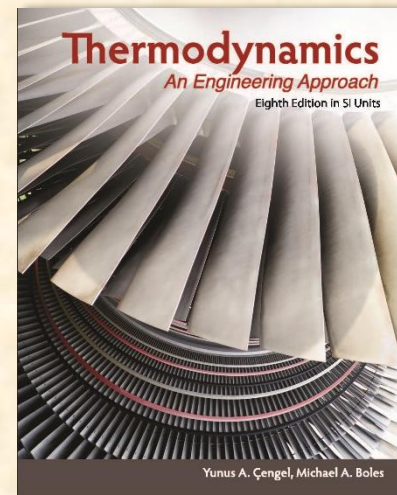


Θερμοδυναμική για Μηχανικούς  
8<sup>η</sup> έκδοση  
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles  
Εκδόσεις Τζιόλα, 2015



## Κεφάλαιο 14

# Μείγματα αερίου – ατμού & Κλιματισμός

Επιμέλεια διαφάνειας  
**Mehmet Kanoglu**

Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης  
**Δημήτρης Τερτίπης**

# Στόχοι

- Διαφοροποίηση των εννοιών του *ξηρού αέρα* και του *ατμοσφαιρικού αέρα*.
- Ορισμός & υπολογισμός του λόγου υγρασίας και της σχετικής υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα του ατμοσφαιρικού αέρα.
- Υπολογισμός της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου του ατμοσφαιρικού αέρα.
- Συσχέτιση της θερμοκρασίας αδιαβατικού κορεσμού και της θερμοκρασία υγρού βολβού του ατμοσφαιρικού αέρα.
- Χρήση του ψυχομετρικού χάρτη, ως εργαλείου προσδιορισμού των ιδιοτήτων του ατμοσφαιρικού αέρα.
- Εφαρμογή των αρχών διατήρησης της μάζας & της ενέργειας σε διάφορες διεργασίες κλιματισμού.

# Ξηρός & ατμοσφαιρικός αέρας

**Ατμοσφαιρικός αέρας:** είναι ο αέρας της ατμόσφαιρας που περιέχει μια ποσότητα υδρατμού  
Air in the atmosphere containing some water vapor (ή υγρασίας).

**Ξηρός αέρας:** είναι αέρας που δεν περιέχει καθόλου υγρασία.

Η υγρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη ευεξία, επομένως θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν κατά τους υπολογισμούς κλιματισμού.

$$h_{\text{dry air}} = c_p T = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) T \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\Delta h_{\text{dry air}} = c_p \Delta T = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \Delta T \quad (\text{kJ/kg})$$

Ο υδρατμός συμπεριφέρεται σαν να ήταν μόνος του και υπακούει στην εξίσωση του ιδανικού αερίου  $Pv = RT$ . Έτσι, ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί θεωρηθεί ως μείγμα ιδανικών αερίων:

$$P = P_a + P_v \quad (\text{kPa})$$

$P_a$  Μερική πίεση του αέρα

$P_v$  Μερική πίεση του υδρατμού

Ξηρός αέρας	
$T, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
-10	1.0038
0	1.0041
10	1.0045
20	1.0049
30	1.0054
40	1.0059
50	1.0065

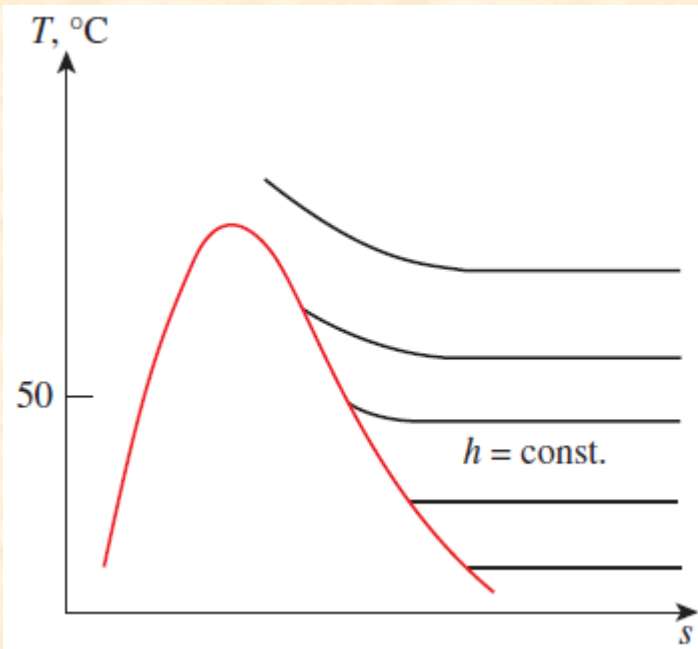
Η ειδική θερμότητα του αέρα μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, ίση με  $1,005 \text{ kJ/kgK}$  μεταξύ των θερμοκρασιών  $-10^\circ\text{C}$  και  $50^\circ\text{C}$ , με σφάλμα μικρότερο του 0,2%

Για το νερό:

$h_g = 2500.9$  kJ/kg στους  $0^\circ\text{C}$

$c_{p,avg} = 1.82$  kJ/kg $\cdot^\circ\text{C}$  μεταξύ  $-10^\circ\text{C}$  και  $50^\circ\text{C}$

$$h_g(T) \cong 2500.9 + 1.82T \quad (\text{kJ/kg}) \quad T \text{ in } ^\circ\text{C}$$



Σε θερμοκρασίες κάτω των  $50^\circ\text{C}$ , οι ισενθαλπικές καμπύλες του υπέρθερμου ατμού παραλληλίζονται προς τις αντίστοιχες ισοθερμοκρασιακές.

$h = h(T)$ , μιας κι ο υδρατμός συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο

$T, ^\circ\text{C}$	Υδρατμός		Διαφορά, kJ/kg
	$h_g, \text{kJ/kg}$		
	Πίνακας A-4	Eq. 14-4	
-10	2482.1	2482.7	-0.6
0	2500.9	2500.9	0.0
10	2519.2	2519.1	0.1
20	2537.4	2537.3	0.1
30	2555.6	2555.5	0.1
40	2573.5	2573.7	-0.2
50	2591.3	2591.9	-0.6

Στην περιοχή θερμοκρασιών μεταξύ  $-10^\circ\text{C}$  και  $50^\circ\text{C}$ , η ενθαλπία του υδρατμού μπορεί να προσδιοριστεί από την παραπάνω εξίσωση με αμελητέο σφάλμα.

# Λόγος υγρασίας & Σχετική υγρασία

**Λόγος υγρασία:** είναι η μάζα του υδρατμού που εμπεριέχεται στη μονάδα μάζας του ξηρού αέρα

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$$

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v}$$

**Κορεσμένος αέρας:** είναι ένας αέρας κορεσμένος σε υγρασία.

**Σχετική υγρασία:** είναι ο λόγος του περιεχομένου του αέρα σε υγρασία ( $m_v$ ) προς τη μέγιστη δυνατή ποσότητα που μπορεί να περιέχει ο αέρας στην ίδια θερμοκρασία ( $m_g$ ).

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad P_g = P_{\text{sat}} @ T$$

Αέρας  
25°C, 100 kPa  
( $P_{\text{sat}, \text{H}_2\text{O}} @ 25^\circ\text{C} = 3.1698 \text{ kPa}$ )

$P_v = 0 \rightarrow$  ξηρός αέρας  
 $P_v < 3.1698 \text{ kPa} \rightarrow$  ακόρεστος αέρας  
 $P_v = 3.1698 \text{ kPa} \rightarrow$  κορεσμένος αέρας

Στον κορεσμένο αέρα, η μερική πίεση του υδρατμού ισούται με την πίεση κορεσμού του υδρατμού.



Αέρας  
25°C, 1 atm

$$m_a = 1 \text{ kg}$$

$$m_v = 0.01 \text{ kg}$$

$$m_{v, \max} = 0.02 \text{ kg}$$

$$\begin{array}{l} \text{Ειδική υγρασία: } v = 0.01 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg ξηρού}} \\ \text{Σχετική υγρασία: } f = 50\% \quad \text{αέρα} \end{array}$$

Ο λόγος υγρασίας είναι η πραγματική ποσότητα υδρατμού που περιέχεται σε 1 kg ξηρού αέρα, ενώ η σχετική υγρασία είναι ο λόγος της πραγματικής ποσότητας υγρασίας στον αέρα προς τη μέγιστη δυνατή ποσότητα υγρασίας που μπορεί να εμπεριέχει ο αέρας σε αυτή τη θερμοκρασία.

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega)P_g} \quad \omega = \frac{0.622\phi P_g}{P - \phi P_g}$$

Στις περισσότερες τεχνικές εφαρμογές, η ποσότητα του ξηρού αέρα στο μείγμα αέρα – υδρατμού παραμένει σταθερή, ενώ μεταβάλλεται η ποσότητα του υδρατμού.

Για το λόγο αυτό, η ενθαλπία του ατμοσφαιρικού αέρα εκφράζεται **ανά χιλιόγραμμα ξηρού αέρα**.

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v$$

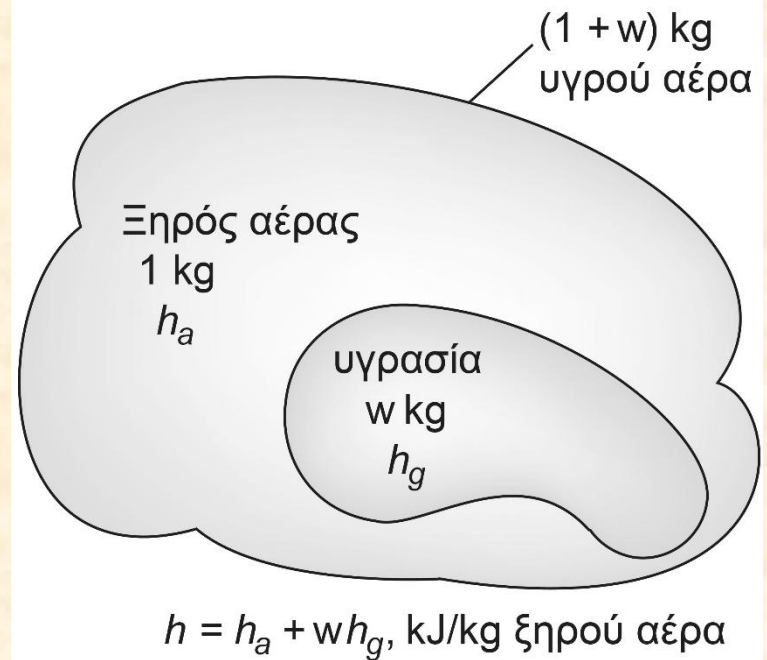
$$h = \frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + \omega h_v$$

$$h_v \cong h_g$$

$$h = h_a + \omega h_g \quad (\text{kJ/kg dry air})$$

**Θερμοκρασία ξηρού βολβού:** είναι η θερμοκρασία που δίνεται από ένα κοινό θερμόμετρο

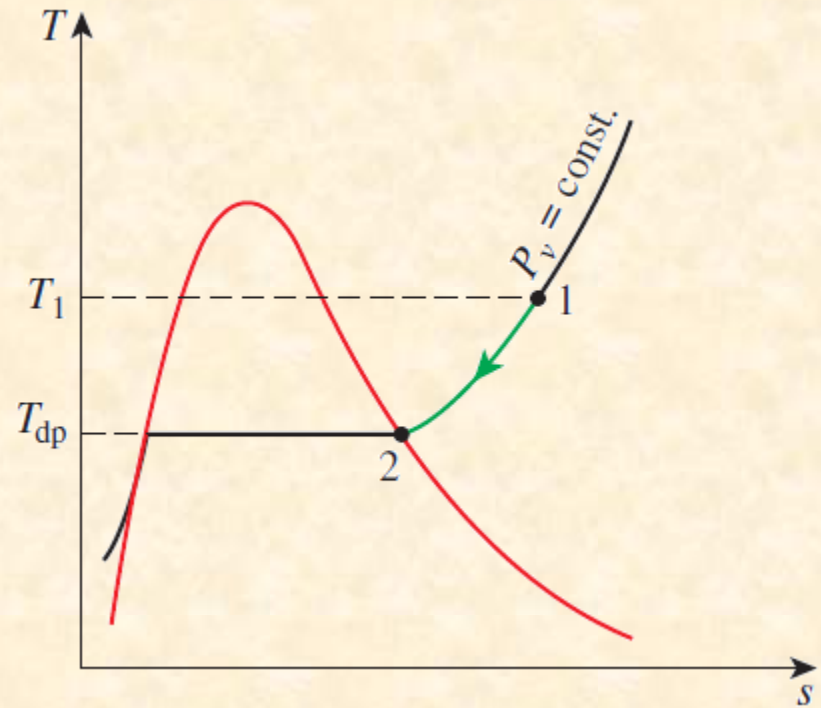
Πόση είναι η σχετική υγρασία στον ξηρό και στον κορεσμένο αέρα:



# Θερμοκρασία σημείου δρόσου

**Θερμοκρασία σημείου δρόσου  $T_{dp}$ :** είναι η θερμοκρασία, κατά την οποία αρχίζει η συμπύκνωση του υδρατμού, καθώς ο αέρας ψύχεται ισόθλιπτα (δηλαδή, η θερμοκρασία κορεσμού του νερού που αντιστοιχεί στη μερική πίεση του υδρατμού)

$$T_{dp} = T_{sat} @ P_v$$



Ισόθλιπτη ψύξη του υγρού αέρα & σημείο δρόσου, στο διάγραμμα T-s.



Όταν η θερμοκρασία του παγωμένου αναψυκτικού βρίσκεται κάτω από τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του περιβάλλοντος αέρα, τότε το μεταλλικό κουτάκι «ιδρώνει».



### **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14-2: Θάμπωμα των Παραθύρων μιας Οικίας**

Όταν ο καιρός είναι ψυχρός, η συμπύκνωση συμβαίνει συχνά στις εσωτερικές επιφάνειες των παραθύρων, εξαιτίας των χαμηλότερων θερμοκρασιών του αέρα κοντά σε αυτές. Θεωρούμε μια οικία, που απεικονίζεται στο Σχήμα 14-10, η οποία περιέχει αέρα 20°C και σχετικής υγρασίας 75%. Σε ποια θερμοκρασία παραθύρου θα αρχίσει η συμπύκνωση της υγρασίας του αέρα στις εσωτερικές επιφάνειες των παραθύρων;

**Αύση:** Ο εσωτερικός χώρος μιας οικίας διατηρείται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και σχετική υγρασία. Να προσδιοριστεί η θερμοκρασία στην οποία τα παράθυρα αρχίζουν να θαμπώνουν.

**Ιδιότητες** Η πίεση κορεσμού του νερού στους 20°C είναι  $P_{\text{sat}} = 2,3392 \text{ kPa}$  (Πίνακας A-4).

**Σχήμα 14-10:**

Σχηματικό διάγραμμα του Παραδείγματος 14-2.

**Ανάλυση** Στη γενική περίπτωση, η κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό μιας οικίας δεν είναι ομοιόμορφη. Όταν το χειμώνα μειώνεται η εξωτερική θερμοκρασία, το ίδιο συμβαίνει στην εσωτερική θερμοκρασία κοντά στους τοίχους και στα παράθυρα. Επομένως, ο αέρας κοντά στους τοίχους και στα παράθυρα παραμένει σε χαμηλότερη θερμοκρασία, σε σχέση με τους εσωτερικούς χώρους της οικίας, ακόμη και όταν η συνολική πίεση και η τάση ατμών διατηρούνται σταθερές σε κάθε σημείο της οικίας. Ως αποτέλεσμα, ο αέρας κοντά στους τοίχους και στα παράθυρα υφίσταται μία ισοβαρή διεργασία ψύξης σε πίεση  $P_v$  μέχρι η υγρασία στον αέρα να αρχίσει να συμπυκνώνεται. Αυτό θα συμβεί, όταν ο αέρας φθάσει τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του  $T_{dp}$ , που προσδιορίζεται από την Εξίσωση 14.4 και είναι

$$T_{dp} = T_{\text{sat}@P_v}$$

όπου

$$P_v = \phi P_{g@20^\circ\text{C}} = (0,75)(2,3392 \text{ kPa}) = 1,754 \text{ kPa}$$

Επομένως,

$$T_{dp} = T_{\text{sat}@1,754\text{kPa}} = 15,4^\circ \text{C}$$

**Συζήτηση** Παρατηρείστε ότι η εσωτερική επιφάνεια του παραθύρου θα πρέπει να διατηρείται άνω των 15,4°C εάν η συμπύκνωση στις επιφάνειες των παραθύρων πρέπει να αποφευχθεί.

# Θερμοκρασίες αδιαβατικού κορεσμού & υγρού βολβού

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$$

$$\dot{m}_{w_1} + \dot{m}_f = \dot{m}_{w_2}$$

$$\dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_f = \dot{m}_a \omega_2 \quad \rightarrow \quad \dot{m}_f = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad \rightarrow \quad \dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_{f_2} = \dot{m}_a h_2$$

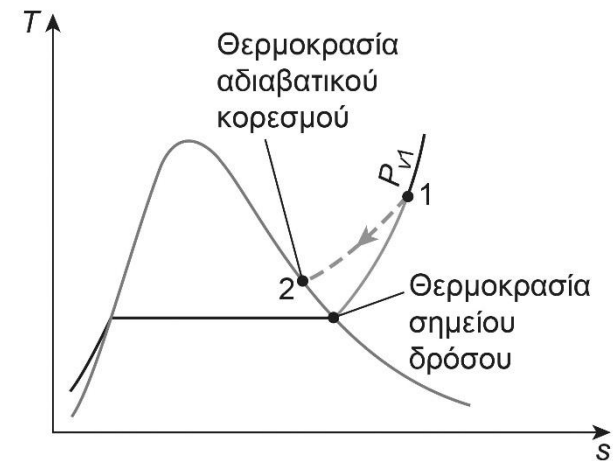
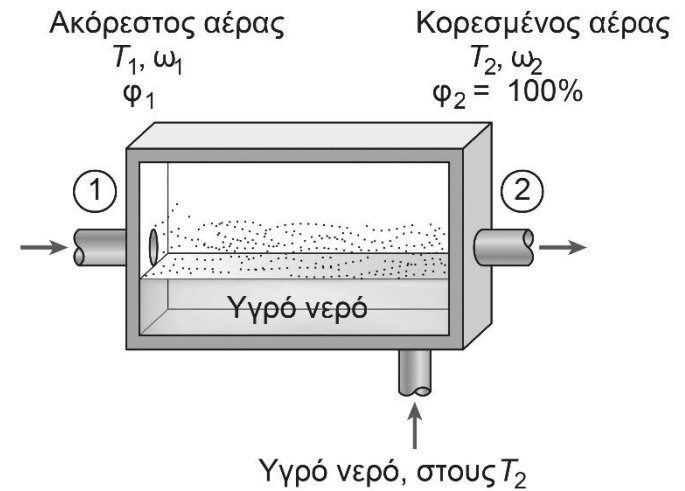
$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) h_{f_2} = h_2$$

$$(c_p T_1 + \omega_1 h_{g_1}) + (\omega_2 - \omega_1) h_{f_2} = (c_p T_2 + \omega_2 h_{g_2})$$

$$\omega_1 = \frac{c_p (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg_2}}{h_{g_1} - h_{f_2}}$$

$$\omega_2 = \frac{0.622 P_{g_2}}{P_2 - P_{g_2}}$$

Ο λόγος υγρασίας (κι η σχετική υγρασία) του αέρα υπολογίζεται από τις εξισώσεις αυτές, μετρώντας την πίεση και τη θερμοκρασία του αέρα στην εισαγωγή και την εξαγωγή της συσκευής αδιαβατικού κορεσμού.

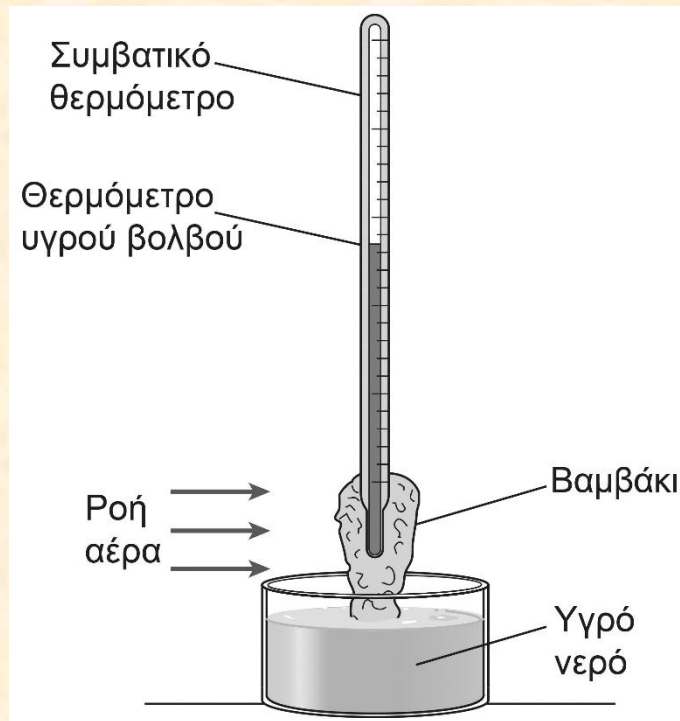


Διεργασία αδιαβατικού κορεσμού & αναπαράστασή της στο διάγραμμα T-s του νερού

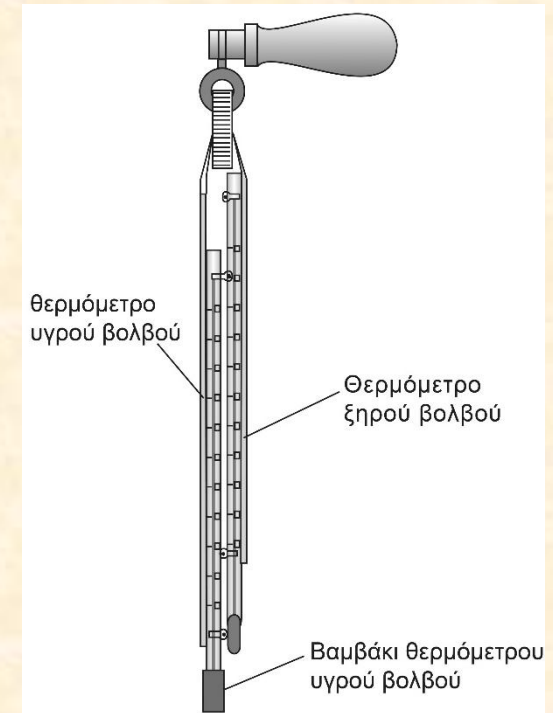
Η διεργασία του αδιαβατικού κορεσμού δεν είναι πρακτική. Για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας και του λόγου υγρασίας είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιήσουμε ένα θερμόμετρο, ο βολβός του οποίου είναι καλυμμένος με ένα βαμβάκι εμβαπτισμένο σε νερό, και να το υποβάλλουμε σε ρεύμα αέρα.

The temperature measured is the **wet-bulb temperature**  $T_{wb}$  and it is commonly used in A-C applications.

Για τον ατμοσφαιρικό αέρα, η  $T_{wb}$  σχεδόν ίση προς τη θερμοκρασία αδιαβατικού κορεσμού.



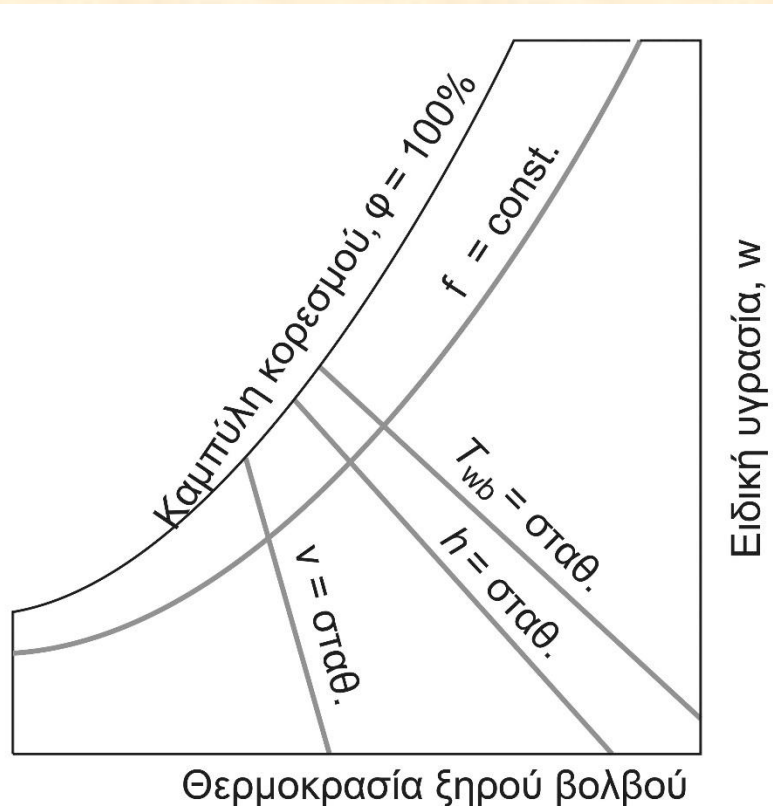
Απλή διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας υγρού βολβού



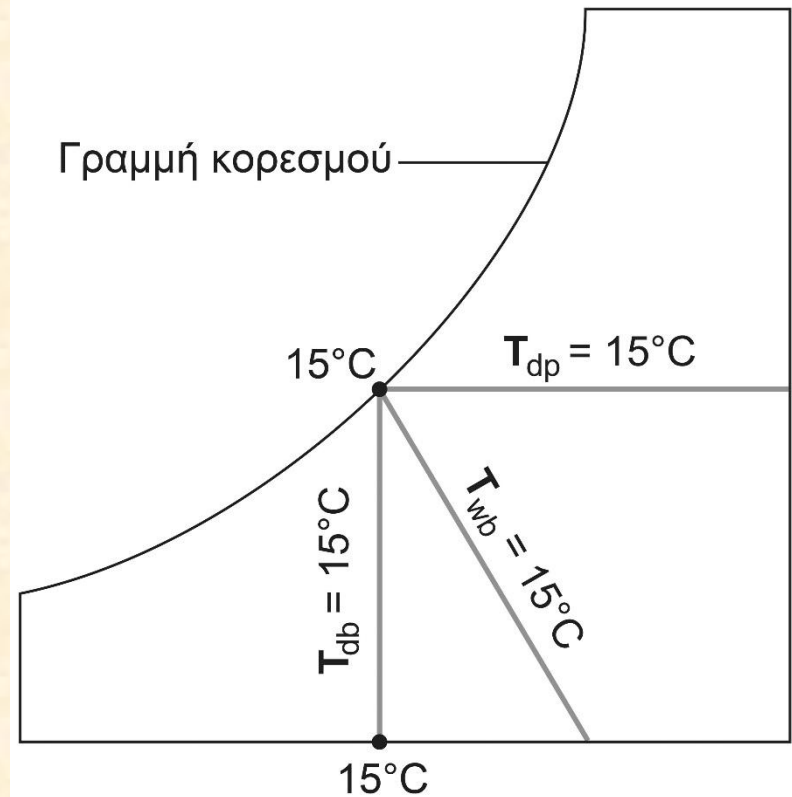
Σφενδονοειδές θερμόμετρο

# Το ψυχομετρικό διάγραμμα

**Ψυχομετρικά διαγράμματα:** εμφανίζουν τις ιδιότητες του υγρού αέρα σε εύχρηστη μορφή. Η χρήση τους είναι ευρύτατη σε εφαρμογές κλιματισμού, π.χ. θέρμανση, ψύξη και αφύγρανση.



Σχηματική μορφή ενός ψυχομετρικού διαγράμματος



Όταν ο αέρας είναι κορεσμένος, οι θερμοκρασίες ξηρού βολβού, υγρού βολβού και σημείου δρόσου ταυτίζονται.



Τα σύγχρονα συστήματα κλιματισμού μπορούν να θερμάνουν, να ψύξουν, να υγραίνουν, να αφυγρανούν, να καθαρίσουν ή και να αρωματίσουν τον αέρα, δηλαδή να *ρυθμίσουν* τον αέρα σύμφωνα με τις ανθρώπινες επιθυμίες.

Η παραγωγή θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα εξαρτάται από τη δραστηριότητά του. Ένας μέσος ενήλικος άνδρας εκπέμπει περίπου 87W όταν κοιμάται, 115W όταν κάθεται ή όταν εκτελεί καθιστική εργασία και 440W όταν εκτελεί βαριά χειρωνακτική εργασία.

Κατά τη διάρκεια ελαφριάς εργασίας ή χαλαρού βαδίσματος, περίπου το ήμισυ της παραγόμενης θερμότητας εκπνέεται ως *λανθάνουσα θερμότητα*, ενώ το άλλο ήμισυ εκπέμπεται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας ως *αισθητή θερμότητα*.

Σε περιβάλλον θερμοκρασίας 10°C, με ταχύτητα του αέρα στα 48km/h δημιουργείται αίσθημα κρύου, ίσο με εκείνο θερμοκρασίας -7°C με ταχύτητα 3km/h, συνεπεία της επίδρασης της ψύξης του σώματος από την κίνηση του αέρα.

## Ανθρώπινη ευεξία & κλιματισμός



Δε μπορούμε να επέμβουμε στον καιρό, αλλά μπορούμε να επέμβουμε σε έναν περιορισμένο χώρο με τον κλιματισμό





23°C

Άχρηστη  
θερμότητα

37°C

Η αίσθηση της άνεσης επιτυγχάνεται όταν το σώμα μπορεί να διαχέει ελεύθερα τη μη εκμεταλλεύσιμη θερμότητά του, κι όχι περισσότερη.

Η άνεση του ανθρώπινου σώματος εξαρτάται από 3 κύριους παράγοντες: **θερμοκρασία, υγρασία & κίνηση του αέρα.**

Η σχετική υγρασία σχετίζεται με τη δυνατότητα αποβολής θερμότητας από το σώμα μέσω εξάτμισης. Οι περισσότεροι άνθρωποι αισθάνονται άνετα υπό σχετική υγρασία μεταξύ 40% και 60%.

Η κίνηση του αέρα αφαιρεί το θερμό και υγρό αέρα που περιβάλλει το σώμα και τον αντικαθιστά με νωπό αέρα. Η κίνηση του αέρα θα πρέπει να είναι επαρκώς ισχυρή ώστε να απομακρύνει τη θερμότητα και την υγρασία από το άμεσο περιβάλλον του σώματος, αλλά και ταυτόχρονα τόσο «διακριτική» ώστε να μη γίνεται αντιληπτή..

Ένας σημαντικός παράγοντας που επιδρά στην άνεση είναι η μετάδοση θερμότητας δι' ακτινοβολίας μεταξύ του σώματος και των περιβαλλουσών επιφανειών (π.χ. τοίχοι & παράθυρα).

Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην άνεση είναι η καθαρότητα του αέρα, οι οσμές κι ο θόρυβος.

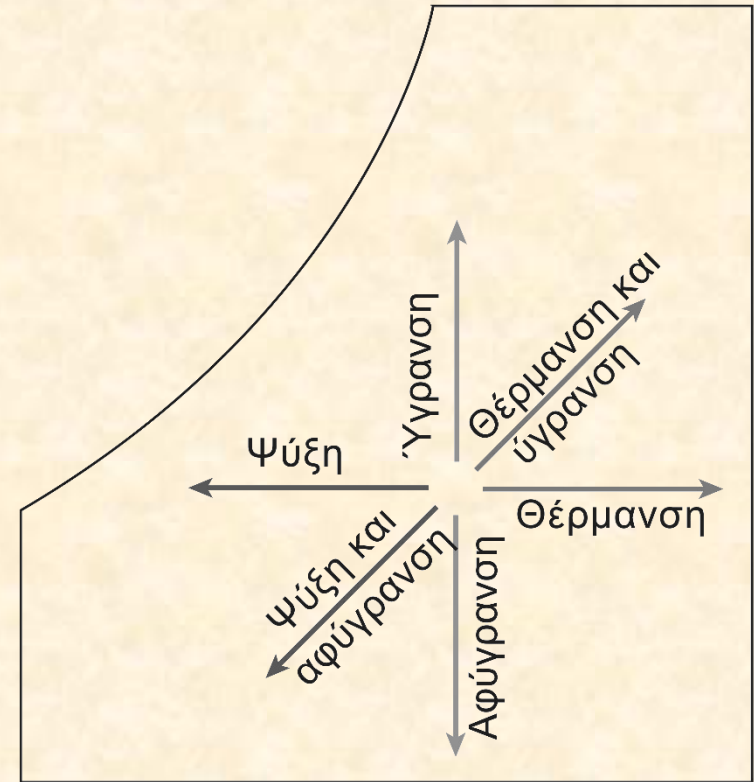
# Διεργασίες κλιματισμού

Η διατήρηση ενός χώρου διαβίωσης ή ενός βιομηχανικού χώρου στην επιθυμητή θερμοκρασία και υγρασία απαιτεί την εκτέλεση κάποιων διεργασιών, οι οποίες καλούνται *διεργασίες κλιματισμού*.

Αυτές οι θερμοκρασίες περιλαμβάνουν την *απλή θέρμανση* (αύξηση της θερμοκρασίας), την *απλή ψύξη* (μείωση της θερμοκρασίας), την *ύγρανση* (προσθήκη υγρασίας), και την *αφύγρανση* (αφαίρεση υγρασίας).

Είναι σύνηθες να απαιτούνται δύο ή περισσότερες από αυτές τις διεργασίες, ώστε ο αέρας να καταλήξει στην επιθυμητή θερμοκρασία κι υγρασία.

Κατά κανόνα, ο αέρας θερμαίνεται κι υγραίνεται κατά το χειμώνα και ψύχεται κι αφυγραίνεται κατά το καλοκαίρι.



Διάφορες διεργασίες κλιματισμού

Οι περισσότερες διεργασίες κλιματισμού μοντελοποιούνται ως διεργασίες σταθεροποιημένης ροής, με βάση τα παρακάτω ισοζύγια μάζας και ενέργειας:

Ισοζύγιο μάζας:  $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$

Ισοζύγιο μάζας για τον ξηρό αέρα:  $\sum_{in} \dot{m}_a = \sum_{out} \dot{m}_a \quad (\text{kg/s})$

Ισοζύγιο μάζας για το νερό:  $\sum_{in} \dot{m}_w = \sum_{out} \dot{m}_w$  ή  $\sum_{in} \dot{m}_a \omega = \sum_{out} \dot{m}_a \omega$

Ισοζύγιο ενέργειας:  $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m}h = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m}h$$

Ο όρος του έργου συνήθως αφορά το έργο του ανεμιστήρα, που είναι σχετικώς μικρό σε σχέση με τους υπόλοιπους όρους στο ισοζύγιο ενέργειας.

# Απλή θέρμανση και ψύξη (χωρίς ύγρανση ή αφύγρανση)

Πολλά οικιακά συστήματα θέρμανση υλοποιούνται από μια σόμπα, μια αντλία θερμότητας ή ένα ηλεκτρικό αερόθερμο. Ο αέρας θερμαίνεται ερχόμενος σε επαφή με τα θερμά αέρια ή με την ηλεκτρική αντίσταση.

Η ψύξη επιτυγχάνεται περνώντας τον αέρα από κάποια στοιχεία, εντός των οποίων ρέει ψυκτικό μέσο ή κρύο νερό.

Οι διεργασίες θέρμανσης και ψύξης χαράσσονται ως οριζόντιες γραμμές στο ψυχομετρικό διάγραμμα, αφού δε σημειώνεται προσθήκη ή αφαίρεση υγρασίας στον αέρα.

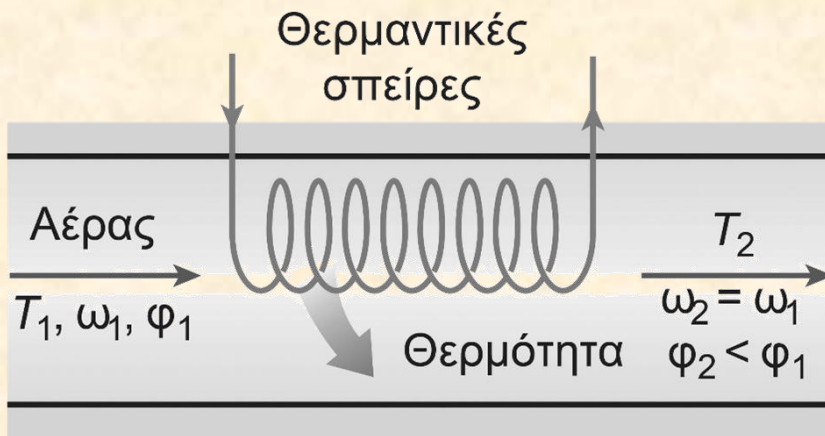
Ισοζύγιο μάζας ξηρού αέρα:

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$$

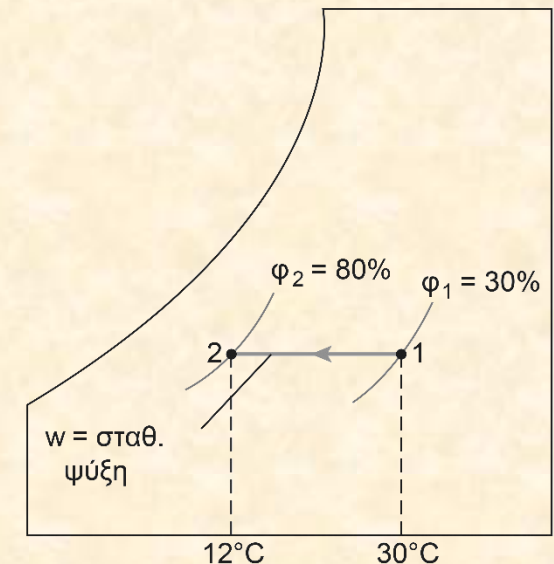
Ισοζύγιο μάζας νερού:

$$\omega_1 = \omega_2$$

Ισοζύγιο ενέργειας:  $\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1)$   $q = h_2 - h_1$



Κατά τη διάρκεια της απλής θέρμανσης, ο λόγος υγρασίας παραμένει σταθερός, όμως η σχετική υγρασία μειώνεται.



Κατά τη διάρκεια της απλής ψύξης, ο λόγος υγρασίας παραμένει σταθερός, όμως η σχετική υγρασία αυξάνεται.

## Θέρμανση με ύγρανση

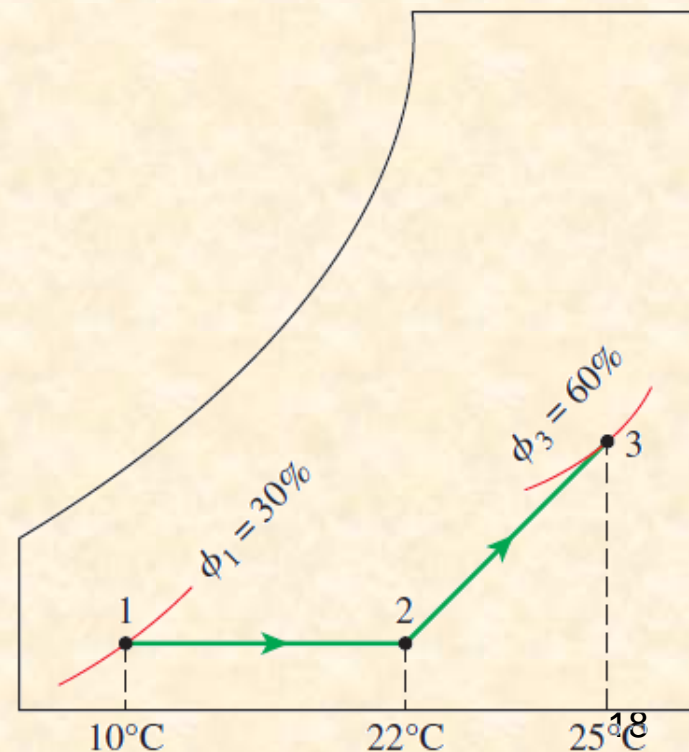
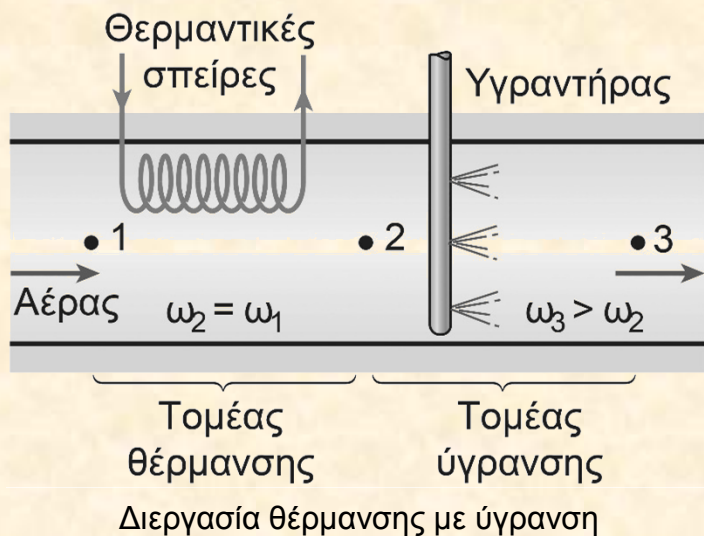
Τα προβλήματα που σχετίζονται με τη χαμηλή σχετική υγρασία κατά την απλή θέρμανση μπορούν αντιμετωπιστούν με την ύγρανση του θερμού αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται περνώντας τον αέρα πρώτα από τον τομέα θέρμανσης κι έπειτα από τον τομέα ύγρανσης.

$$e: \quad \dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$$

$$\therefore \quad \dot{m}_{a_1} \omega_1 = \dot{m}_{a_2} \omega_2 \rightarrow \omega_1 = \omega_2$$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2 \rightarrow \dot{Q}_{in} = \dot{m}_a (h_2 - h_1)$$

$$\dot{m}_{a_2} \omega_2 + \dot{m}_w = \dot{m}_{a_3} \omega_3 \rightarrow \dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_3 - \omega_2)$$





# Ψύξη με αφύγρανση

Ο λόγος του αέρα παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της απλής ψύξης, όμως η σχετική υγρασία του αυξάνεται. Αν η σχετική υγρασία φτάσει σε ανεπιθύμητα ψηλά επίπεδα, ίσως χρειαστεί να αφαιρεθεί λίγη υγρασία από τον αέρα, δηλαδή αυτός να αφυγρανθεί. Αυτό απαιτεί ο αέρας να ψυχθεί πέραν του σημείο δρόσου του.

Ισοζύγιο μάζας ξηρού αέρα:

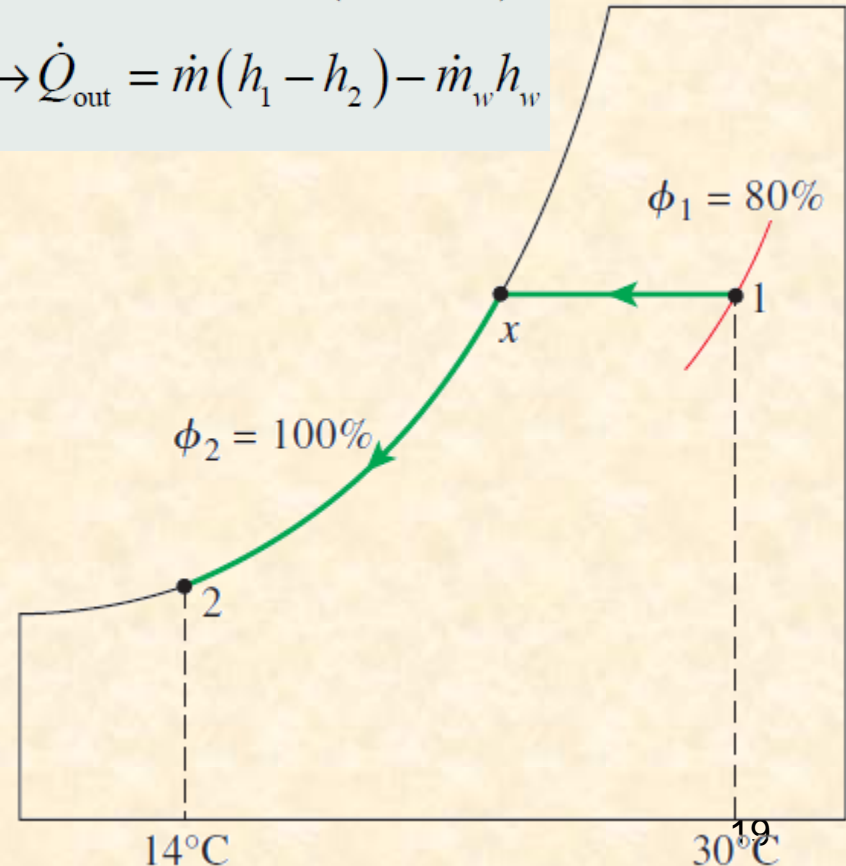
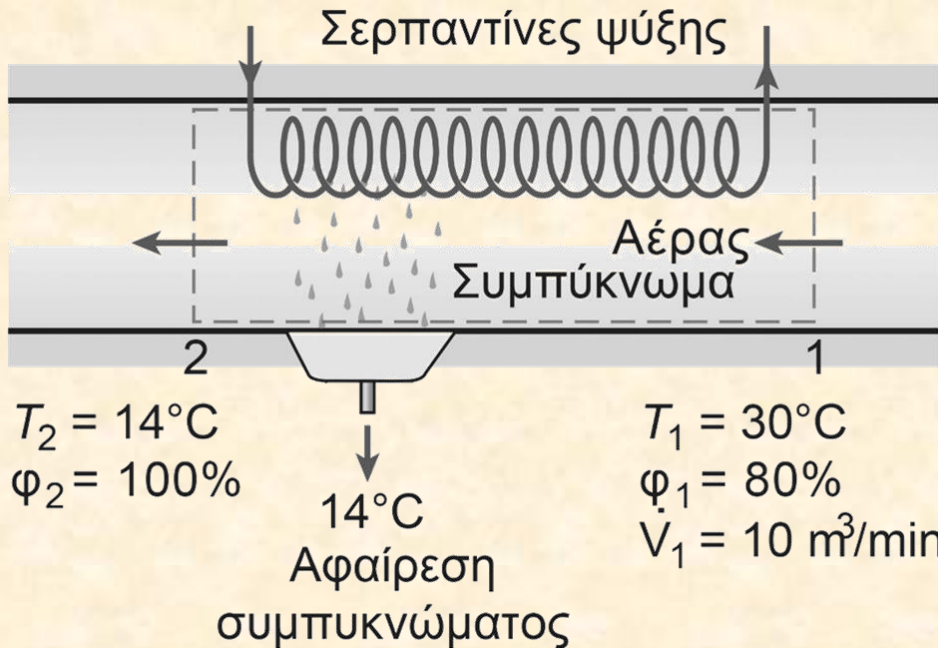
$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$$

Ισοζύγιο μάζας νερού:

$$\dot{m}_{a_1} \omega_1 = \dot{m}_{a_2} \omega_2 + \dot{m}_w \rightarrow \dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2)$$

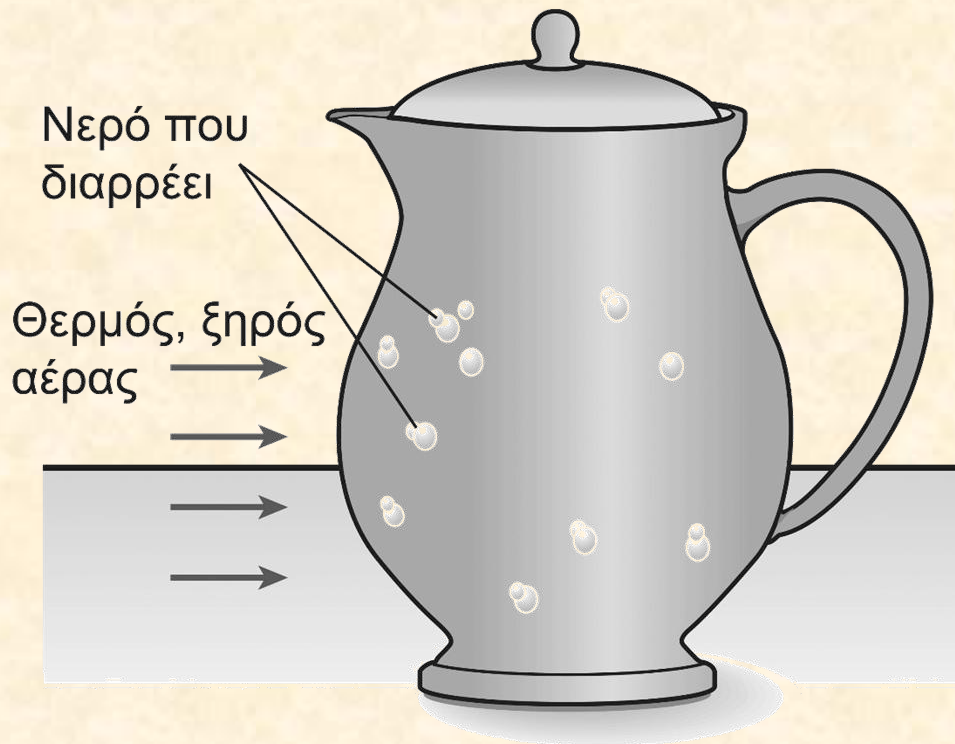
Ισοζύγιο ενέργειας:

$$\sum_{in} \dot{m}h = \dot{Q}_{out} + \sum_{out} \dot{m}h \rightarrow \dot{Q}_{out} = \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{m}_w h_w$$



Σε **θερμά και ξηρά** κλίματα, μπορούμε να αποφύγουμε το υψηλό κόστος της συμβατικής ψύξης χρησιμοποιώντας **εξατμιστικούς ψύκτες**.

Καθώς το νερό εξατμίζεται, η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης απορροφάται από το σώμα του νερού και από τον περιβάλλοντα αέρα. Ως αποτέλεσμα, τόσο το νερό, όσο κι ο αέρας ψύχονται.



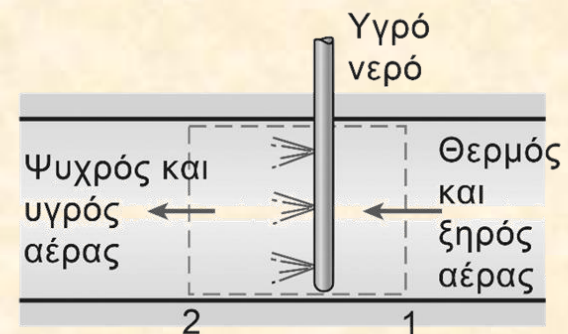
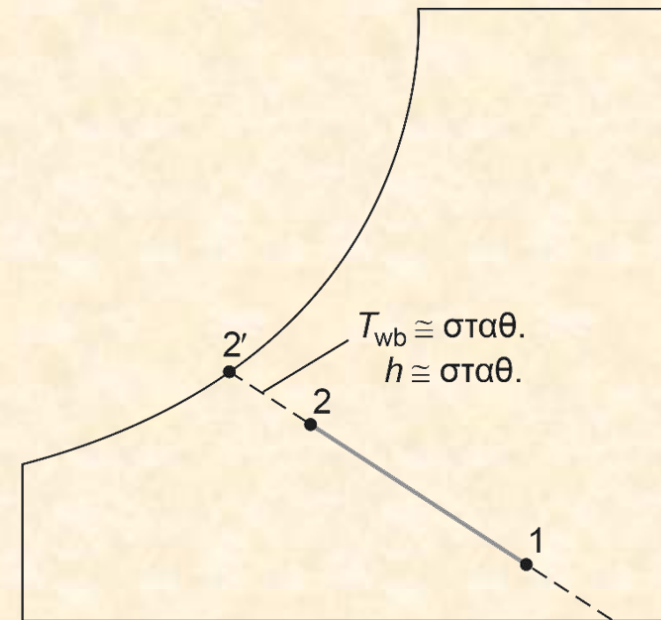
Το νερό που βρίσκεται μέσα σε μια πορώδη κανάτα, αν αφηθεί σε μια ανοιχτή και ευάερη περιοχή, θα ψυχθεί λόγω της εξατμιστικής ψύξης.

## Εξατμιστική ψύξη

Η διεργασία είναι όμοια με εκείνη του αδιαβατικού κορεσμού.

$$T_{wb} \cong \text{constant}$$

$$h \cong \text{constant}$$



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 14-7: Ψύξη με Εξάτμιση νερού με Βρεγμένο Κάλυμμα Κεφαλής

Οι κάτοικοι της ερήμου συχνά τυλίγουν τα κεφάλια τους με ένα πορώδες υφασμάτινο κάλυμμα, εμποτισμένο με νερό (Σχήμα 14-27). Σε μια τοποθεσία στην έρημο, όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι 1 atm, η θερμοκρασία 50°C, και η σχετική υγρασία 10%, ποια είναι η θερμοκρασία αυτού του υφασμάτινου καλύμματος;

**Λύση:** Οι κάτοικοι της ερήμου συχνά τυλίγουν τα κεφάλια τους με ένα πορώδες υφασμάτινο κάλυμμα, εμποτισμένο με νερό. Να προσδιοριστεί η θερμοκρασία του υφασμάτινου καλύμματος, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και σχετική υγρασία.

**Παραδοχές** Ο αέρας φεύγει από το κάλυμμα κεφαλής ως κορεσμένος.

**Ανάλυση** Το κάλυμμα κεφαλής φαίνεται στο Σχήμα 14-28. Εφόσον το κάλυμμα συμπεριφέρεται όπως η βαμβακερή επένδυση γύρω από τον υγρό βολβό ενός θερμομέτρου υγρού βολβού, η θερμοκρασία του καλύμματος θα είναι η θερμοκρασία υγρού βολβού. Υποθέτοντας ότι το υγρό νερό προσφέρεται σε μια θερμοκρασία όχι κατά πολύ διαφορετική από τη θερμοκρασία εξόδου της ροής του αέρα, η διεργασία ψύξης με εξάτμιση ακολουθεί μια γραμμή σταθερής θερμοκρασίας υγρού βολβού στο ψυχομετρικό διάγραμμα. Δηλαδή,

$$T_{wb} \approx \text{σταθερή}$$

Η θερμοκρασία υγρού βολβού, σε 1 atm, 50°C, και σχετική υγρασία 10%, προσδιορίζεται από το ψυχομετρικό διάγραμμα και βρίσκεται

$$T_2 = T_{wb} = 23,8^\circ\text{C}$$

Η διεργασία αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω μιας διεργασίας ψύξης με εξάτμιση.



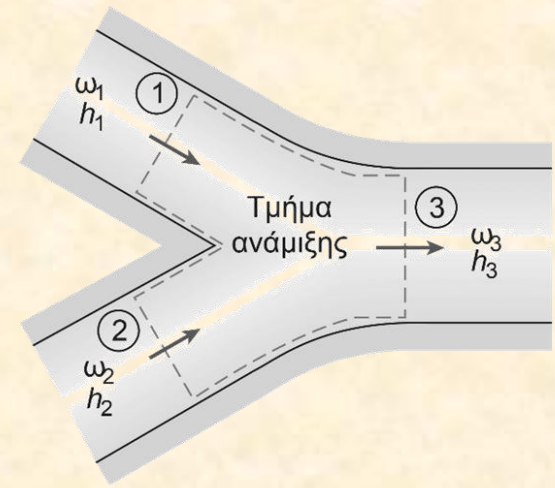
**Σχήμα 14-27:**

Το κάλυμμα της κεφαλής που εξετάζεται στο Παράδειγμα 14-7  
© Glowimages/Getty RF.



# Αδιαβατική ανάμειξη

Πολλές εφαρμογές κλιματισμού απαιτούν την ανάμειξη δύο ρευμάτων αέρα (π.χ. μεγάλα κτήρια, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, νοσοκομεία), όπου ο κλιματισμένος αέρας επιβάλλεται να αναμειγνύεται με καθορισμένη ποσότητα νωπού εξωτερικού αέρα πριν οδηγηθεί στον κλιματιζόμενο χώρο



*Μάζα ξηρού αέρα:*

$$\dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_{a_3}$$

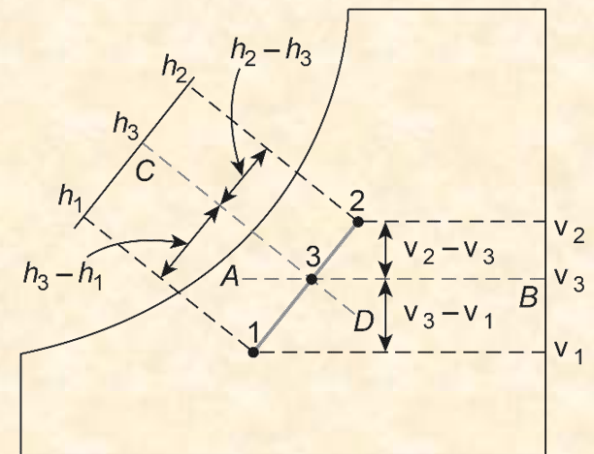
*Μάζα υδρατμού:*

$$\omega_1 \dot{m}_{a_1} + \omega_2 \dot{m}_{a_2} = \omega_3 \dot{m}_{a_3}$$

*Ενέργεια:*

$$\dot{m}_{a_1} h_1 + \dot{m}_{a_2} h_2 = \dot{m}_{a_3} h_3$$

$$\frac{\dot{m}_{a_1}}{\dot{m}_{a_2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$



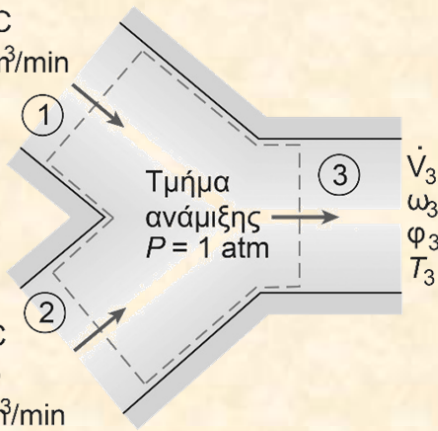
Όταν δύο ρεύματα αέρα (καταστάσεων 1 και 2) αναμειγνύονται αδιαβατικά, τότε η κατάσταση του μίγματος θα κείται επί του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέει τις δύο καταστάσεις.

# Ανάμειξη κλιματισμένου αέρα με νωπό αέρα

Κορεσμένος αέρας

$$T_1 = 14^\circ\text{C}$$

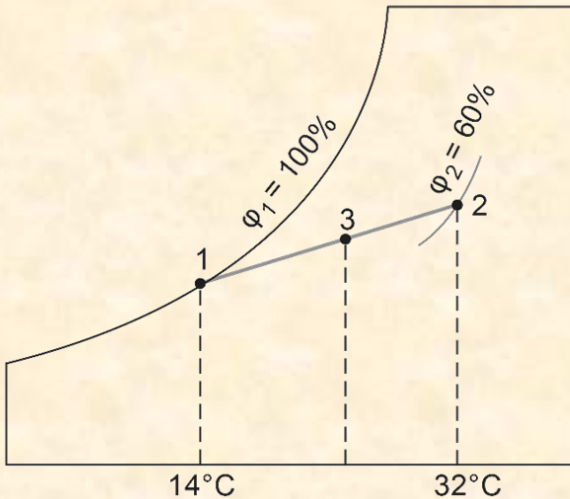
$$\dot{V}_1 = 50 \text{ m}^3/\text{min}$$



$$T_2 = 32^\circ\text{C}$$

$$\phi_2 = 60\%$$

$$\dot{V}_2 = 20 \text{ m}^3/\text{min}$$



$$h_1 = 39.4 \text{ kJ/kg dry air}$$

$$\omega_1 = 0.010 \text{ kg H}_2\text{O/kg dry air}$$

$$v_1 = 0.826 \text{ m}^3/\text{kg dry air}$$

$$h_2 = 79.0 \text{ kJ/kg dry air}$$

$$\omega_2 = 0.0182 \text{ kg H}_2\text{O/kg dry air}$$

$$v_2 = 0.889 \text{ m}^3/\text{kg dry air}$$

$$\dot{m}_{a_1} = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{50 \text{ m}^3/\text{min}}{0.826 \text{ m}^3/\text{kg dry air}} = 60.5 \text{ kg/min}$$

$$\dot{m}_{a_2} = \frac{\dot{V}_2}{v_2} = \frac{20 \text{ m}^3/\text{min}}{0.889 \text{ m}^3/\text{kg dry air}} = 22.5 \text{ kg/min}$$

$$\dot{m}_{a_3} = \dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{a_2} = (60.5 + 22.5) \text{ kg/min} = 83 \text{ kg/min}$$

$$\frac{\dot{m}_{a_1}}{\dot{m}_{a_2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$

$$\frac{60.5}{22.5} = \frac{0.0182 - \omega_3}{\omega_3 - 0.010} = \frac{79.0 - h_3}{h_3 - 39.4}$$

$$\omega_3 = \mathbf{0.0122 \text{ kg H}_2\text{O/kg dry air}}$$

$$h_3 = 50.1 \text{ kJ/kg dry air}$$

$$T_3 = \mathbf{19.0^\circ\text{C}}$$

$$\phi_3 = \mathbf{89\%}$$

$$v_3 = 0.844 \text{ m}^3/\text{kg dry air}$$

$$\dot{V}_3 = \dot{m}_{a_3} v_3 = (83 \text{ kg/min})(0.844 \text{ m}^3/\text{kg}) = \mathbf{70.1 \text{ m}^3/\text{min}}$$



## Πύργοι Ψύξης

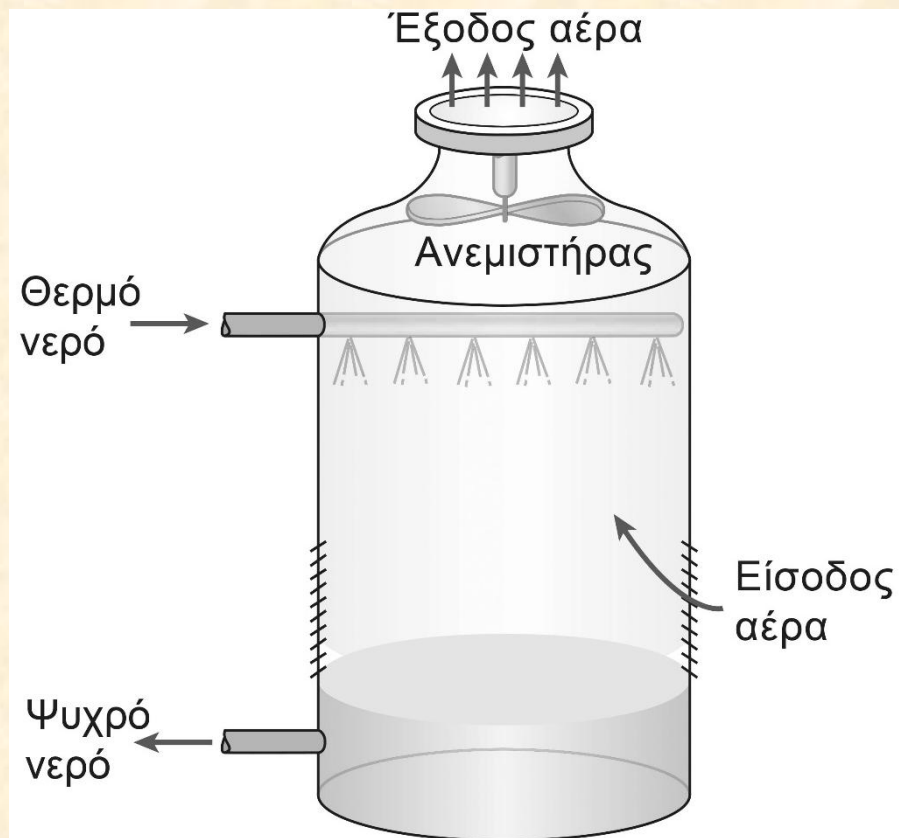
Οι ΑΗΣ, τα μεγάλα συστήματα κλιματισμού και μερικές βιομηχανίες παράγουν μεγάλες ποσότητες απόβλητης θερμότητας, που συχνά απορρίπτεται σε κοντινές λίμνες ή ποταμούς.

Ωστόσο, ενίοτε η παροχή ψυκτικού νερού είναι περιορισμένη ή η θερμική ρύπανση είναι αποτρεπτική.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η απόβλητη θερμότητα αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα, με ένα ρεύμα νερού σε ανακυκλοφορία να παίζει το ρόλο του μέσου μεταφοράς της θερμότητας.

Μια μέθοδος επίτευξης αυτής της μεταφοράς είναι η χρήση πύργων ψύξης.

Ένας υγρός πύργος ψύξης είναι πρακτικώς ένας ημίκλειστος εξατμιστικός ψύκτης.



Πύργος ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας με αντιρροή

**Πύργος ψύξης φυσικής κυκλοφορίας:** μοιάζει με μεγάλη καμινάδα και λειτουργεί ως καμινάδα. Ο αέρας στον πύργο είναι υψηλής υγρασίας, άρα είναι ελαφρύτερος από τον εξωτερικό αέρα. Έτσι, ο ελαφρύς αέρας του πύργου ανυψώνεται κι αναπληρώνεται από βαρύτερο αέρα περιβάλλοντος. Έτσι, δημιουργείται μια ροή από τον πυθμένα ως την κορυφή του πύργου.

**Λίμνη ψεκασμού:** το θερμό νερό ψεκάζεται στον αέρα και ψύχεται από αυτόν καθώς καταιώνίζεται προς τη λίμνη,

**Λίμνη ψύξης:** απόρριψη της απόβλητης θερμότητας σε μια πρακτικώς μεγάλη τεχνητή λίμνη, ανοιχτή στην ατμόσφαιρα.

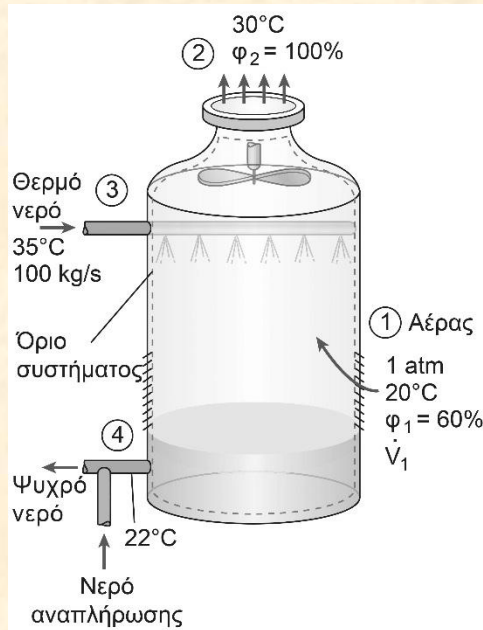


Πύργοι ψύξης φυσικής κυκλοφορίας



Λίμνη ψεκασμού

# Ψύξη ενός ΑΗΣ με πύργο ψύξης



Ισοζύγιο μάζας ξηρού αέρα:

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a$$

Ισοζύγιο μάζας νερού:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_{a_1} \omega_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_{a_2} \omega_2$$

ή

$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) = \dot{m}_{\text{makeup}}$$

Ισοζύγιο ενέργειας:

$$\sum_{\text{in}} \dot{m}h = \sum_{\text{out}} \dot{m}h \rightarrow \dot{m}_{a_1} h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_{a_2} h_2 + \dot{m}_{a_4} h_4$$

ή

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_a (h_2 - h_1) + (\dot{m}_3 - \dot{m}_{\text{makeup}}) h_4$$

Επιλύοντας ως προς  $\dot{m}_a$ , λαμβάνουμε

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_3 (h_3 - h_4)}{(h_2 - h_1) - (\omega_2 - \omega_1) h_4}$$

# Περίληψη

- Ξηρός & ατμοσφαιρικός αέρας
- Λόγος υγρασίας & σχετική υγρασία του αέρα
- Θερμοκρασία σημείου δρόσου
- Θερμοκρασίες αδιαβατικού κορεσμού & υγρού βολβού
- Το ψυχομετρικό διάγραμμα
- Ανθρώπινη ευεξία & Κλιματισμός
- Διεργασίες κλιματισμού
  - ✓ Απλή θέρμανση & ψύξη
  - ✓ Ψύξη με αφύγρανση
  - ✓ Θέρμανση με ύγρανση
  - ✓ Εξατμιστική ψύξη
  - ✓ Αδιαβατική ανάμειξη ρευμάτων αέρα
  - ✓ Πύργοι ψύξης