

Presiunea parțială a vaporilor de apă, este cu atât mai mare cu cât cantitatea de vapori conținută de aerul umed este mai mare [39]. Presiunea parțială a vaporilor de apă în aerul atmosferic este foarte mică și în consecință este posibilă evaporarea apei la o temperatură mult inferioară temperaturii de vaporizare la presiunea normală fizică de 101325N/m<sup>2</sup>, când  $t=100^{\circ}\text{C}$ . Pe fenomenul de evaporare superficială se bazează existența vaporilor de apă din aerul atmosferic la temperaturi scăzute (chiar sub 0°C) [2].

În cele mai multe aplicații, presiunea totală a aerului umed este considerată de fapt egală cu presiunea barometrică ( $p_b$ ) a locului unde se desfășoară măsurătoarea și care este influențată de: altitudine, condițiile meteorologice și poziția geografică pe globul terestru:

$$P_{a.um} = P_b \quad (6.10)$$

Presiunea parțială a aerului uscat se poate determina și în funcție de umiditatea absolută ( $x$ ):

$$P_{a.us} = \frac{0,622 \cdot p_{a.um}}{0,622 + x} \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (6.11)$$

Presiunea parțială a vaporilor de apă se poate determina și în funcție de umiditatea absolută ( $x$ ), adică de raportul dintre masa vaporilor de apă și masa aerului uscat, sau în funcție de umiditatea relativă ( $\varphi$ ) și presiunea de saturație:

$$P_{v.apa} = \frac{P_{a.um} \cdot x}{0,622 + x} = \varphi \cdot P_{sat} \quad (6.12)$$

*Umiditatea absolută* ( $x$ ) denumită și *gradul de umiditate* sau *conținutul de umiditate* este raportul dintre masa vaporilor de apă ( $m_{v.apa}$ ) și masa aerului uscat ( $m_{a.us}$ ):

$$x = \frac{m_{v.apa}}{m_{a.us}} \left[ \frac{\text{kg umiditate}}{\text{kg a.us}} \right] [-] \quad (6.13)$$

$$x = \frac{M_{v.apa}}{M_{a.us}} \cdot \frac{P_{v.apa}}{P_{a.um} - P_{sat}} \left[ \frac{\text{kg umiditate}}{\text{kg a.us}} \right] [-] \quad (6.14)$$

unde:  $x$  [-] este umiditatea absolută,  $M_{v.apa}$  și  $M_{a.us}$  sunt masele molare ale vaporilor de apă și ale aerului uscat,  $p_{v.apa}$  și  $p_{sat}$  sunt presiunea parțială respectiv presiunea de saturație a vaporilor de apă [2]. Semnificația fizică a umidității absolute este cantitatea de vapori de apă conținută într-un volum de aer umed, în care există 1 kg de aer uscat [39].

Umiditatea absolută la starea de saturație se determină cu relația:

$$x_{\text{sat}} = 0,622 \cdot \frac{p_{\text{sat}}}{p_{\text{a.um}} - p_{\text{sat}}} \left[ \frac{\text{kg umiditate}}{\text{kg a.us}} \right] [-] \quad (6.15)$$

Umiditatea relativă ( $\varphi$ ) a aerului umed este raportul dintre cantitatea de vapori existentă în aer și cantitatea maximă de vapori de apă pe care o poate absorbi aerul la acea temperatură [2]:

$$\varphi = \frac{p_{\text{v.apa}}}{p_s} \cong \frac{p_{\text{v.apa}}}{p_{\text{sat}}} [-] \quad (6.16)$$

sau raportul dintre presiunea parțială a vaporilor de apă și presiunea de saturație [38].

Gradul de saturație ( $\psi$ ) se definește cu relația:

$$\psi = x/x_{\text{sat}} [-] \quad (6.17)$$

în practică se consideră  $\psi = \varphi$ . De unde rezultă că umiditatea absolută se poate determina și cu relația:

$$x = x_{\text{sat}} \cdot \varphi [-] \quad (6.18)$$

Densitatea aerului umed se determină din relația:

$$\rho_{\text{a.um}} = \frac{34,83 \cdot p_{\text{a.um}} - 13,15 \cdot p_{\text{v.apa}}}{10^4 \cdot T_{\text{a.um}}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (6.19)$$

Volumul specific (masic) al aerului umed se definește cu relația:

$$v_{\text{a.um}} = \frac{1}{\rho_{\text{a.um}}} = \frac{10^4 \cdot T_{\text{a.um}}}{34,83 \cdot p_{\text{a.um}} - 13,15 \cdot p_{\text{v.apa}}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (6.20)$$

Pentru că aerul umed, la fel ca și aerul uscat, poate fi considerat un amestec de gaze perfecte pot fi definite mai multe tipuri de temperaturi:

- ☞ temperatura termometrului uscat ( $t_{\text{uscat}}$ ) este temperatura aerului umed, măsurată cu un termometru uzual, indiferent de principiul de funcționare al acestuia. În principiu, atunci când nu se fac precizări specifice, prin temperatura aerului umed se înțelege temperatura termometrului uscat.
- ☞ temperatura termometrului umed ( $t_{\text{umed}}$ ) sau temperatura de saturație ( $t_{\text{sat}}$ ) este temperatura măsurată cu ajutorul unui termometru având elementul termosensibil înfășurat într-o pânză sau într-un tifon umezit și care reprezintă o sursă de umiditate. Prezența tifonului umezit, face ca acest termometru să fie denumit termometru umed [39].

Temperatura termometrului umed este mai mică decât cea indicată de termometrul uscat, deoarece până la saturație, aerul preia vapori de la tifonul îmbibat cu apă și implicit de la rezervorul termometrului umed. Temperatura termometrului umed va fi cu atât mai coborâtă cu cât aerul este mai sărac în vapori de apă și va indica aceeași temperatură cu cea a termometrului uscat când aerul este saturat cu vapori de apă [40]. Aerul umed are întotdeauna tendința de a deveni saturat. Astfel, dacă există o sursă de umiditate (ca de exemplu apa conținută de tifonul din jurul elementului termosensibil al termometrului umed) în jurul acestei surse de umiditate are loc un proces de evaporare parțială a apei. Ca efect se va constata creșterea locală a presiunii parțiale a vaporilor de apă [39].

- ☞ temperatura punctului de rouă ( $t_{\text{rouă}}$ ) este temperatura la care vaporii de apă din aer ating saturația (temperatura de condensare) [41], sau temperatura de saturație a aerului umed care se răcește, păstrându-și umiditatea absolută ( $x$ ) constantă [2]:

$$t_{\text{rouă}} = t_{\text{sat}} = t_{\text{umed}} \quad (6.21)$$

Temperatura punctului de rouă ( $t_{\text{rouă}}$ ) este temperatura de saturație a aerului umed care se răcește, păstrându-și umiditatea absolută ( $x$ ) constantă. Punctul de rouă se poate calcula astfel: cunoscându-l pe  $x$ , se determină  $p_{\text{v.apă}}$  cu relația (6.12), iar din tabelul 6.3 se citește temperatura corespunzătoare acestei presiuni, considerand-o egală cu  $p_{\text{sat}}$ .

Căldura specifică la presiune constantă a aerului umed este:

$$c_p = \frac{c_{\text{pa.us}} + x \cdot c_{\text{pv.apa}}}{1 + x} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (6.22)$$

unde:  $c_{\text{pa.us}}$  este căldura specifică medie a aerului uscat între 0 și 50°C,  $c_{\text{pa.us}} = 1,0106 \text{kJ}/(\text{kgK})$ ;  $c_{\text{pv.apă}}$  - căldura specifică medie a vaporilor de apă între 0 și 75°C,  $c_{\text{pv.apă}} = 1,866 \text{kJ}/(\text{kgK})$ .

Entalpia amestecului a 1 kg aer uscat și x kg vapori de apă este:

$$H_{1+x} = c_{pa.us} \cdot t_{uscat} + x \cdot (c_{pa.us} \cdot t_{uscat} + 2512) \quad [\text{kJ}/(1+x)\text{kg amestec}] \quad (6.23)$$

Entalpia specifică a 1 kg de aer umed va fi:

$$h = \frac{H_{1+x}}{1+x} = \frac{c_{pa.us} \cdot t_{uscat} + x \cdot (c_{pa.us} \cdot t_{uscat} + 2512)}{1+x} \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg a.um}} \right] \quad (6.24)$$

Termenul (1+x) semnifică faptul că la 1kg de aer uscat corespund x kg vapori, aerul umed rezultat din amestec având (1+x) kg.

## 6.2 Aparate utilizate pentru determinarea mărimilor aerului umed

Higrometrul este aparatul cu care se poate măsura umiditatea relativă a aerului umed. Principiul de măsură se bazează pe proprietatea materialelor higroscopice de a se deforma în funcție de umiditate. Materialul higroscopic utilizat de obicei este firul de păr uman, blond degresat [42]. Când umiditatea este crescută, firul de păr utilizat ca și element sensibil, se întinde foarte mult.

Psicrometrul măsoară temperatura aerului umed cu ajutorul termometrului uscat, respectiv o temperatură apropiată de temperatura adiabatică cu ajutorul termometrului umed. Mărimile de stare ale aerului umed se obțin prin calcul, din tabele sau din diagrame.

Psicrometrul cu ventilator de tip Asmann (Fig. 6.1) este cel mai utilizat și se compune dintr-un termometru uscat (în partea stângă) și un termometru umed (în partea dreaptă). Elementul sensibil al termometrului umed este înfășurat într-o pânză higroscopică (tifon) care se umezește înainte de efectuarea măsurătorilor. Ambele termometre sunt protejate lateral față de radiațiile termice prin ecrane cu indice de reflexie ridicat, ceea ce înseamnă că se pot efectua determinări chiar dacă instrumentul este expus la soare. Nu are însă protecție frontală [43]. Carcasa are în partea de jos o deschidere inelară, întreruptă din loc în loc, care servește pentru evacuarea aerului aspirat. Lateral, carcasa prezintă un orificiu circular [44]. Capetele termometrelor sunt scaldate de curentul de aer umed aspirat de către un mic ventilator, acționat cu ajutorul unui resort metalic. Datorită evaporării, temperatura indicată de termometrul umed ( $t_{umed}$ ) este mai mică decât temperatura indicată de termometrul uscat ( $t_{uscat}$ ). Pentru pornirea psicrometrului cu ventilator de tip Asmann, se armează arcul din partea superioară a aparatului cu ajutorul cheii. După aproximativ trei minute se pot efectua citirile celor două termometre. Psicrometrul se va opri singur după derularea completă a arcului.

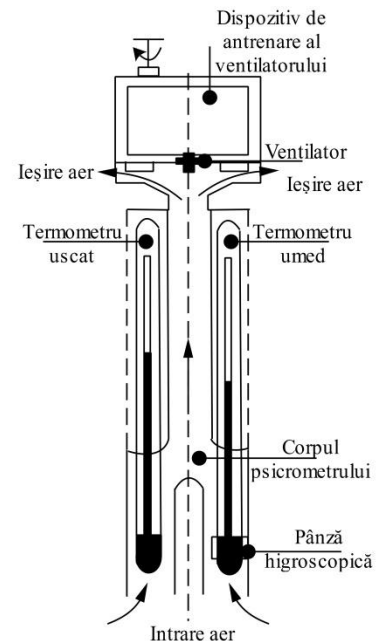


Fig. 6.1 Psicrometru cu ventilator de tip Asmann

Dacă  $t_{uscat}$  este temperatura indicată de termometrul uscat, iar  $t_{umed}$  reprezintă temperatura indicată de termometrul umed în timpul măsurătorii, atunci diferența psihometrică de temperatură ( $\Delta t_{psi}$ ) va fi:

$$\Delta t_{psi} = t_{uscat} - t_{umed} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.25)$$

Diferența psihometrică de temperatură și temperatura indicată de termometrul uscat servesc la determinarea umidității relative din tabelul 6.2.

Umiditatea relativă a aerului umed se poate determina și cu relația:

$$\varphi = \frac{p_{sat} - C \cdot \frac{p_b}{p_N} \cdot \Delta t_{psi}}{p_{sat}} \quad [-] \quad (6.26)$$

unde:  $p_{sat}$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ] este presiunea parțială a vaporilor de apă saturați conținuți de aer, la temperatura  $t_{umed}$  (tabelul 6.3);  $p_{sat}$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ] - presiunea parțială a vaporilor de apă saturați conținuți de aer însă la temperatura  $t_{uscat}$  (tabelul 6.3);  $p_b = p_{a.um}$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ] - presiunea barometrică și totodată și presiunea totală a aerului umed;  $p_N$  - presiunea la starea normală fizică,  $p_N = 101325 \text{ N}/\text{m}^2$ ;  $C = 85 \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  - coeficient psihometric care depinde de viteza de circulație a aerului, în cadrul lucrării se consideră că  $w = 0,6 \text{ m/s}$ .

Tabel 6.2 Umiditatea relativă a aerului [45]

Indicația termometrului uscat $t_{\text{uscat}} [^{\circ}\text{C}]$	Diferența psicrometrică $\Delta t_{\text{psi}} [^{\circ}\text{C}]$									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
10	94	88	82	77	71	66	60	55	50	44
12	94	89	84	78	73	68	63	58	53	48
14	95	90	85	79	75	70	65	60	56	51
16	95	90	85	81	76	71	67	63	58	54
17	95	90	86	81	76	72	68	64	60	55
18	95	91	86	82	77	73	69	65	61	57
19	95	91	87	82	78	74	70	65	62	58
20	96	91	87	83	78	74	70	66	63	59
21	96	91	87	83	79	75	71	67	64	60
22	96	92	87	83	80	76	72	68	64	61
23	96	92	88	84	80	76	72	69	65	62
24	96	92	88	84	80	77	73	69	66	62
25	96	92	88	84	81	77	74	70	67	63
26	96	92	88	85	81	78	74	71	67	64
27	96	92	89	85	82	78	75	71	68	65
28	96	93	89	85	82	78	75	72	69	65

Tabel 6.3 Umiditatea absolută și presiunea parțială a vaporilor de apă saturați conținuți de aer [2]

Temperatura termometrului $t_{\text{umed}} [^{\circ}\text{C}], t_{\text{uscat}} [^{\circ}\text{C}]$	Umiditatea absolută $x_{\text{sat}} \left[ \frac{\text{kg umiditate}}{\text{kg a.us}} \right]$	Presiunea parțială a vaporilor de apă saturați conținuți de aer $p_{\text{sat}}, p_{\text{sat}} \left[ \text{N/m}^2 \right]$
10	0,00788	1228,0
12	0,00902	1402,6
14	0,01030	1598,6
16	0,01174	1817,3
17	0,01254	1937,3
18	0,01337	2064,0
19	0,01425	2197,3
20	0,01519	2338,6
21	0,01618	2486,6
22	0,01724	2644,0
23	0,01833	2809,3
24	0,01951	2984,0
25	0,02077	3168,0
26	0,02209	3361,2
27	0,02347	3565,2
28	0,02493	3780,0

### 6.3 Desfășurarea lucrării, prelucrarea datelor și rezultatele măsurătorilor

Lucrarea se va desfășura prin realizarea unor măsurători practice utilizând un higrometru (inclus în termo-higro-barometru) și un psicrometru cu ventilator de tip Asmann. Mărimile citite de pe termo-higro-barometru se vor centraliza în tabelul 6.4, iar cu ajutorul diagramei h-x se vor determina parametrii de stare caracteristici valorii măsurate. În tabelul 6.5 se trec valorile măsurate pentru determinarea parametrilor de stare ai aerului umed cu psicrometrul cu ventilator de tip Asmann.

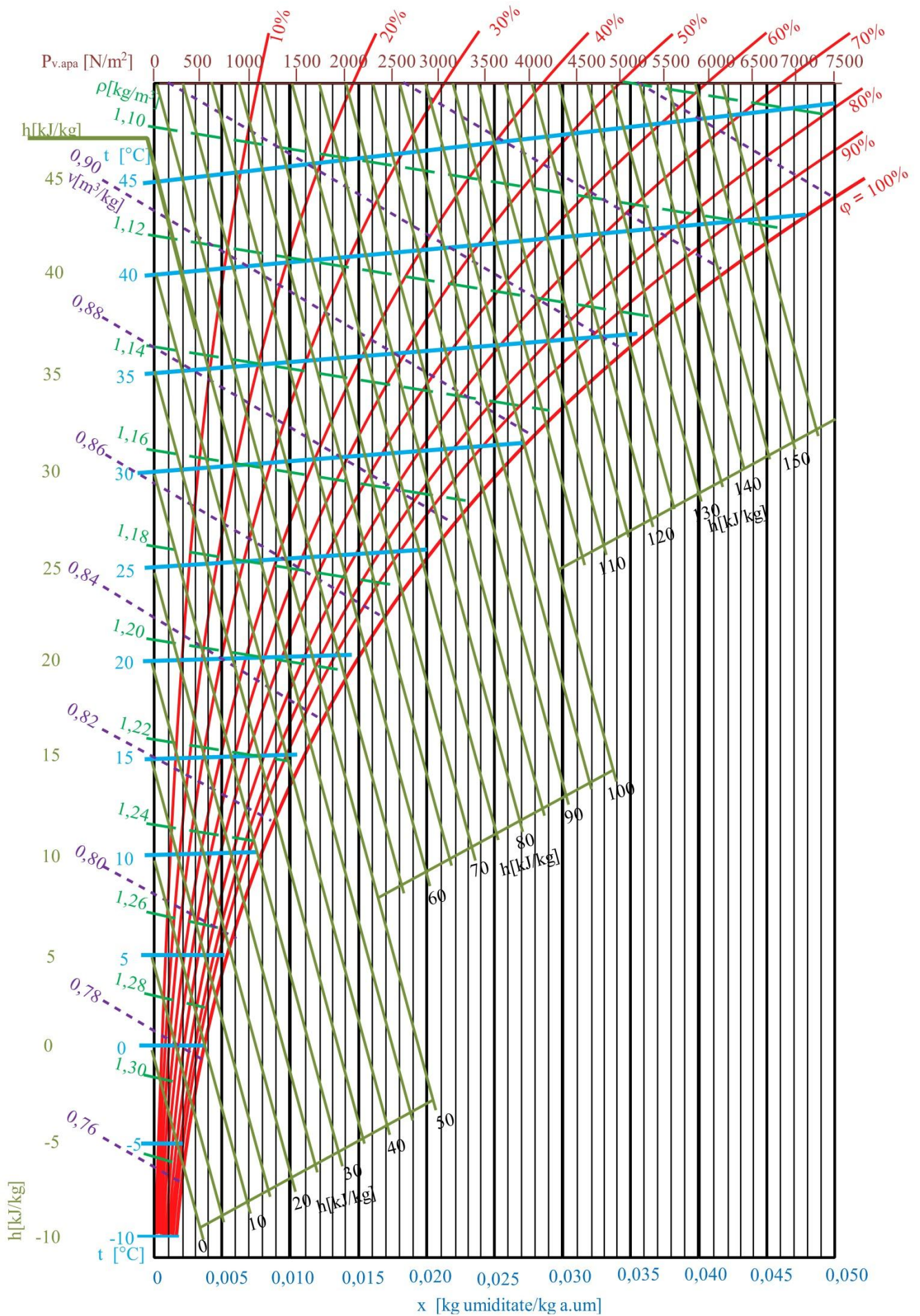


Fig. 6.2 Diagrama Mollier (h-x) a aerului umed

Tabel 6.4 Mărimile de stare ale aerului umed determinate cu termo-higro-barometru și digrama h-x

Nr.	Mărimia	Simbol	U.M.	Determinare
1.	Presiunea barometrică respectiv presiunea totală a aerului umed	$p_{a.um}=p_b$	[mbar], [hPa]	
			[N/m <sup>2</sup> ]	
2.	Temperatura termometrului uscat	$t_{uscat}$	[°C]	
3.	Umiditatea relativă a aerului umed citită	$\Phi_{higro}$	[%]	
4.	Entalpia masică a 1 kg de aer umed	$h$	[kJ/kg a.um]	
5.	Umiditatea absolută	$x$	[kg um / kg a.us]	
6.	Densitatea aerului umed	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	
7.	Volumul specific al aerului umed	$v$	[m <sup>3</sup> /kg]	
8.	Presiunea parțială a vaporilor de apă	$p_{v.apă}$	[N/m <sup>2</sup> ]	

Tabel 6.5 Mărimile de stare ale aerului umed determinate cu psicrometrul cu ventilator de tip Asmann

Nr. crt.	Mărimia	Simbol mărime	U.M.	Determinarea	
				1	2
1	Presiunea barometrică	$p_b=p_{a.um}$	[N/m <sup>2</sup> ]		
2	Temperatura aerului umed	$t_{uscat}$	[°C]		
3	Temperatura de saturație a aerului umed	$t_{umed}$	[°C]		
4	Diferența psicrometrică de temperatură (relația 6.25)	$\Delta t_{psi}$	[°C]		
5	Umiditatea absolută în funcție de $t_{umed}$ (tabelul 6.3)	$x_{sat}$	[kg um/kg a.us]		
6	Presiunea parțială a vaporilor de apă saturați în funcție de $t_{umed}$ (tabelul 6.3)	$p'_{sat}$	[N/m <sup>2</sup> ]		
7	Presiunea parțială a vaporilor de apă saturați în funcție de $t_{uscat}$ (tabelul 6.3)	$p_{sat}$	[N/m <sup>2</sup> ]		
8	Umiditatea relativă calculată a aerului umed (relația 6.26)	$\varphi$	[-]		
			[%]		
9	Umiditatea relativă a aerului umed (tabelul 6.2)	$\Phi_{psi}$	[-]		
			[%]		
10	Umiditatea absolută (relația 6.18)	$x$	[kg um/kg a.us]		
11	Presiunea parțială a aerului uscat (relația 6.11)	$p_{a.us}$	[N/m <sup>2</sup> ]		
12	Presiunea parțială a vaporilor.apă (relația 6.12)	$p_{v.apă}$	[N/m <sup>2</sup> ]		
13	Densitatea aerului umed (relația 6.19)	$\rho_{a.um}$	[kg/m <sup>3</sup> ]		
14	Volumul specific (relația 6.20)	$v_{a.um}$	[m <sup>3</sup> /kg]		
15	Căldura specifică la presiune constantă (relația 6.22)	$c_p$	[kJ/kg·K]		
16	Entalpia amestecului a 1 kg aer uscat și x kg vapori de apă (relația 6.23)	$H_{1+x}$	[kJ/(1+x)kg.am]		
17	Entalpia specifică a 1 kg de aer umed (relația 6.24)	$h$	[kJ/kg.a.um]		