



**ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΨΚΑΠΕ
ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ-ΨΥΞΗΣ-ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ & ΑΠΕ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΜΑΘΗΜΑ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΨΥΞΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ Μ703**

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΣΤΗΡΙΞΗ

της εργαστηριακής Άσκησης α/α 3:

Θέρμανση ρεύματος αέρα σε πειραματικό αεραγωγό

Περιεχόμενα

Θέρμανση ρεύματος αέρα σε πειραματικό αεραγωγό	1
1 Εισαγωγή	3
2 Ξηρός και υγρός ατμοσφαιρικός αέρας	3
3 Ορισμοί βασικών θερμοδυναμικών μεγεθών.....	5
4 Αδιαβατική ύγρανση.....	7
5 Ψυχομετρικός χάρτης.....	9
5.1 Γενικά.....	9
5.2 Περιγραφή Ψυχομετρικού Χάρτη.....	10
6 Αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα.....	13
7 Μεταβολές κατάστασης αέρα.....	15
7.1. Θέρμανση του αέρα χωρίς μεταβολή της υγρασίας (αισθητή θέρμανση)	15

1 Εισαγωγή

Η Ψυχομετρία ασχολείται με τη μελέτη και τη μέτρηση των περιεχόμενων υδρατμών (υγρασία) στον ατμοσφαιρικό αέρα. Κατ' επέκταση, ο όρος χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει τη μελέτη της ατμοσφαιρικής υγρασίας και της επίδρασής της στα κτήρια και στα συστήματα κλιματισμού αυτών.

Οι περιεχόμενοι υδρατμοί στον ατμοσφαιρικό αέρα έχουν σημαντική, άμεση επίδραση στη διαμόρφωση των λεγόμενων «συνθηκών θερμικής άνεσης» σε ένα κλιματιζόμενο χώρο. Οι συνθήκες θερμικής άνεσης, αλλά και οι συνθήκες υγιεινής, σε ένα εσωτερικό χώρο επιβάλλουν το ποσοστό των περιεχόμενων υδρατμών στον ατμοσφαιρικό αέρα να κινείται εντός ενός σχετικά περιορισμένου πεδίου τιμών. Σε περιπτώσεις θερμών και υγρών κλιματικών συνθηκών θα πρέπει, μαζί με τη μείωση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, να αφαιρεθεί μέρος από την περιεχόμενη μάζα υδρατμών σε αυτόν, διαδικασία που συνήθως εκτελείται ταυτόχρονα με την ψύξη του αέρα από τις κλιματιστικές συσκευές. Αντίθετα, σε κρύα και ξηρά κλίματα, μαζί με τη θέρμανση του αέρα θα πρέπει να προστεθεί μάζα υδρατμών σε αυτόν, διαδικασία που εκτελείται από υγραντήρες. Οι διαδικασίες της αφύγρανσης και της ύγρανσης ατμοσφαιρικού αέρα απαιτούν υψηλά ποσά ενέργειας, δεδομένης της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας του νερού, η οποία σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι της τάξης των 2.450kJ/kg. Ο όρος «λανθάνουσα θερμότητα» θα επεξηγηθεί και θα οριστεί σε επόμενη ενότητα. Πέρα από την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης, ο έλεγχος της υγρασίας σε ένα κτήριο απαιτείται επίσης για την αποφυγή συγκέντρωσης και υγραποίησης υδρατμών σε βασικά δομικά στοιχεία του κτηριακού κελύφους (π.χ. μόνωση).

Στο παρόν παρουσιάζονται τα ακόλουθα θέματα:

- εισάγονται βασικές θερμοδυναμικές έννοιες και μεγέθη που εμπλέκονται στους ψυχομετρικούς υπολογισμούς
- αναλύονται βασικές διεργασίες θέρμανσης, ψύξης και αερισμού εσωτερικών χώρων με τη βοήθεια του ψυχομετρικού χάρτη
- παρουσιάζεται ο ψυχομετρικός χάρτης ο οποίος χρησιμοποιείται για την εκτέλεση ψυχομετρικών υπολογισμών.

Μεταξύ των διεργασιών που θα αναλυθούν στο παρόν Κεφάλαιο είναι η ύγρανση και η αφύγρανση του ατμοσφαιρικού αέρα με ταυτόχρονη ψύξη ή θέρμανση, καθώς και η αδιαβατική ανάμιξη δύο ρευμάτων αέρα με διαφορετικές θερμοκρασίες και περιεκτικότητες υδρατμών. Όλοι οι υπολογισμοί που εκτελούνται με τη βοήθεια του ψυχομετρικού χάρτη αποτελούν συνέπεια είτε του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου (αρχή διατήρησης της ενέργειας), είτε της αρχής διατήρησης μάζας. Το μίγμα αέρα και υδρατμών θα θεωρηθεί ως τέλειο αέριο. Τούτο είναι αρκούντως ακριβές για την περίπτωση των ψυχομετρικών υπολογισμών, λόγω της πολύ μικρής ποσότητας υδρατμών που συνήθως περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα και της υπέρθερμης κατάστασης που τούτη βρίσκεται. Το υπολογιστικό σφάλμα εξαιτίας αυτής της θεώρησης είναι μικρότερο του 1% (Kuehn et al., 1998).

Πριν την παρουσίαση του ψυχομετρικού χάρτη και των βασικών διεργασιών του ατμοσφαιρικού αέρα σε αυτόν, είναι σκόπιμο να δοθούν μερικοί βασικοί ορισμοί σε θερμοδυναμικά μεγέθη και θεμελιώδεις έννοιες της Ψυχομετρίας.

2 Ξηρός και υγρός ατμοσφαιρικός αέρας

Ο απαλλαγμένος από τους υδρατμούς ατμοσφαιρικός αέρας ονομάζεται «ξηρός ατμοσφαιρικός αέρας», αποτελείται δε από μίγμα των αερίων αζώτου, οξυγόνου, αργού, διοξειδίου του άνθρακα και ιχνών των αερίων ηλίου, υδρογόνου, ξένου, κρυπτού κλπ. Η κατά μάζα σύσταση του αέρα αυτού σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση είναι περίπου η ακόλουθη:

- άζωτο (N₂) 76%
- οξυγόνο (O₂) 23%
- αργό (A) 1%

Ο συνήθης αέρας της ατμόσφαιρας περιέχει και μικρή ποσότητα υδρατμών, η οποία στις συνήθεις συνθήκες διαβίωσης μπορεί να φθάσει μέχρι και ποσοστό 3% κατά μάζα. Ο αέρας αυτός ονομάζεται υγρός ατμοσφαιρικός αέρας, για να διακρίνεται από τον ξηρό ατμοσφαιρικό αέρα, και είναι μίγμα ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα και υδρατμών. Παρά το μικρό ποσοστό της υγρασίας στον υγρό ατμοσφαιρικό αέρα, η επίδρασή της στις συνθήκες διαβίωσης είναι πολύ μεγάλη. Γι' αυτό και η υγρασία θεωρείται από τα θεμελιώδη μεγέθη στον κλιματισμό.

Στο σημείο αυτό, πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή βασικών ιδιοτήτων του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα, ας θυμηθούμε το νόμο των μερικών πιέσεων του Dalton. Σύμφωνα λοιπόν με το νόμο των μερικών πιέσεων, η συνολική πίεση ενός μίγματος αερίων είναι ίση με το άθροισμα των μερικών πιέσεων των αερίων που το αποτελούν. Μερική πίεση συστατικού ενός μίγματος αερίων είναι η πίεση που έχει το συστατικό του μίγματος, όταν στην ίδια θερμοκρασία με το μίγμα καταλαμβάνει όγκο ίσο με το συνολικό όγκο μίγματος.

Σύμφωνα με το νόμο του Dalton, αν θεωρήσουμε τον υγρό ατμοσφαιρικό αέρα ως μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών, τότε η πίεση p του υγρού αέρα σε ένα χώρο θα είναι ίση με το άθροισμα των μερικών πιέσεων του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα p_a , δηλαδή της πίεσης που δημιουργείται όταν μόνος ο ξηρός ατμοσφαιρικός αέρας καταλαμβάνει το χώρο του μίγματος στη θερμοκρασία του μίγματος και της μερικής πίεσης p_w των υδρατμών, δηλαδή της πίεσης που δημιουργείται όταν μόνι τους οι υδρατμοί καταλαμβάνουν το χώρο του μίγματος στη θερμοκρασία του μίγματος:

$$p = p_a + p_w \quad (2.1)$$

Σε συνήθεις εφαρμογές η μερική πίεση των υδρατμών είναι πολύ μικρή σε σχέση με αυτή του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα, δηλαδή:

$$p_w < 0,05 \cdot p \quad (2.2)$$

Στην περίπτωση αυτή ο υγρός ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ως τέλειο αέριο κατά προσέγγιση και, συνεπώς, ισχύουν οι νόμοι των τελείων αερίων και η γενική καταστατική εξίσωση, η οποία μπορεί να γραφεί στις ακόλουθες μορφές (βλέπε και Κεφάλαιο 3):

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

$$p \cdot V = n \cdot M \cdot R' \cdot T$$

$$p \cdot V = \rho \cdot R' \cdot T \quad (2.3)$$

Η συνολική μάζα του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα ισούται με το άθροισμα των μαζών του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα και της μάζας των υδρατμών που περιέχονται σε αυτόν:

$$m_{\nu a} = m_a + m_w \quad (2.4)$$

3 Ορισμοί βασικών θερμοδυναμικών μεγεθών

Στην ενότητα αυτή ακολουθεί η παράθεση ορισμών σε βασικά μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν στη παρούσα άσκηση.

- Ειδική υγρασία ή λόγος υγρότητας ή περιεχόμενο υγρασίας (humidity ratio):

Ονομάζεται ο λόγος της μάζας των υδρατμών προς τη μάζα του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα στην οποία περιέχεται. Συμβολίζεται με w και μετριέται σε kg ή gr υδρατμού προς kg ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα:

$$w = \frac{m_w}{m_a} \quad (3.1)$$

- Απόλυτη υγρασία (absolute humidity):

Ονομάζεται ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχεται στον όγκο του ατμοσφαιρικού αέρα προς τον όγκο αυτό. Μετριέται σε kg ή gr υδρατμών προς m^3 υγρού ατμοσφαιρικού αέρα:

$$a = \frac{m_w}{V_{va}} \quad (3.2)$$

- Κατάσταση κορεσμού υγρού ατμοσφαιρικού αέρα (saturation):

Είναι η κατάσταση στην οποία μπορεί να βρεθεί ο υγρός ατμοσφαιρικός αέρας, κατά την οποία έστω και η ελάχιστη ψύξη του προκαλεί υγροποίηση μέρους των υδρατμών που περιέχει (αποβολή τους από τον υγρό ατμοσφαιρικό αέρα). Συνεπώς, η επιφάνεια ψυχρότερων αντικειμένων που τοποθετούνται εντός του κορεσμένου ατμοσφαιρικού αέρα καλύπτεται από δρόσο.

Η έννοια της κατάστασης κορεσμού έχει να κάνει με τη δυνατότητα του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα να απορροφήσει υδρατμούς και να τους διατηρήσει στη μάζα του σε αέρια μορφή. Το πόσο απέχει η κατάσταση υγρού ατμοσφαιρικού αέρα από την κατάσταση κορεσμού εξαρτάται από δύο παραμέτρους:

- τη θερμοκρασία του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα
- την ειδική υγρασία, ουσιαστικά την περιεκτικότητα κατά μάζα του αέρα σε υδρατμούς.

Όσο η θερμοκρασία του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα μειώνεται, με την ειδική υγρασία του να παραμένει αμετάβλητη, τόσο προσεγγίζεται η κατάσταση κορεσμού. Επίσης, αν η θερμοκρασία του αέρα παραμένει σταθερή, η κατάσταση κορεσμού θα προσεγγιστεί αν αυξάνεται η ειδική υγρασία του αέρα, π.χ. ψεκάζοντας υδρατμούς σε αυτόν.

- Σημείο δρόσου υγρού ατμοσφαιρικού αέρα (dew point temperature):

Σημείο δρόσου είναι η θερμοκρασία του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα, στην οποία αρχίζει η συμπύκνωση των περιεχόμενων σε αυτόν υδρατμών, καθώς αρχίζει να ψύχεται, χωρίς να μεταβάλλεται η ειδική υγρασία w .

Εναλλακτικά, σημείο δρόσου είναι η θερμοκρασία, στην οποία αν ψυχθεί μη κορεσμένος ατμοσφαιρικός αέρας δεδομένης κατάστασης, θα γίνει κορεσμένος, χωρίς να μεταβληθεί η ειδική υγρασία w .

Είναι φανερό ότι όταν ο αέρας είναι κορεσμένος, το σημείο δρόσου του συμπίπτει με τη θερμοκρασία του, αφού η οποιαδήποτε μείωση της θερμοκρασίας ή αύξηση της ειδικής υγρασίας θα προκαλέσει υγροποίηση υδρατμών.

Γι' αυτό, όταν ο κορεσμένος αέρας ψυχθεί έστω και λίγο ομοιόμορφα σε όλη τη μάζα του, τότε η θερμοκρασία του πέσει κάτω από το σημείο δρόσου του, τότε δημιουργούνται σταγονίδια που

αιωρούνται μέσα στον κορεσμένο αέρα και δημιουργούν ομίχλη. Το σημείο δρόσου συμβολίζεται με T_{DP} (dew point).

- Σχετική υγρασία (relative humidity):

Είναι ο λόγος της μερικής πίεσης υδρατμών p_w που περιέχονται σε υγρό ατμοσφαιρικό αέρα προς τη μερική πίεση των υδρατμών στον ίδιο αέρα, όταν αυτός είναι κορεσμένος (για τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας) p_{w-sat} . Συμβολίζεται με φ .

$$\varphi = \frac{p_w}{p_{w-sat}} \quad (3.3)$$

- Βαθμός ή λόγος κορεσμού:

Ονομάζεται ο λόγος της ειδικής υγρασίας του αέρα προς την ειδική υγρασία του αέρα όταν είναι κορεσμένος (για τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας). Συμβολίζεται με μ .

Επειδή η μερική πίεση υδρατμών είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με την πίεση του μίγματος, μπορεί να γίνει δεκτό ότι ο βαθμός κορεσμού ισούται με τη σχετική υγρασία του αέρα, για θερμοκρασίες που δεν υπερβαίνουν τους 65 °C.

- Ειδικός όγκος αέρα:

Ονομάζεται ο λόγος του όγκου του υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα και μετριέται σε m^3 υγρού αέρα προς kg ξηρού αέρα. Συμβολίζεται με v .

$$v = \frac{V_{va}}{m_a} \quad (3.4)$$

Παρατήρηση:

Επειδή ο ειδικός όγκος αέρα ανάγεται σε kg ξηρού αέρα, ενώ η πυκνότητα του υγρού αέρα υπολογίζεται με βάση τη συνολική μάζα του υγρού αέρα, συμπεριλαμβανομένης της μάζας των περιεχόμενων υδρατμών, έπεται ότι η πυκνότητα του υγρού αέρα δεν είναι ακριβώς ίση με τον αντίστροφο ειδικό όγκο αέρα. Για την ακρίβεια, η σχέση που ισχύει είναι:

$$\rho = \frac{1}{v} \cdot (1 + w) \quad (3.5)$$

- Ανηγμένος όγκος αέρα:

Ονομάζεται ο λόγος του όγκου του υγρού αέρα προς τη μάζα του υγρού αέρα και μετριέται σε m^3 υγρού αέρα προς kg υγρού αέρα.

$$V = \frac{V_{va}}{m_{va}} \quad (3.6)$$

Οι δύο ανωτέρω όγκοι διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς την ποσότητα υδρατμών που περιέχεται στον υγρό αέρα, η οποία όμως είναι πολύ μικρή. Συνεπώς, κατά προσέγγιση μπορεί να γίνει δεκτό ότι είναι ίσοι. Ο ανηγμένος όγκος αέρα ισούται με το αντίστροφο της πυκνότητάς του.

- **Ενθαλπία:**

Ενθαλπία είναι το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας ενός σώματος ή συστήματος και του γινομένου της πίεσης επί τον όγκο που καταλαμβάνει:

$$H = U + p \cdot V \quad (3.7)$$

Με τον όρο «ενθαλπία», ο οποίος προέρχεται από το ρήμα ενθάλλω = ζεσταίνω – περιθάλλω, χαρακτηρίζεται η ενέργεια που προσφέρεται κατά τη θέρμανση ουσιών και που εγκλωβίζεται στα μόρια τους. Συνέπεια αυτού είναι ότι τα μόρια αυτά έχουν μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο από τα αρχικά μόρια. Έτσι, με την ενθαλπία εκφράζεται το θερμικό περιεχόμενο κάθε συστήματος και συμβολίζεται με το γράμμα H. Η ενθαλπία έχει μονάδες ενέργειας (Joule στο SI).

Η ενέργεια αυτή οφείλεται στις δυνάμεις των χημικών δεσμών που συγκρατούν τα άτομα μέσα στο μόριο, αλλά και στην κίνηση των ατόμων, των ηλεκτρονίων καθώς και του ίδιου του μορίου.

- **Ειδική ενθαλπία αέρα:**

Ονομάζεται ο λόγος της ενθαλπίας του υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα και μετρείται σε Joule προς kg ξηρού αέρα. Η ειδική ενθαλπία συμβολίζεται με h και ισούται με το άθροισμα της ειδικής ενθαλπίας του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα και της ειδικής ενθαλπίας των περιεχόμενων σε αυτόν υδρατμών:

$$h = h_{da} + w \cdot h_g \quad (3.8)$$

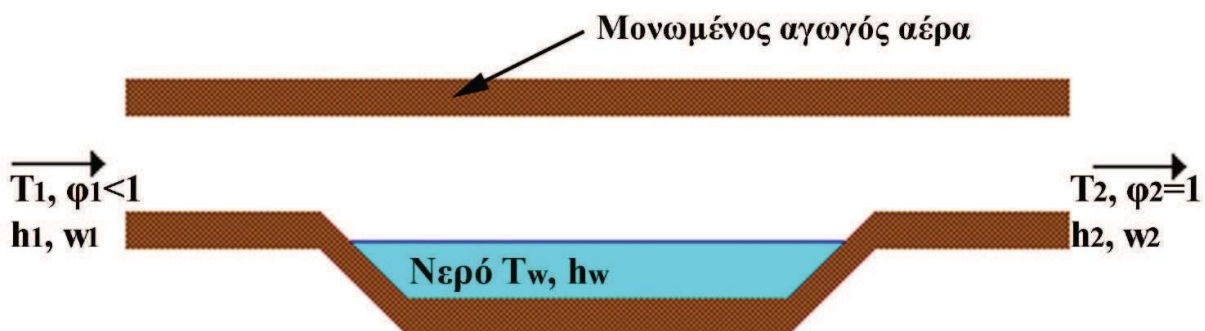
όπου h_{da} είναι η ειδική ενθαλπία του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα, w η ειδική υγρασία του και h_g η ειδική ενθαλπία των υδρατμών. Επίσης, η ειδική ενθαλπία του ατμοσφαιρικού αέρα δίνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας ξηρού βολβού από τη σχέση:

$$h = c_{pa} \cdot T_{DB} + w \cdot (h_{g-ref} + C_{pw} \cdot T_{DB}) \quad (3.9)$$

όπου c_{pa} και c_{pw} οι ειδικές θερμότητες ξηρού αέρα και υπέρθερμου υδρατμού, h_{g-ref} η ειδική ενθαλπία υδρατμών σε μία θερμοκρασία αναφοράς και T_{DB} η θερμοκρασία ξηρού βολβού του ατμοσφαιρικού αέρα. Η έννοια της θερμοκρασίας ξηρού βολβού θα δοθεί στην επόμενη ενότητα.

4 Αδιαβατική ύγρανση

Έστω υγρός, μη κορεσμένος ατμοσφαιρικός αέρας αρχικής κατάστασης 1 (θερμοκρασίας T_1 και σχετικής υγρασίας $\phi_1 < 1$), ο οποίος διέρχεται όπως στο σχήμα 4.1 πάνω από μεγάλη επιφάνεια νερού αρχικής θερμοκρασίας T_w , ίσης με τη θερμοκρασία του αέρα: $T_w = T_1$. Όλο το σύστημα θεωρείται θερμικά απομονωμένο από το περιβάλλον.



Σχήμα 4.1: Διαδικασία αδιαβατικής ύγρανσης ατμοσφαιρικού αέρα.

Λόγω της μεγάλης επιφάνειας του νερού και επειδή ο αέρας δεν είναι κορεσμένος, θα αρχίσει η ύγρανσή του λόγω της εξάτμισης νερού. Καθώς όμως λαμβάνει χώρα η εξάτμιση του νερού, το νερό απορροφά θερμότητα από τον αέρα, η οποία χρησιμοποιείται για την αλλαγή φάσης του νερού από την υγρή στην αέρια φάση. Όπως θα δούμε παρακάτω στο παρόν κεφάλαιο, η θερμότητα αυτή, καθώς συμβάλει στην αλλαγή φάσης του νερού, ονομάζεται «λανθάνουσα θερμότητα». Όσο ο αέρας παρέχει θερμότητα στο νερό, τόσο ψύχεται, συνεπώς η θερμοκρασία T_2 στην έξοδο του ρεύματος αέρα από την αδιαβατική συσκευή θα είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία T_1 του ρεύματος αέρα στην είσοδο της συσκευής.

Καθώς το ρεύμα αέρα ψύχεται κατά τη ροή του άνωθεν της επιφάνειας νερού, μέσω συναγωγής ψύχει και το νερό, του οποίου η θερμοκρασία T_w βαίνει μειούμενη προϊόντος του χρόνου. Τελικά, κατά την εξέλιξη του φαινομένου με την πάροδο του χρόνου, η κατάσταση 2 στην έξοδο του αέρα θα είναι $T_2 < T_w < T_1$.

Όσο όμως η θερμοκρασία του νερού T_w μειώνεται με την εξάτμιση, τόσο θα μειώνεται και ο ρυθμός της εξάτμισης, αφού για να εξατμιστεί το ψυχρότερο νερό θα απαιτείται περισσότερη απορρόφηση λανθάνουσας θερμότητας από το ρεύμα αέρα. Συνεπώς, θα φθάσει κάποια στιγμή που θα σταματήσει η περαιτέρω πτώση της θερμοκρασίας του νερού. Από τη στιγμή αυτή και έπειτα επέρχεται θερμική ισορροπία, δηλαδή το νερό παύει να ψύχεται περισσότερο και η θερμοκρασία του ρεύματος αέρα στην έξοδο της συσκευής T_2 θα ισούται με τη θερμοκρασία του νερού T_w . Στην κατάσταση αυτή το ρεύμα αέρα στην έξοδο από τη συσκευή θα είναι κορεσμένο ($\phi_2=1$).

Οι συνθήκες λοιπόν που τελικά διαμορφώνονται στην έξοδο της συσκευής είναι:

$$T_2 = T_w < T_1 \text{ και } \phi_2=1.$$

Η τελική αυτή θερμοκρασία του υγρού αέρα στην έξοδο από την αδιαβατική ύγρανση ονομάζεται Θερμοκρασία Υγρού Βολβού (Wet Bulb Temperature). Η θερμοκρασία αυτή είναι βασικότατο μέγεθος στα προβλήματα του κλιματισμού και συμβολίζεται με T_{WB} . Η θερμοκρασία υγρού βολβού είναι η ελάχιστη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει η θερμοκρασία υγρού αέρα αποκλειστικά λόγω της εξάτμισης νερού. Η θερμοκρασία υγρού βολβού είναι αυτή που αισθανόμαστε όταν εκθέσουμε κάποιο σημείο μουσκεμένου ανθρώπινου σώματος σε διερχόμενο ρεύμα αέρα.

Από την άλλη μεριά, ονομάζουμε ως Θερμοκρασία Ξηρού Βολβού (Dry Bulb Temperature) τη συνήθη θερμοκρασία του υγρού αέρα, για να διακρίνεται από τη θερμοκρασία υγρού βολβού. Η θερμοκρασία ξηρού βολβού συμβολίζεται με T_{DB} και είναι η θερμοκρασία που αντιλαμβανόμαστε ως θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου.

Η θερμοκρασία ξηρού βολβού μετριέται με τα συνήθη υδραργυρικά θερμομέτρα. Κατά τη μέτρηση αυτή θα πρέπει ο βολβός του θερμομέτρου (δεξαμενή υδραργύρου στα υδραργυρικά θερμομέτρα ή γενικά το σημείο λήψης της θερμοκρασίας που έρχεται σε επαφή με τον αέρα σε άλλου είδους θερμομέτρα) να είναι ξηρός, δηλαδή απαλλαγμένος από υγρασία. Επίσης δεν θα πρέπει να είναι εκτεθειμένος σε ακτινοβολία. Και στις δύο περιπτώσεις η μέτρηση θα είναι λανθασμένη.

Η θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα μετριέται επίσης με τα συνήθη θερμομέτρα, όπου ο βολβός του θερμομέτρου θα πρέπει να περιβληθεί με γάζα νοτισμένη με νερό και να εκτεθεί στη συνέχεια σε ρεύμα αέρα. Κατά τη μέτρηση αυτή δημιουργούνται συνθήκες ταχείας εξάτμισης του νερού, είτε εμψύωντας αέρα στη γάζα με μικρό ανεμιστήρα, είτε περιστρέφοντας το θερμομέτρο υγρού βολβού μέσα στον αέρα. Λόγω της εξάτμισης του νερού αρχίζει να κατεβαίνει η θερμοκρασία του θερμομέτρου και όταν φθάσει στην τελική ισορροπία σταθεροποιείται η ένδειξη, η οποία και λαμβάνεται ως θερμοκρασία υγρού βολβού.

Για τη μέτρηση συγχρόνως των θερμοκρασιών ξηρού και υγρού βολβού υπάρχουν ειδικά όργανα, τα ψυχρόμετρα. Αποτελούνται από ένα ζεύγος υδραργυρικών θερμομέτρων, όπου η κάτω άκρη μόνο του ενός, (δηλαδή το δοχείο του υδραργύρου του) σκεπάζεται από ύφασμα μουσελίνας σε μορφή φυτιλιού, η άκρη του οποίου καταλήγει βυθισμένη σε δοχείο με αποσταγμένο νερό. Έτσι το θερμομέτρο αυτό υγραίνεται συνεχώς σε αντίθεση με το άλλο του ζεύγους, που παραμένει ξηρό. Σε αυτά δημιουργείται

εξάτμιση είτε με ανεμιστήρα, είτε με περιστροφή ολόκληρης της συσκευής μέσα στον αέρα. Τα περιστρεφόμενα ψυχρόμετρα ονομάζονται ψυχρόμετρα σφενδόνας.

Το ψυχρόμετρο το εφηύρε το 1890 ο Γερμανός Richard Assman, εξ' ου και το όνομά του «απορροφητικό ψυχρόμετρο Άσμαν».

Όταν η ατμόσφαιρα είναι υγρή (υψηλή σχετική υγρασία φ) δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο θερμομέτρων του ψυχρόμετρου. Αν όμως είναι ξηρή (χαμηλή σχετική υγρασία φ), τότε η εξάτμιση στο υγρό θερμομέτρο είναι μεγάλη, με συνέπεια η θερμοκρασία μεταξύ υγρού και ξηρού θερμομέτρου να παρουσιάζει μεγαλύτερη διαφορά.

5 Ψυχρομετρικός χάρτης

5.1 Γενικά

Ο ψυχρομετρικός χάρτης απεικονίζει γραφικά τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του υγρού αέρα. Τα μεγέθη που απεικονίζει έχουν εκλεγεί κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να είναι χρήσιμος στην επίλυση των προβλημάτων κλιματισμού εσωτερικών χώρων. Η χρήση του έγκειται στον υπολογισμό των ιδιοτήτων του αέρα σε μία αρχική και σε μία τελική κατάσταση, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας κλιματισμού. Με γνώση των ιδιοτήτων του αέρα στην αρχική και τελική κατάσταση, είναι δυνατός ο υπολογισμός βασικών μεγεθών που εμπλέκονται κατά τη διεργασία κλιματισμού, όπως η προσφερόμενη ισχύς από τη συσκευή κλιματισμού στο χώρο ή το απορροφούμενο φορτίο κλιματισμού από τον κλιματιζόμενο χώρο. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο υπολογισμός μεγεθών ισχύος και παροχής μάζας εκτελείται στη βάση των αρχών διατήρησης ενέργειας και μάζας κατά τη θερμοδυναμική διεργασία.

Είναι προφανές ότι οι ιδιότητες αρχικής και τελικής κατάστασης του ατμοσφαιρικού αέρα θα μπορούσαν να υπολογιστούν με χρήση των βασικών σχέσεων που διέπουν τις θερμοδυναμικές μεταβολές για το τέλειο αέριο. Ωστόσο, ο ψυχρομετρικός χάρτης παρέχει μία ταχεία και ικανοποιητικής ακρίβειας λύση για την εκτέλεση πρώτων προσεγγιστικών υπολογισμών, αποφεύγοντας την εκτέλεση υπολογισμών.

Ο Mollier ήταν ο πρώτος που σε ένα διάγραμμα συσχέτισε την ειδική ενθαλπία h και την ειδική υγρασία w του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα. Σήμερα, η American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) έχει συντάξει επτά διαγράμματα ψυχρομετρικού χάρτη του τύπου Mollier. Αυτά χρησιμοποιούνται ευρύτατα και περιγράφονται παρακάτω.

Τα τέσσερα πρώτα διαγράμματα αναφέρονται σε ατμοσφαιρική πίεση στο επίπεδο της θάλασσας, δηλαδή για ατμοσφαιρική πίεση $1\text{atm} = 101.325\text{Pa}$. Το πέμπτο διάγραμμα αναφέρεται σε υψόμετρο 750m από το επίπεδο της θάλασσας, δηλαδή σε ατμοσφαιρική πίεση $0,914\text{atm} = 92.634\text{Pa}$. Το έκτο διάγραμμα αναφέρεται σε υψόμετρο 1.500m από το επίπεδο της θάλασσας, δηλαδή σε ατμοσφαιρική πίεση $0,934\text{atm} = 84.540\text{Pa}$ και το έβδομο διάγραμμα αναφέρεται σε υψόμετρο 2.250m από το επίπεδο της θάλασσας, δηλαδή σε ατμοσφαιρική πίεση $0,761\text{atm} = 77.058\text{Pa}$

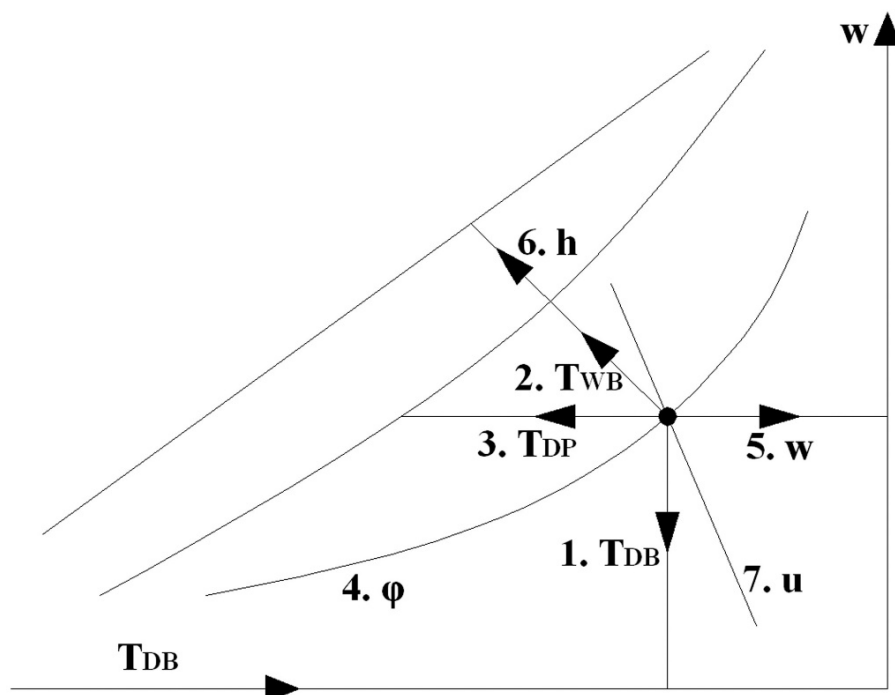
Κάθε διάγραμμα καλύπτει μία ορισμένη περιοχή θερμοκρασιών ξηρού βολβού ως εξής:

- το πρώτο, το πέμπτο, το έκτο και το έβδομο διάγραμμα από 0°C έως 50°C
- το δεύτερο διάγραμμα από -40°C έως 10°C
- το τρίτο διάγραμμα από 15°C έως 120°C
- το τέταρτο διάγραμμα από $100^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$

Σήμερα έχουν σαφώς αναπτυχθεί περισσότεροι ψυχρομετρικοί χάρτες, πέραν αυτών της ASHRAE, οι οποίοι αφορούν σε ειδικές περιπτώσεις και χρησιμοποιούνται αναλόγως.

5.2 Περιγραφή Ψυχομετρικού Χάρτη

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τυπικός ψυχομετρικός χάρτης της ASHRAE, η μορφή του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Αναπαράσταση καταστατικών μεγεθών υγρού ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη.

Ο ψυχομετρικός χάρτης της ASHRAE περιλαμβάνει οικογένειες ευθειών και καμπύλων, κάθε μία από τις οποίες έχει παρασταθεί στο σχήμα 5.2 και οι οποίες αντιστοιχούν στα ακόλουθα ψυχομετρικά μεγέθη του αέρα.

1. Θερμοκρασία ξηρού βολβού (T_{DB}):

Αναφέρεται στον κάτω οριζόντιο άξονα του χάρτη σε °C, τα δε σημεία του αέρα που έχουν την ίδια θερμοκρασία ξηρού βολβού βρίσκονται σε ευθείες σχεδόν κάθετες προς τον οριζόντιο άξονα.

2. Θερμοκρασία υγρού βολβού (T_{WB}):

Οι ισοθερμοκρασιακές υγρού βολβού είναι λοξές ευθείες που μετρούνται πάνω στη διαγώνια καμπύλη κορεσμού του χάρτη.

3. Θερμοκρασία σημείου δρόσου (T_{DP}):

Δίνεται από οριζόντιες ευθείες και μετριέται μαζί με τη θερμοκρασία υγρού βολβού πάνω στην καμπύλη κορεσμού του χάρτη.

4. Σχετική υγρασία ϕ :

Δίνεται από τις καμπύλες του χάρτη σε %. Η καμπύλη κορεσμού του χάρτη είναι η καμπύλη σχετικής υγρασίας 100%.

5. Ειδική υγρασία w :

Μετριέται στο δεξιό κάθετο άξονα του χάρτη. Οι γραμμές σταθερής ειδικής υγρασίας είναι ευθείες οριζόντιες.

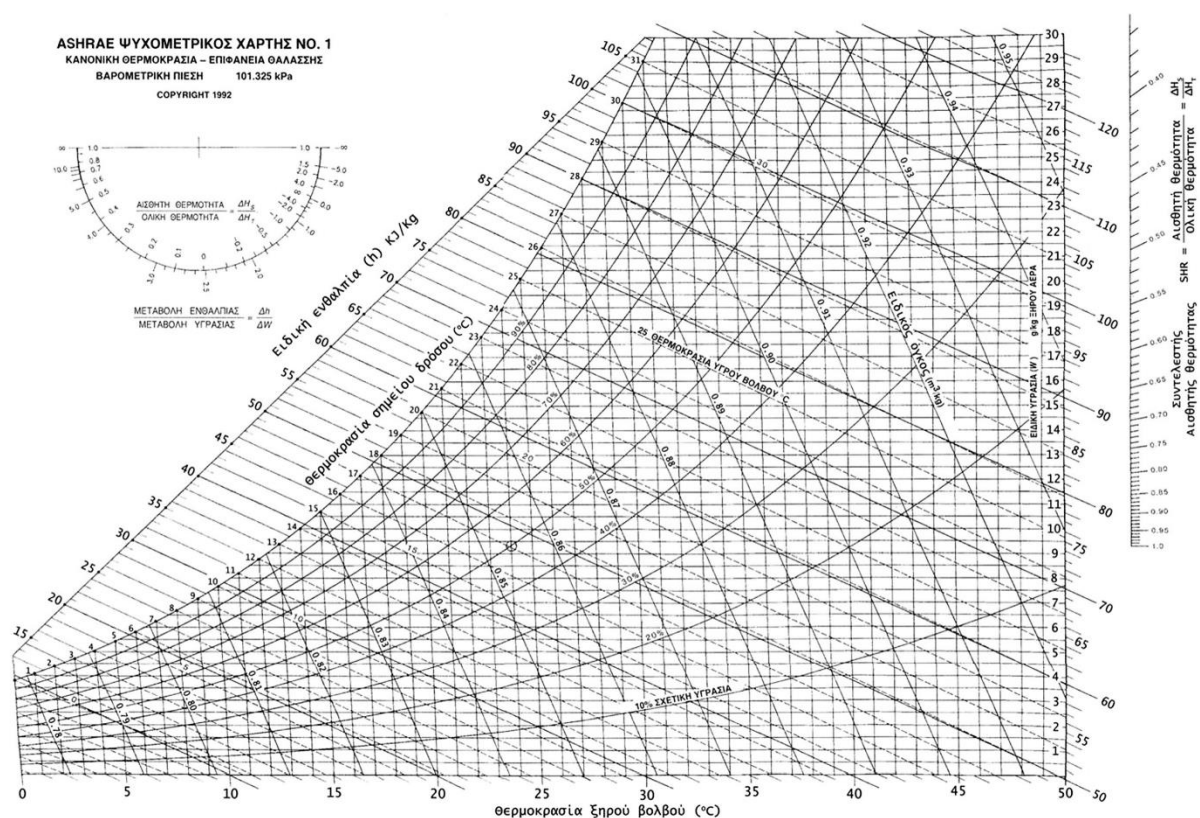
6. Ειδική ενθαλπία h:

Μετρίεται στο αριστερό μέρος του χάρτη, στη διαγώνια κλίμακα. Σημεία με την ίδια ειδική ενθαλπία βρίσκονται πάνω σε λοξές ευθείες. Οι ευθείες αυτές διαφέρουν λίγο ως προς την κλίση από τις ευθείες σταθερής θερμοκρασίας υγρού βολβού.

7. Ειδικός όγκος υ:

Οι ευθείες σταθερού ειδικού όγκου είναι παράλληλες μεταξύ τους και λοξές ως προς τον οριζόντιο άξονα. Έχουν μεγαλύτερη κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα σε σχέση με τις ευθείες σταθερής ειδικής ενθαλπίας ή με τις διαγώνιες ισοθερμοκρασιακές ευθείες υγρού βολβού.

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται ο ψυχομετρικός χάρτης της ASHRAE, με μονάδες S.I. και με πεδίο τιμών θερμοκρασιών ξηρού βολβού από 0°C έως 50°C.



Σχήμα 5.3: Ψυχομετρικός χάρτης με μονάδες στο S.I. και πεδίο τιμών θερμοκρασίας ξηρού βολβού από 0 °C έως 50°C.

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι στον ψυχομετρικό χάρτη έχουν αποτυπωθεί επτά βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα. Τα μεγέθη αυτά, καθώς περιγράφουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο αέρας, θα ονομάζονται «καταστατικά» μεγέθη. Γίνεται αντιληπτό ότι για να προσδιοριστεί το σημείο πάνω στον ψυχομετρικό χάρτη που αναπαριστά την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο ατμοσφαιρικός αέρας, αρκεί να είναι γνωστά δύο από τα επτά μεγέθη που απεικονίζονται σε αυτόν. Έπειτα, είναι δυνατή η ανάγνωση των υπόλοιπων πέντε μεγεθών. Ένα σχετικό παράδειγμα ακολουθεί στη συνέχεια.

Παράδειγμα 5.1

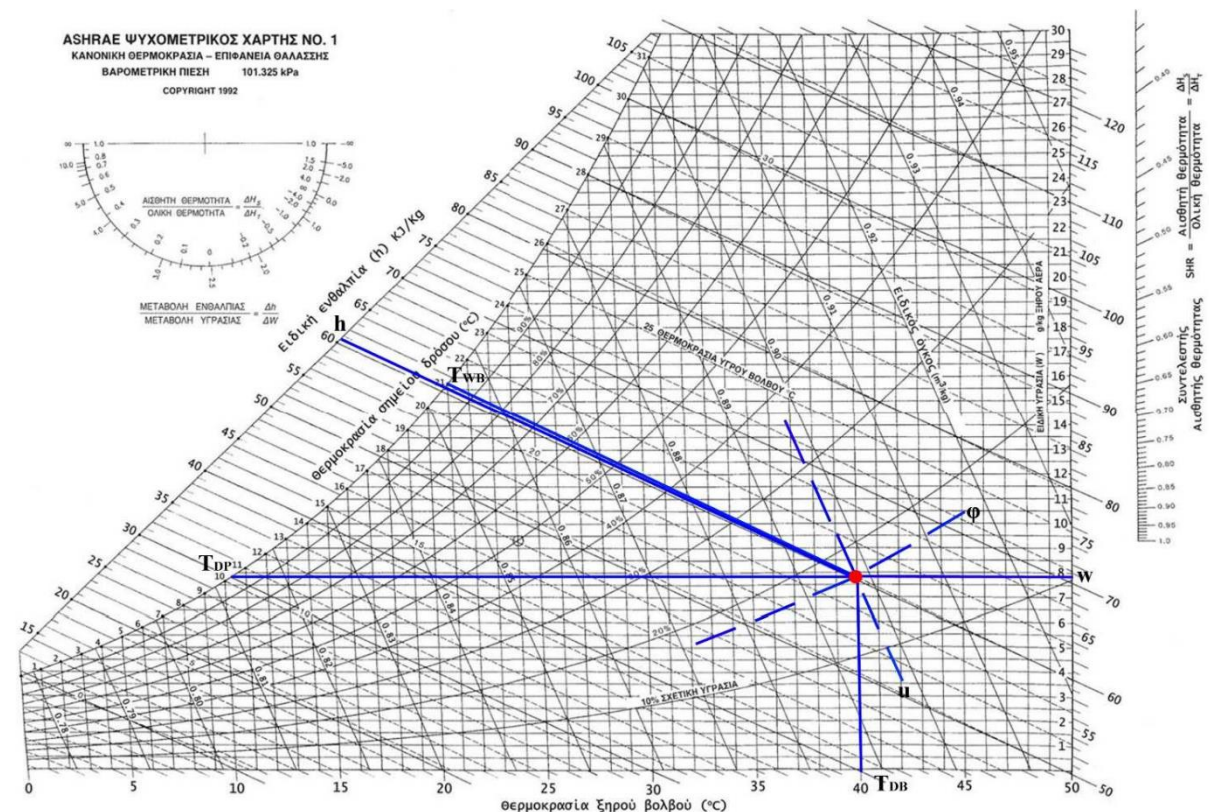
Ανάγνωση καταστατικών μεγεθών ατμοσφαιρικού αέρα από τον ψυχομετρικό χάρτη

Δίνεται υγρός αέρας θερμοκρασίας ξηρού βολβού $T_{DB}=40^{\circ}\text{C}$ και θερμοκρασίας υγρού βολβού $T_{WB}=21^{\circ}\text{C}$. Να βρεθούν από τον ψυχομετρικό χάρτη τα λοιπά θερμοδυναμικά μεγέθη του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα.

Λύση

Γνωρίζοντας δύο μεγέθη της κατάστασης του αέρα, μπορούμε να εντοπίσουμε το σημείο που αναπαριστά

την κατάστασή του στον ψυχομετρικό χάρτη. Έπειτα μπορούμε να αναγνώσουμε από το χάρτη τα υπόλοιπα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο ατμοσφαιρικός αέρας. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται γραφικά ο εντοπισμός στον ψυχομετρικό χάρτη του σημείου που αναπαριστά την κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα και ο τρόπος ανάγνωσης των λοιπών καταστατικών μεγεθών.



Σχήμα 5.4: Ανάγνωση καταστατικών μεγεθών ατμοσφαιρικού αέρα από τον ψυχομετρικό χάρτη.

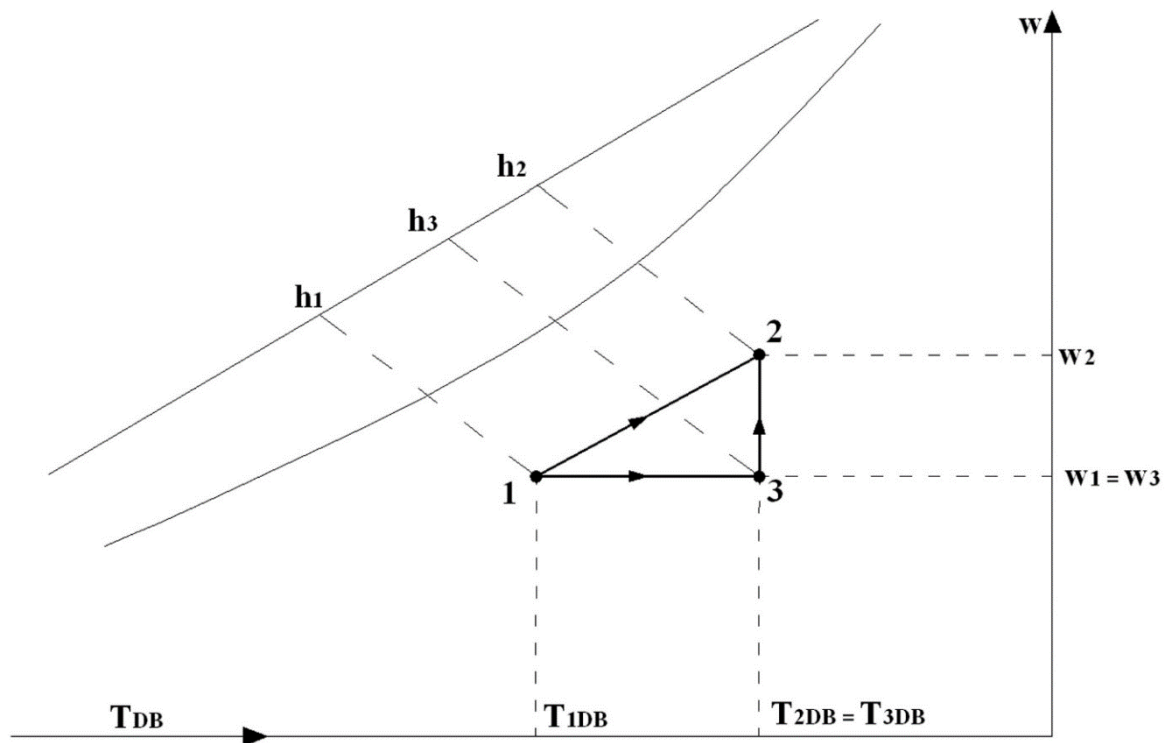
Συγκεκριμένα, το σημείο που αναπαριστά την κατάσταση του αέρα προκύπτει από την τομή των ισοθερμοκρασιακών ξηρού και υγρού βολβού $T_{DB}=40^{\circ}\text{C}$ και $T_{WB}=21^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Αφού εντοπίσουμε το σημείο αυτό, διαβάζουμε πλέον τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη ως εξής:

- ειδική ενθαλπία: $h=60,5\text{kJ/kg}$, ακολουθώντας την ισηθαλπική που διέρχεται από το σημείο κατάστασης του αέρα έως τη διαγώνια κλίμακα των ειδικών ενθαλπιών

- σχετική υγρασία: $\phi=17\%$, αναλογικά με βάση τις καμπύλες σταθερής σχετικής υγρασίας εκατέρωθεν του σημείου κατάστασης αέρα
- ειδική υγρασία: $w=7,8\text{gr/kg}$, ακολουθώντας την καμπύλη σταθερής ειδικής υγρασίας που διέρχεται από το σημείο κατάστασης του αέρα έως το δεξιό κάθετο άξονα του διαγράμματος
- σημείο δρόσου: $T_{DP}=10,5^\circ\text{C}$, ακολουθώντας την οριζόντια ευθεία που διέρχεται από το σημείο κατάστασης του αέρα έως την καμπύλη κορεσμού του χάρτη
- ειδικός όγκος αέρα: $v=0,898\text{m}^3/\text{kg}$, αναλογικά με βάση τις διαγώνιες ευθείες σταθερού ειδικού όγκου εκατέρωθεν του σημείου κατάστασης αέρα.

6 Αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα

Έστω αέρας αρχικής κατάστασης 1 που υφίσταται μεταβολή στη θερμική κατάστασή του και τελικά μεταβαίνει στην κατάσταση 2 (σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα κατά μεταβολή κατάστασης αέρα.

Η μεταβολή αυτή παριστάνεται στον ψυχομετρικό χάρτη με το ευθύγραμμο τμήμα 1-2, αν και δεν είναι απαραίτητο η μετάβαση από την κατάσταση 1 στη 2 να ακολουθήσει τα σημεία του ευθυγράμμου τμήματος (μπορεί να ακολουθήσει μια οποιαδήποτε διαδρομή μεταξύ των σημείων 1 και 2). Η ευθεία 1-2 ονομάζεται καταστατική ευθεία (condition line) της μεταβολής. Από τα σημεία 1 και 2 χαράσσονται ευθείες παράλληλες προς τους άξονες θερμοκρασίας ξηρού βολβού και ειδικής υγρασίας του χάρτη, οι οποίες τέμνονται στο σημείο 3. Δημιουργείται έτσι το περίπου ορθογώνιο τρίγωνο 1-2-3. Ορίζονται στη συνέχεια δύο βασικές έννοιες, αυτές της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας.

- Αισθητή θερμότητα (sensible heat)

Αισθητή θερμότητα της συνολικής μεταβολής 1-2 ονομάζεται η ποσότητα:

$$q_a = h_3 - h_1 \quad (6.1)$$

δηλαδή η θερμότητα η οποία αντιστοιχεί στη υποθετική θερμοδυναμική μεταβολή 1-3, κατά την οποία μεταβάλλεται η θερμοκρασία ξηρού βολβού, ενώ παραμένει σταθερή η ειδική υγρασία του αέρα. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο, δηλαδή επειδή μεταβάλλεται η θερμοκρασία του αέρα, μεταβολή που γίνεται αισθητή από ένα θερμόμετρο, η υποθετική θερμοδυναμική μεταβολή 1-3 ονομάζεται αισθητή και το αντίστοιχο ποσό θερμότητας που προσδίδεται στον αέρα και συμβάλει αποκλειστικά στην αύξηση της θερμοκρασίας του ονομάζεται αισθητή θερμότητα.

Γενικότερα, όταν θερμαίνεται ένα αντικείμενο η θερμοκρασία του ανεβαίνει, καθώς προστίθεται θερμότητα. Η θερμότητα που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος ονομάζεται αισθητή θερμότητα. Ομοίως, όταν η θερμότητα αφαιρείται από ένα αντικείμενο και η θερμοκρασία του μειώνεται, η θερμότητα που αφαιρείται ονομάζεται αισθητή. Εν κατακλείδι, η θερμότητα που προκαλεί αλλαγές μόνο στη θερμοκρασία ενός αντικειμένου ονομάζεται αισθητή θερμότητα.

- Λανθάνουσα θερμότητα (latent heat):

Λανθάνουσα θερμότητα της συνολικής μεταβολής 1-2 του αέρα ονομάζεται η ποσότητα:

$$q_l = h_2 - h_3 \quad (6.2)$$

δηλαδή η θερμότητα η οποία αντιστοιχεί στην υποθετική θερμοδυναμική μεταβολή 3-2, κατά την οποία δεν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ξηρού βολβού ενώ μεταβάλλεται η ειδική υγρασία του αέρα.

Η λανθάνουσα θερμότητα δεν επηρεάζει τη θερμοκρασία μιας ουσίας, για παράδειγμα το νερό παραμένει ως έχει στους 100°C ενώ βράζει. Η θερμότητα που προστίθεται για να συνεχίσει ο βρασμός του νερού είναι λανθάνουσα θερμότητα. Συνεπώς, η θερμότητα που επιφέρει αλλαγή στη φάση ενός σώματος, αλλά δεν επιφέρει καμία αλλαγή στη θερμοκρασία, ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα.

- Συνολική θερμότητα:

Ονομάζεται η ποσότητα:

$$q_{\text{συν}} = q_a + q_l = h_2 - h_1 \quad (6.3)$$

δηλαδή το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας της μεταβολής του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα.

Γίνεται αντιληπτό ότι η συνολική μεταφορά θερμότητας που λαμβάνει χώρα κατά μία θερμοδυναμική διεργασία, η οποία συμβάλει στη μεταβολή της θερμοκρασίας ξηρού βολβού και της ειδικής υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας.

- Παράγοντας αισθητής θερμότητας (sensible heat factor):

Ονομάζεται η ποσότητα:

$$SHF = \frac{q_a}{q_{\text{συν}}} = \frac{h_3 - h_1}{h_2 - h_1} \quad (6.4)$$

δηλαδή ο λόγος της αισθητής θερμότητας προς τη συνολική θερμότητα που συναλλάσσεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα κατά μία διεργασία.

Είναι φανερό ότι με τον παράγοντα αισθητής θερμότητας ορίζεται η κλίση της καταστατικής ευθείας. Η τιμή του SHF δίνεται από το ημικύκλιο στο άνω αριστερό άκρο του ψυχομετρικού χάρτη. Από το ίδιο ημικύκλιο δίνεται και ο λόγος της μεταβολής της κατάστασης αέρα, δηλαδή:

$$\frac{\Delta h}{\Delta w} = \frac{h_2 - h_1}{w_2 - w_1} \quad (6.5)$$

7 Μεταβολές κατάστασης αέρα

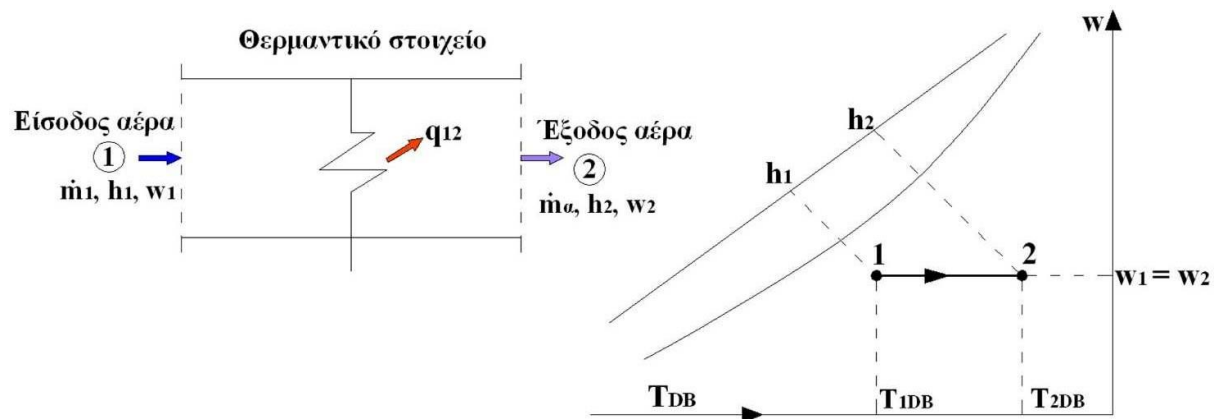
Στον κλιματισμό εμφανίζεται το πρόβλημα του υπολογισμού των θερμικών και υγρασιακών μεταβολών του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα. Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται με τη βοήθεια του ψυχομετρικού χάρτη. Στη συνέχεια δίνεται ο τρόπος υπολογισμού των συνηθέστερων από τις μεταβολές αυτές.

7.1. Θέρμανση του αέρα χωρίς μεταβολή της υγρασίας (αισθητή θέρμανση)

Κατά τη μεταβολή αυτή ο ατμοσφαιρικός αέρας απλώς θερμαίνεται, χωρίς να μεταβληθεί η περιεχόμενη σε αυτόν ποσότητα υδρατμών (π.χ. θέρμανση του αέρα με ηλεκτρική αντίσταση).

Επειδή $w_1=w_2$, η μεταβολή αυτή παριστάνεται στον ψυχομετρικό χάρτη με μία οριζόντια ευθεία ($\Delta w=0$).

Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται σχηματικά η μεταβολή αυτή, καθώς και η παράστασή της στον ψυχομετρικό χάρτη.



Σχήμα 7.1: Θέρμανση του αέρα χωρίς μεταβολή της υγρασίας του

Λόγω ισολογισμού των θερμικών φορτίων στην είσοδο και στην έξοδο της θερμαντικής συσκευής ισχύει:

$$\dot{m}_a \cdot h_1 + q_{12} = \dot{m}_a \cdot h_2 \Leftrightarrow q_{12} = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) \quad (7.1)$$

Επίσης ισχύει:

$$w_1 = w_2 \quad (7.2)$$

Τέλος, στην παρούσα μεταβολή, αλλά και σε όλες τις μεταβολές κατάστασης αέρα που θα ακολουθήσουν, ισχύει η σχέση:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{\nu} \quad (7.3)$$

όπου \dot{m} η παροχή μάζας (σε $\text{kg}_{\xi a}/\text{s}$), \dot{V} η παροχή όγκου (σε m^3/s) και ν ο ειδικός όγκος του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα ($\text{m}^3/\text{kg}_{\xi a}$).

Παράδειγμα 7.1

Θέρμανση του αέρα χωρίς μεταβολή της υγρασίας

Να υπολογιστεί η θερμική ισχύς που πρέπει να δοθεί σε ρεύμα κορεσμένου αέρα για να θερμανθεί μέχρι θερμοκρασίας 32°C, χωρίς μεταβολή της ειδικής υγρασίας του. Δίνεται η θερμοκρασία του αέρα 10°C στην είσοδο της θερμαντικής συσκευής και η παροχή μάζας αέρα 36kg/h.

Λύση

Το σημείο που αναπαριστά την αρχική κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{DB1}=10^{\circ}\text{C}$ και της καμπύλης κορεσμού, καθώς αναφέρεται ότι ο αέρας αρχικής κατάστασης είναι κορεσμένος.

Το σημείο που αναπαριστά την τελική κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{DB2}=32^{\circ}\text{C}$ και της οριζόντιας ευθείας που διέρχεται από το σημείο 1, καθώς αναφέρεται ότι η μεταβολή 1 – 2 γίνεται χωρίς μεταβολή της ειδικής υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα.

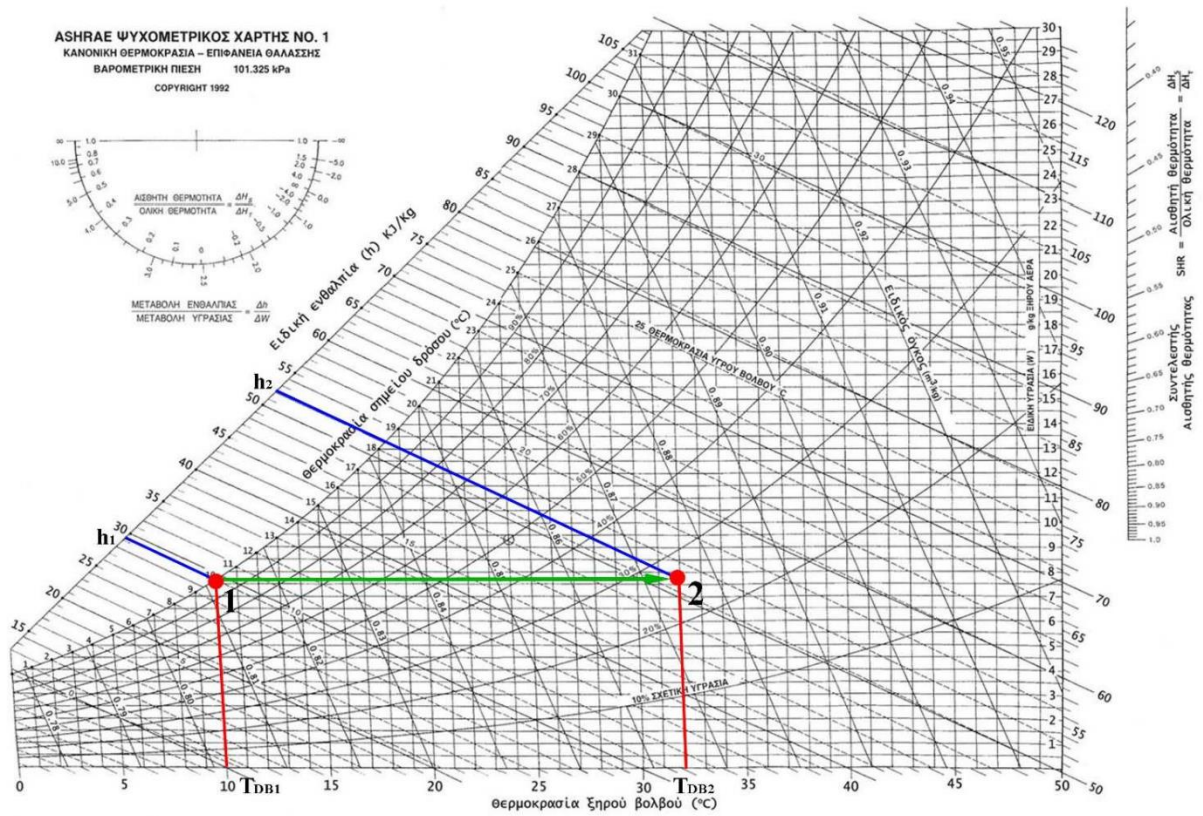
Με βάση τα ανωτέρω, από τον ψυχομετρικό χάρτη βρίσκουμε:

- ειδική ενθαλπία αρχικής κατάστασης: $h_1=29,4\text{kJ/kg}$
- ειδική ενθαλπία τελικής κατάστασης: $h_2=52,0\text{kJ/kg}$.

Συνεπώς:

$$q_{12} = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) \leftrightarrow$$
$$q_{12} = 36 \frac{\text{kg}}{3.600 \text{ sec}} \cdot (52,0 - 29,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \leftrightarrow$$
$$q_{12} = 226\text{W}$$

Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη για τον εντοπισμό των σημείων αρχικής και τελικής κατάστασης ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 7.2: Υπολογισμοί στον ψυχομετρικό χάρτη κατά τη θέρμανση του αέρα χωρίς τη μεταβολή της υγρασίας του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andrew D. Althouse and Carl H. Turnquist and A.F. Bracciano (2004) *Modern refrigeration and air conditioning*, “Goodheart-Wilcox Publisher”, Illinois.
- C. P. Arora (2000) *Refrigeration and air conditioning (in SI units)*, “Tata McGraw-Hill”, India.
- Α. Ασημακόπουλος, *Εργαστηριακές ασκήσεις ψύξης και κλιματισμού*, Αθήνα.
- Δ Κατσαπρακάκης, 4^ο Κεφάλαιο, Ψυχομετρία, 2015