

# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 15

## 1. (15.9.10.1.) Παράδειγμα προσδιορισμού των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών (υγρασία κλπ.) του εξωτερικού αέρα με εξισώσεις

Με βάση τα στοιχεία του πίνακα 2.2 της TOTEE 20701-3/2010 ή από τον πίνακα 41B του Παραρτήματος πινάκων II, προσδιορίζουμε τις συνθήκες σχεδιασμού 1% για την θερινή περίοδο για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης και έχουμε τον πίνακα 15.31.

Πίνακας 15.31. Συνθήκες σχεδιασμού θέρους 1% για τη Θεσσαλονίκη

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ 1%					
		DB 1%	MCWB		WB 1%	MCDB	
			M.T.	SD		M.T.	SD
Θεσσαλονίκη	12,8	34,5	22,7	1,5	24,0	32,2	2,3

Ημερήσια διακύμανση: Η διαφορά της μέσης μέγιστης και της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου για τον πιο θερμό μήνα του έτους.

DB (Dry Bulb) : Συνθήκες σχεδιασμού θέρους ξηρού θερμομέτρου. Θερμοκρασίες η υπέρβαση (εμφάνιση υψηλότερων τιμών αντίστοιχα) των οποίων παρατηρείται μόνο σε λιγότερο του 1% των ωρών της θερινής περιόδου (θερμότεροι μήνες: 1<sup>η</sup> Ιουνίου – 30<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου).

WB (Wet Bulb) 1%: Συνθήκες σχεδιασμού θέρους υγρού θερμομέτρου. Θερμοκρασίες η υπέρβαση (εμφάνιση υψηλότερων τιμών αντίστοιχα) των οποίων παρατηρείται μόνο σε λιγότερο του 1% των ωρών της θερινής περιόδου (θερμότεροι μήνες: 1<sup>η</sup> Ιουνίου – 30<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου).

### • Υπολογισμός με τη χρήση σχετικών εξισώσεων

Για θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου 34,5°C και υγρού θερμομέτρου 24,0°C και ατμοσφαιρική πίεση 101,325kPa θα έχουμε:

$$101,325kPa = 1013,25hPa = 1013,25mbar$$

Η μέγιστη τάση υδρατμών που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου με βάση την εμπειρική σχέση των Magnus-Tetens θα είναι:

$$e_{sw} = 6,1094 \cdot 10^{\frac{7,5T_w}{(237,3+T_w)}} = 6,1094 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot 24}{(237,3+24)}} = 29,844hPa$$

Η μερική τάση των υδρατμών με βάση τη σχέση του Regnault θα είναι:

$$e = e_{sw} - aP(t - t_w) = 29,844 - 0,00079 \cdot 1013,25(34,5 - 24) = 21,439hPa$$

και  $e = 21,439 \cdot 0,75018 = 16,083mmHg$

Η απόλυτη υγρασία θα είναι:

$$\rho_v (gr / m^3) = e (mmHg) \text{ και } e = 21,439 \cdot 0,75018 = 16,083mmHg \text{ Επομένως } \rho_v = 16,083gr / m^3$$

Ο λόγος υγρασίας  $w$  (σε  $gr/gr$  ή  $gr/kg$  ξηρού αέρα) θα είναι:

$$w = 0,622 \frac{e}{(P - e)} = \frac{0,622 \cdot 21,439}{(1013,25 - 21,439)} = 13,445 \cdot 10^{-3} \text{ gr / gr ή } 13,445 \text{ gr / kgr}$$

Η ειδική υγρασία (σε gr/gr ή gr/kg υγρού αέρα) θα είναι:

$$q = 0,622 \frac{e}{(P - 0,378e)} = \frac{0,622 \cdot 21,439}{(1013,25 - 0,378 \cdot 21,439)} = 13,267 \cdot 10^{-3} \text{ gr / gr ή } 13,267 \text{ gr / kgr}$$

Σχετική υγρασία (ΣΥ) θα είναι:

$$e_s = 6,1094 \cdot 10^{\frac{7,5T_e}{(237,3+T_e)}} = 6,1094 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot 34,5}{(237,3+34,5)}} = 54,699 \text{ hPa} \quad \Sigma Y = \left( \frac{e}{e_s} \right) 100 = \frac{21,439}{54,699} \cdot 100 = 39,194\%$$

Η θερμοκρασία του σημείου δρόσου θα είναι:

$$T_d = \frac{237,3(\log e - \log 6,1094)}{7,5 - (\log e - \log 6,1094)} \text{ και } T_d = \frac{237,3(\log 21,439 - \log 6,1094)}{7,5 - (\log 21,439 - \log 6,1094)} = 18,603^\circ \text{C}$$

Η πυκνότητα των υδρατμών θα είναι:

$$\rho_v = 0,2167 \frac{p_v}{T} = 0,2167 \frac{21,439}{273,15 + 34,5} = 0,015101 \text{ kg / m}^3$$

Η πυκνότητα του ξηρού αέρα θα είναι:

$$\rho = \rho_d = \frac{\rho_v}{\omega_v} = \frac{0,015101}{13,267 \cdot 10^{-3}} = 1,1382 \text{ kg / m}^3$$

Η πυκνότητα του υγρού αέρα θα είναι:

$$\rho = \rho_d + \rho_v = 1,1382 + 0,015101 = 1,1533 \text{ kg / m}^3$$

Ο ειδικός όγκος του υγρού αέρα θα είναι:

$$u = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,1533} = 0,867 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

### • Υπολογισμός με τη χρήση των πινάκων του Παραρτήματος Ι

Πίνακας Π2 του Παραρτήματος Ι:

Επειδή η θερμοκρασία  $34,5^\circ \text{C}$  βρίσκεται ανάμεσα στην θερμοκρασία  $34^\circ \text{C}$  και  $35^\circ \text{C}$ , θα έχουμε:

- Για θερμοκρασία  $34^\circ \text{C}$

Η πίεση κορεσμού σε θερμοκρασία  $T_{l,1} = 34^\circ \text{C}$  είναι  $P_{g1,1} = 5,318 \text{ kPa}$  και η ενθαλπία  $h_{g1} = 2563,6 \text{ kJ/kg}$

- Για θερμοκρασία  $35^\circ \text{C}$

Η πίεση κορεσμού σε θερμοκρασία  $T_{l,2} = 35^\circ \text{C}$  είναι  $P_{g1,2} = 5,629 \text{ kPa}$  και η ενθαλπία  $h_{g1,2} = 2564,6 \text{ kJ/kg}$

Με τη διαδικασία της παρεμβολής θα έχουμε:

Θερμοκρασία $T$ σε $^\circ \text{C}$	Ενθαλπία $h$ σε $\text{kJ/kg}$ (Κορ. ατμός $h_g$ )
$T_{l,1} = 34$	$h_{g1,1} = 2563,6$

$T_x=34,5$	$h_{gx}=$
$T_{l,2}=35$	$h_{gl,2}=2564,6$

$$h_{gx} = \left( \frac{T_{l,2} - T_x}{T_{l,2} - T_{l,1}} \right) h_{gl,1} + \left( \frac{T_x - T_{l,1}}{T_{l,2} - T_{l,1}} \right) h_{gl,2} \text{ και } h_{gx} = \left( \frac{35 - 34,5}{35 - 34} \right) \cdot 2563,6 + \left( \frac{34,5 - 34}{35 - 34} \right) \cdot 2564,6 = 2564,1 \text{ kJ / kg}$$

Θερμοκρασία $T$ σε $^{\circ}\text{C}$	Πίεση κορεσμού σε $\text{kPa}$
$T_{l,1}=34$	$P_{gl,1}=5,318$
$T_x=34,5$	$P_{gx} =$
$T_{l,2}=35$	$P_{gl,2}=5,629$

$$P_{gx} = \left( \frac{T_{l,2} - T_x}{T_{l,2} - T_{l,1}} \right) P_{gl,1} + \left( \frac{T_x - T_{l,1}}{T_{l,2} - T_{l,1}} \right) P_{gl,2} \text{ και } P_{gx} = \left( \frac{35 - 34,5}{35 - 34} \right) \cdot 5,318 + \left( \frac{34,5 - 34}{35 - 34} \right) \cdot 5,629 = 5,4737 \text{ kPa}$$

Για θερμοκρασία 34,5 έχουμε:

Η πίεση κορεσμού σε θερμοκρασία  $T_l = 34,5^{\circ}\text{C}$  είναι  $P_{gl}=5,4737 \text{ kPa}$  και η ενθαλπία  $h_{gl}=2564,1 \text{ kJ/kg}$

Η πίεση κορεσμού σε θερμοκρασία  $T_2 = 24^{\circ}\text{C}$  είναι  $P_{g2}=2,982 \text{ kPa}$ , η ενθαλπία  $h_{f2}=100,6 \text{ kJ/kg}$  και η ενθαλπία  $h_{fg2}=2444,9 \text{ kJ/kg}$

Η ειδική θερμότητα του υπό σταθερή πίεση αέρα στην περιοχή αυτή της θερμοκρασίας είναι  $c_p=1,007 \text{ kJ/kg.K}$  (Πίνακας Π13, Παράρτημα Πινάκων Ι).

Ο λόγος υγρασίας του αέρα θα είναι:

$$w_{v_2} = 0,622 \frac{P_{g_2}}{P_2 - P_{g_2}} = 0,622 \cdot \frac{2,982}{101,325 - 2,982} = 18,860 \cdot 10^{-3} \text{ kg νερού / kg ξηρού αέρα}$$

$$w_{v_1} = \frac{c_p (T_2 - T_1) + w_{v_2} h_{fg_2}}{h_{g_1} - h_{f_2}} = \frac{1,007 (24 - 34,5) + 18,860 \cdot 10^{-3} \cdot 2444,9}{2564,1 - 100,6} \Rightarrow$$

$$w_{v_1} = 14,425 \cdot 10^{-3} \text{ kg νερού / kg ξηρού αέρα}$$

Η σχετική υγρασία θα είναι:

$$\varphi_1 = \frac{w_{v_1} P_2}{(w_{v_1} + 0,622) P_{g_1}} = \frac{14,425 \cdot 10^{-3} \cdot 101,325}{(14,425 \cdot 10^{-3} + 0,622) 5,4737} \Rightarrow \varphi_1 = 0,41957 \text{ ή } \varphi_1 = 41,957\%$$

Η ενθαλπία του αέρα ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα θα είναι:

$$h_1 = h_{d_1} + w_{v_1} h_{v_1} \text{ ή } h_1 \cong c_p T_1 + w_{v_1} h_{g_1} = 1,007 \cdot 34,5 + 14,425 \cdot 10^{-3} \cdot 2564,1 \Rightarrow h_1 = 71,728 \text{ kJ / kg ξηρού αέρα}$$

Από τον πίνακα Π2 του Παραρτήματος Ι η πίεση κορεσμού του νερού στους  $34,5^{\circ}\text{C}$  (υπολογισμός με παρεμβολή) είναι  $P_{sat}=5,4737 \text{ kPa}$

Η πίεση των υδρατμών θα είναι:

$$P_{g @ 34,5^{\circ}C} = 5,4737 \text{ kPa} \text{ και } P_v = \phi P_{g @ 34,5^{\circ}C} = 0,41957 \cdot 5,4737 = 2,2966 \text{ kPa}$$

Η θερμοκρασία σημείου δρόσου θα είναι:

$$T_{dp} = T_{sat @ P_v} = T_{sat @ 2,2966}$$

Από τον πίνακα Π2 του Παραρτήματος Ι η πίεση κορεσμού 2,2966 kPa αντιστοιχεί σε θερμοκρασία:

Θερμοκρασία (T)	Πίεση κορεσμού (P <sub>sat</sub> )
T <sub>α</sub> =19	P <sub>α</sub> =2,1960
T <sub>χ</sub> =;	P <sub>χ</sub> =2,2966
T <sub>β</sub> =20	P <sub>β</sub> =2,3392

και με παρεμβολή έχουμε:

$$T_x = \frac{P_x (T_\beta - T_\alpha) - T_\beta P_\alpha + T_\alpha P_\beta}{P_\beta - P_\alpha} = \frac{2,2966(20 - 19) - 20 \cdot 2,1960 + 19 \cdot 2,3392}{2,3392 - 2,1960} = 19,702$$

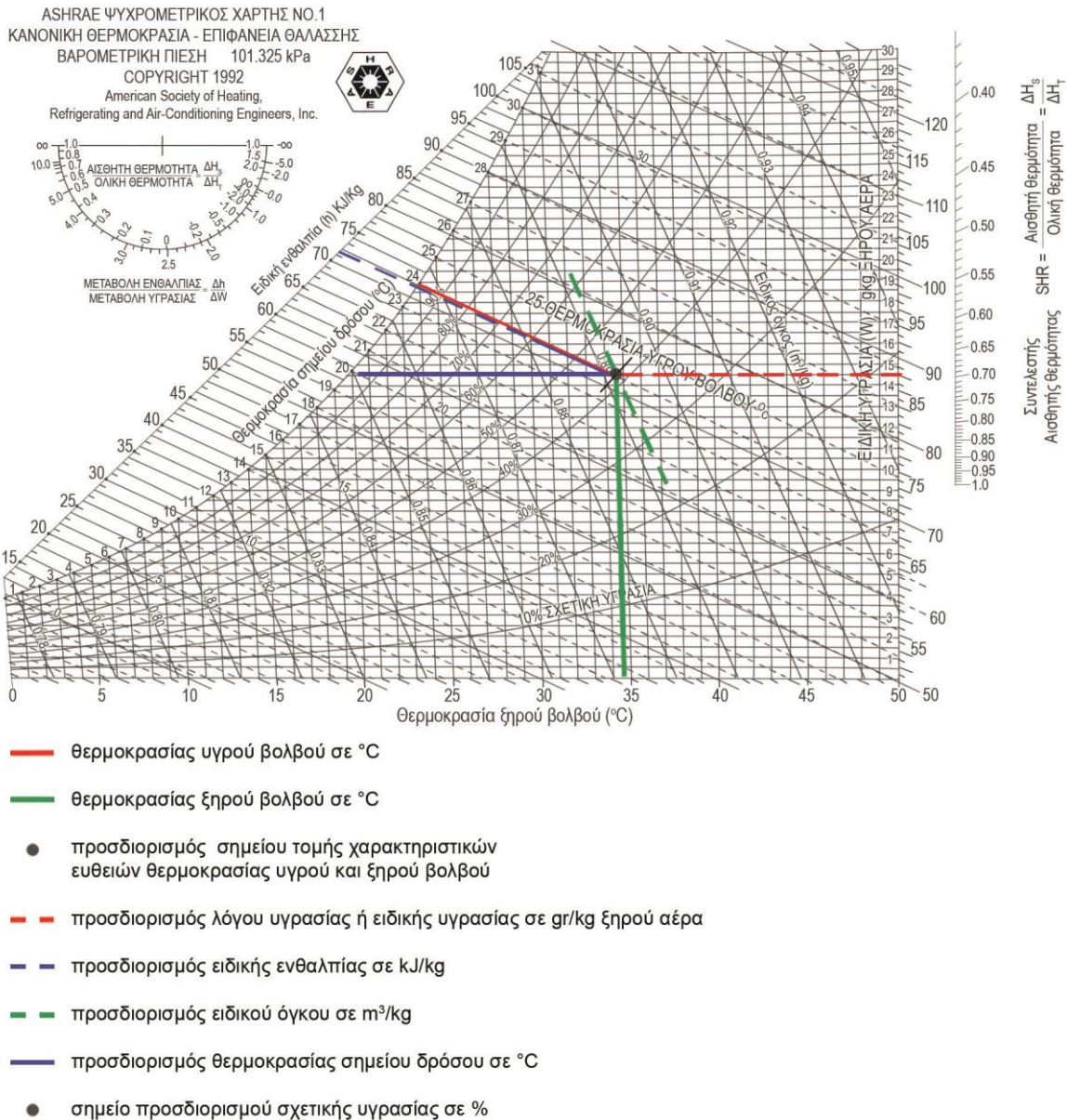
$$T_{dp} = T_{sat @ P_v} = T_{sat @ 2,2966} = 19,702^{\circ}C$$

**Σημείωση:** Για τους υπολογισμούς βλέπε και Κεφάλαιο 1 του βιβλίου.

#### • Υπολογισμός με τη χρήση του διαγράμματος της ASHRAE (Ψυχομετρικός χάρτης)

Από τον ψυχομετρικό χάρτη της ASHRAE μπορούμε να υπολογίσουμε τα θερμοδυναμικά μεγέθη του αέρα από τις θερμοκρασίες υγρού και ξηρού βολβού. Για θερμοκρασία ξηρού βολβού 34,5 °C και θερμοκρασία υγρού βολβού 24°C, με βάση τα στοιχεία του σχήματος (15.2):

1. Προσδιορίζουμε πάνω στον ψυχομετρικό χάρτη το σημείο τομής των δύο θερμοκρασιών (ξηρού και υγρού θερμομέτρου).
2. Από τις ευθείες ή καμπύλες που διέρχονται από το σημείο τομής προσδιορίζουμε τις τιμές των θερμοδυναμικών μεγεθών όπως σημειώνονται στο σχήμα (15.2) και συγκεκριμένα:
  - Σχετική υγρασία  $\phi \approx 42\%$
  - Ειδική ενθαλπία  $H$  ή  $h \approx 71,7 \text{ kJ/kg}$
  - Ειδικός όγκος αέρα  $v \approx 0,892 \text{ m}^3/\text{kg}$
  - Υγρασία  $w \approx 14,4 \text{ gr/kg}$  ξηρού αέρα
  - Σημείο δρόσου  $T_{dp} \approx 19,7^{\circ}C$



Σχήμα 15.2. Προσδιορισμός θερμοδυναμικών μεγεθών εξωτερικού αέρα πάνω στον ψυχομετρικό χάρτη

- Υπολογισμός με τις εμπειρικές σχέσεις της TOTEE 20701-3/2010 για τη μέση μηνιαία ειδική υγρασία (g/kg αέρα)

Για τον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη η θερμοκρασία αέρα  $T_a$  (είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία εικοσιτετράωρου), η μέση μηνιαία σχετική υγρασία  $RH$  (δίνεται από πίνακες ή υπολογίζεται) και η πίεση του αέρα  $P$ , η οποία θεωρείται σταθερή και ίση με 1013,25hPa.

Για την τάση των κορεσμένων ατμών ( $hPa$ ) στη θερμοκρασία αέρα  $T_a$  σε °C θα έχουμε:

$$P_{SV} = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_a}{(237,3 + T_a)}} = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot 26,8}{(237,3 + 26,8)}} = 35,246 hPa$$

όπου,  $P_{SV}$  είναι η τάση των κεκορεσμένων ατμών σε (hPa) και  $T_a$  είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία εικοσιτετράωρου (στοιχεία από πίνακα 3.1 της TOTEE 20701-3/2010). Με βάση τα στοιχεία του πίνακα (3.1) της παραπάνω Τεχνικής Οδηγίας για την Θεσσαλονίκη και για τον μήνα Ιούλιο έχουμε  $T_a = 26,8^\circ C$ .

Η μέση μηνιαία σχετική υγρασία από τον πίνακα 3.9 της παραπάνω Τεχνικής Οδηγίας είναι για τον μήνα Ιούλιο και για την Θεσσαλονίκη 52,8%

Για την τάση των υδρατμών  $P_v$  σε (hPa) στην θερμοκρασία αέρα  $T_a$  θα έχουμε:

$$P_v = \frac{RH \cdot P_{sv}}{100} = \frac{52,8 \cdot 35,246}{100} = 18,61 \text{ hPa}$$

Για την αναλογία μάζας μείγματος  $MR$  θα έχουμε:

$$MR = \frac{0,622 \cdot P_v}{P - P_v} = \frac{0,622 \cdot 18,61}{1013,25 - 18,61} = 11,64 \cdot 10^{-3}$$

Για την ειδική υγρασία  $SH$  θα έχουμε:

$$SH = \frac{MR}{1 + MR} = \frac{11,64 \cdot 10^{-3}}{1 + 11,64 \cdot 10^{-3}}$$

και  $SH = 11,5 \cdot 10^{-3} \text{ gr υδρατμών / gr ξηρού αέρα ή } 11,5 \text{ gr υδρατμών / kg ξηρού αέρα}$

Από τα στοιχεία του πίνακα 3.10 της TOTEE 20701-3/2010 η μέση μηνιαία ειδική υγρασία τον μήνα Ιούλιο για τη Θεσσαλονίκη είναι 11,5 gr/kg αέρα.

**Σημείωση:** Η ειδική υγρασία  $SH$  (γραμμάρια υδρατμών/kg ξηρού αέρα) είναι μία παράμετρος που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, ιδιαίτερα όταν το κτίριο διαθέτει συστήματα κλιματισμού με διαχείριση αέρα (κεντρική κλιματιστική μονάδα). Με βάση τις μετρήσεις της EMY, υπολογίστηκε η μέση μηνιαία ειδική υγρασία (gr/ kg αέρα) για διάφορες περιοχές της Ελλάδας, όπως δίνονται στον πίνακα 3.10 της TOTEE 20701-3/2010.