

Κεφάλαιο

4

Ψυχομετρία

4.1. 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 εξηγηθεί 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 υγροποίησης υδρατμών σε βασικά δομικά στοιχεία του κτηριακού κελύφους (π.χ. μόνωση).

Στο παρόν Κεφάλαιο 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.

4.2. 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 μόνοι τους οι υδρατμοί καταλαμβάνουν το χώρο του μίγματος στη θερμοκρασία του μίγματος:

$$p = p_a + p_w \quad (4.1)$$

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

$$p_w < 0,05 \cdot p \quad (4.2)$$

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):

$$\begin{aligned} p \cdot V &= n \cdot R \cdot T \\ p \cdot V &= n \cdot M \cdot R' \cdot T \\ p \cdot V &= m \cdot R' \cdot T \\ p &= \rho \cdot R' \cdot T \end{aligned} \quad (4.3)$$

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:

$$m_{\nu\alpha} = m_a + m_w \quad (4.4)$$

4.3. Ορισμοί βασικών θερμοδυναμικών μεγεθών

Στην ενότητα αυτή ακολουθεί η παράθεση ορισμών σε βασικά μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν στο παρόν Κεφάλαιο.

- 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:

$$w = \frac{m_w}{m_a} . \quad (4.5)$$

Παρατήρηση:

Στην αμερικάνικη βιβλιογραφία ο όρος «ειδική υγρασία» (specific humidity) ορίζεται ως:

$$w = \frac{m_w}{m_{va}} \quad (4.6)$$

δηλαδή ως λόγος της μάζας των υδρατμών προς τη συνολική μάζα του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα. Η ειδική υγρασία, όπως ορίστηκε με τη σχέση 4.5, αναφέρεται στην αμερικάνικη βιβλιογραφία ως «λόγος υγρότητας» (humidity ratio) ή ως «περιεχόμενο υγρασίας» (moisture content).

- 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:

$$v = \frac{m_w}{V_{va}} . \quad (4.7)$$

- 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, οπότε 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 .

$$\phi = \frac{p_w}{p_{w-sat}}. \quad (4.8)$$

- 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 u .

$$u = \frac{V_{va}}{m_a}. \quad (4.9)$$

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:

$$\rho = \frac{1}{u} \cdot (1 + w). \quad (4.10)$$

- 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.

$$v = \frac{V_{va}}{m_{va}}. \quad (4.11)$$

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:

$$H = U + p \cdot V . \quad (4.12)$$

Με τον όρο «ενθαλπία», ο οποίος προέρχεται από το ρήμα ενθάλω = ζεσταίνω – περιθάλλω, χαρακτηρίζεται η ενέργεια που προσφέρεται κατά τη θέρμανση ουσιών και που εγκλωβίζεται στα μόριά 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:

$$h = h_{da} + w \cdot h_g \quad (4.13)$$

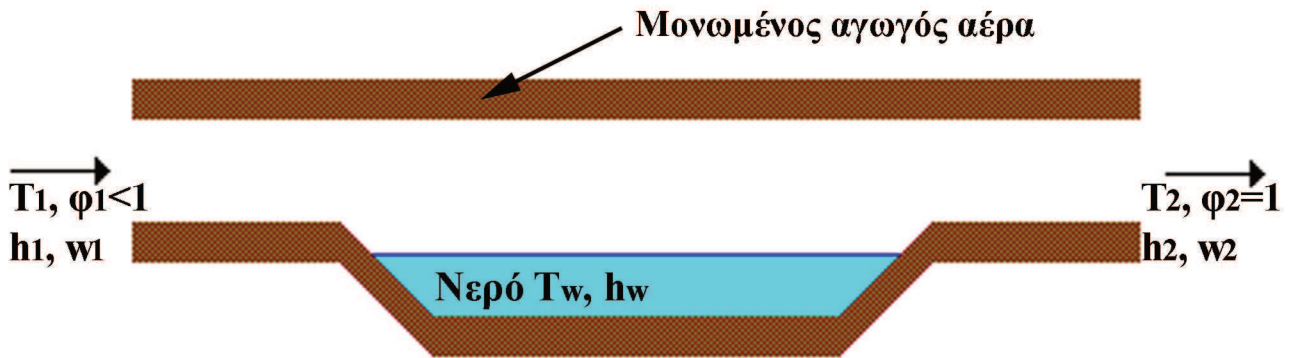
όπου h_{ad} είναι η ειδική ενθαλπία του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα, w η ειδική υγρασία του και h_g η ειδική ενθαλπία των υδρατμών. Επίσης, η ειδική ενθαλπία του ατμοσφαιρικού αέρα δίνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας ξηρού βολβού από τη σχέση:

$$h = c_{pa} \cdot T_{DB} + w \cdot (h_{g-ref} + c_{pw} \cdot T_{DB}) \quad (4.14)$$

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.

4.4. 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 εμφυσώντας 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».

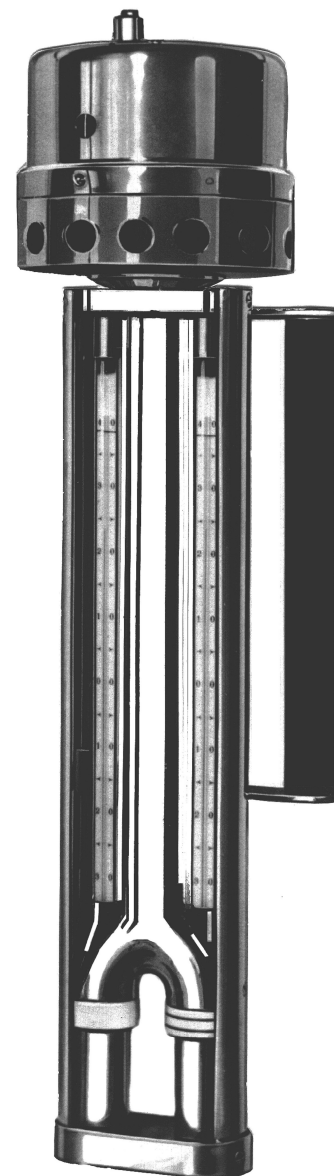
Όταν η ατμόσφαιρα είναι υγρή (υψηλή σχετική υγρασία ϕ) δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο θερμομέτρων του ψυχρόμετρου. Αν όμως είναι ξηρή (χαμηλή σχετική υγρασία ϕ), τότε η εξάτμιση στο υγρό θερμομέτρο είναι μεγάλη, με συνέπεια η θερμοκρασία μεταξύ υγρού και ξηρού θερμομέτρου να παρουσιάζει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

4.5. Ψυχομετρικός χάρτης

4.5.1. Γενικά

Ο ψυχομετρικός 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 ψυχομετρικός 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 ψυχομετρικού 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 $0,761\text{atm} = 77.058\text{Pa}$

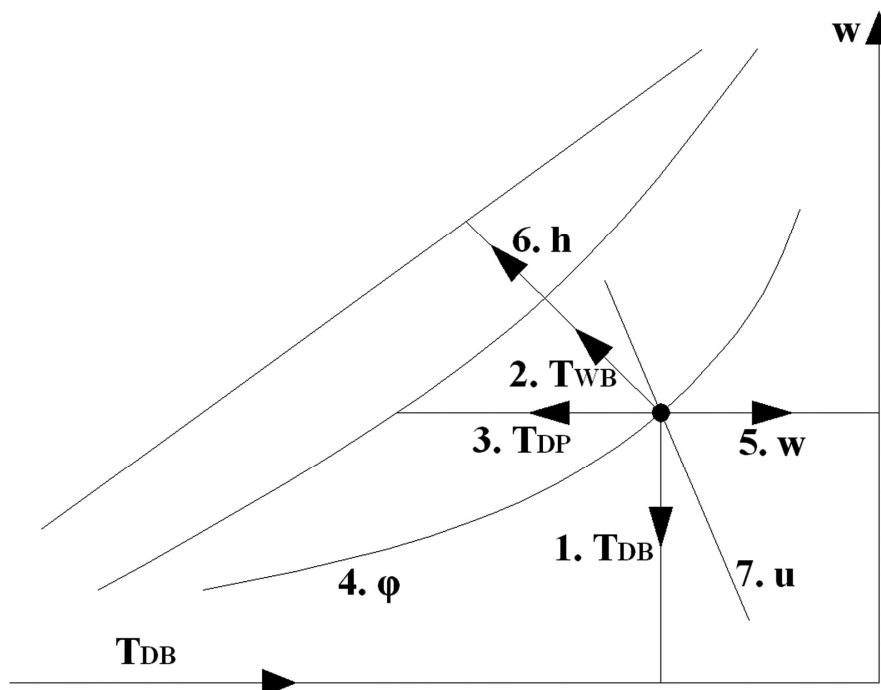
Κάθε διάγραμμα καλύπτει μία ορισμένη περιοχή θερμοκρασιών ξηρού βολβού ως εξής:

- 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 ψυχομετρικοί χάρτες, πέραν αυτών της ASHRAE, οι οποίοι αφορούν σε ειδικές περιπτώσεις και χρησιμοποιούνται αναλόγως.

4.5.2. Περιγραφή ψυχομετρικού χάρτη

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τυπικός ψυχομετρικός χάρτης της ASHRAE, η μορφή του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: 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 4.2 και οι οποίες αντιστοιχούν στα ακόλουθα ψυχομετρικά μεγέθη του αέρα.

- 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.

- Θερμοκρασία υγρού βολβού (T_{WB}):

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

- Θερμοκρασία σημείου δρόσου (T_{DP}):

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

- Σχετική υγρασία φ:

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

- Ειδική υγρασία w:

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

- Ειδική ενθαλπία h:

Μετριέται 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.

- Ειδικός όγκος u:

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 4.3 παρουσιάζεται ο ψυχομετρικός χάρτης της ASHRAE, με μονάδες S.I. και με πεδίο τιμών θερμοκρασιών 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.

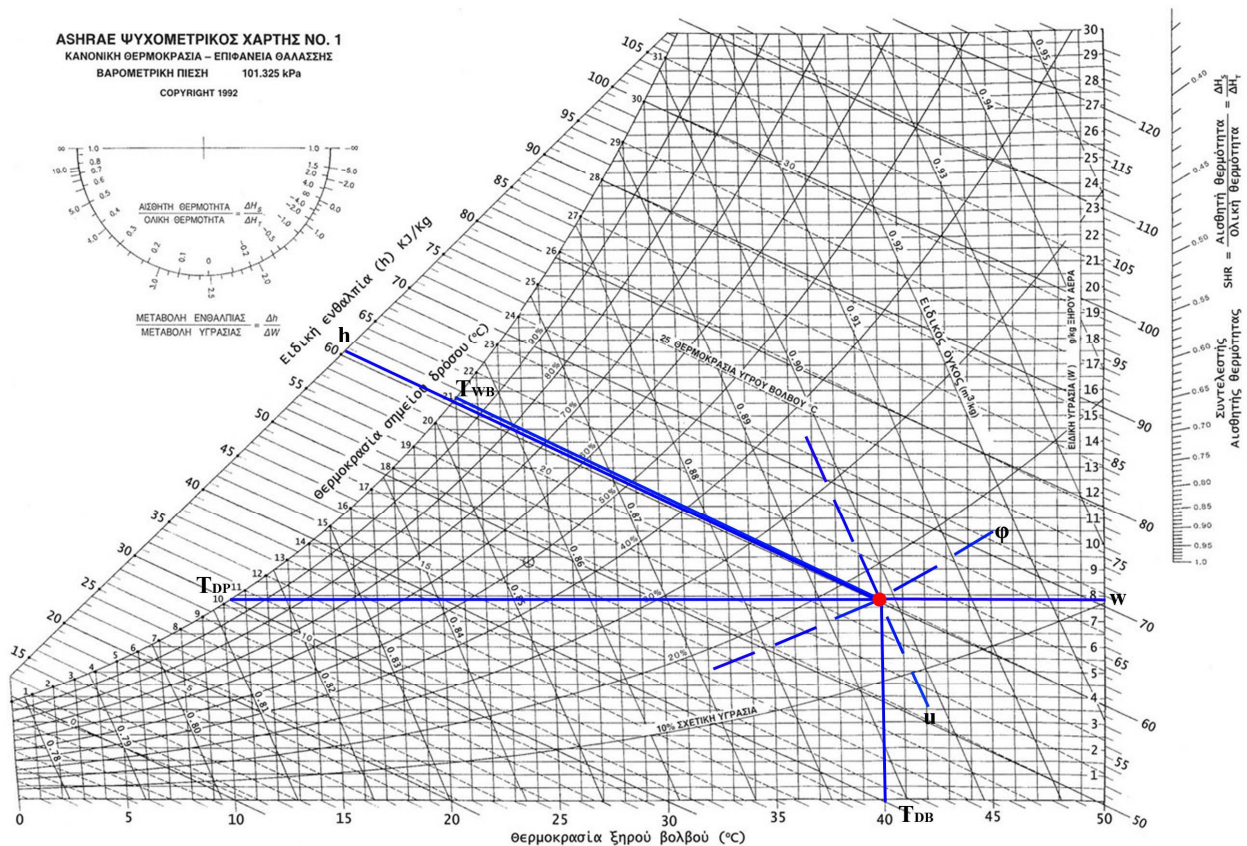
Παράδειγμα 4.1

Ανάγνωση καταστατικών μεγεθών ατμοσφαιρικού αέρα από τον ψυχομετρικό χάρτη

Δίνεται υγρός αέρας θερμοκρασίας ξηρού βολβού $T_{DB}=40^{\circ}C$ και θερμοκρασίας υγρού βολβού $T_{WB}=21^{\circ}C$. 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 4.4 παρουσιάζεται γραφικά ο εντοπισμός στον ψυχομετρικό χάρτη του σημείου που αναπαριστά την κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα και ο τρόπος ανάγνωσης των λοιπών καταστατικών μεγεθών.



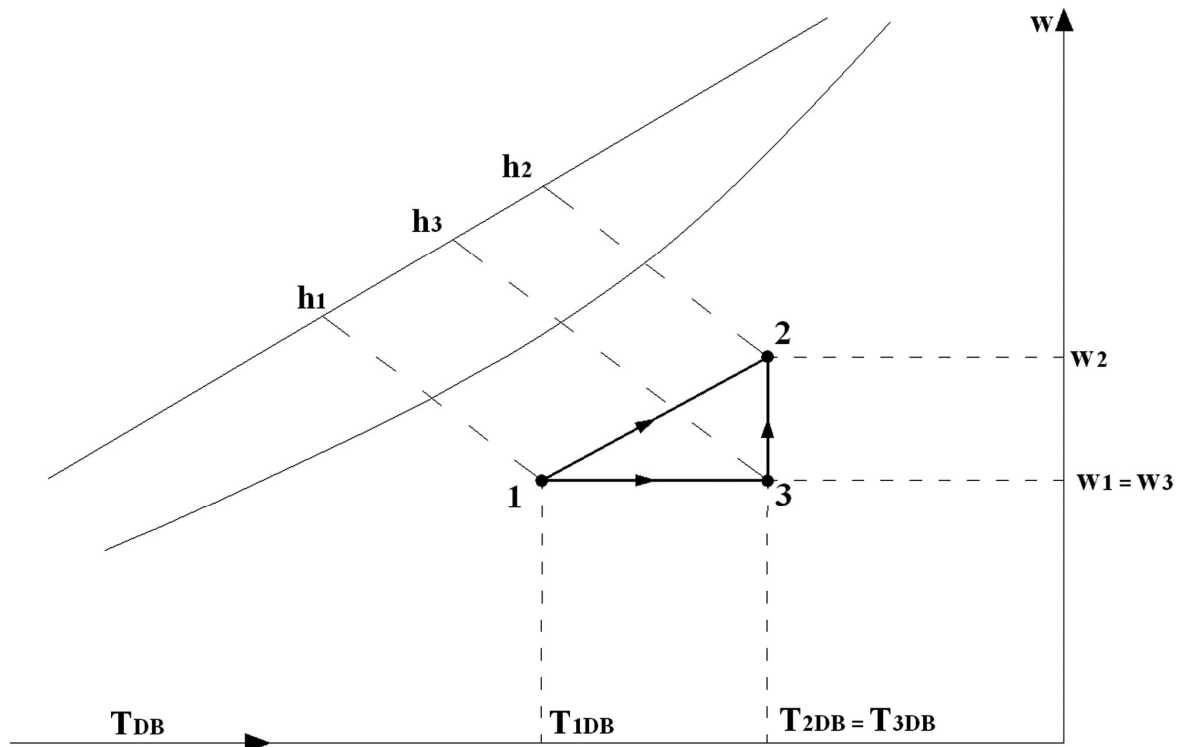
Σχήμα 4.4: Ανάγνωση καταστατικών μεγεθών ατμοσφαιρικού αέρα από τον ψυχομετρικό χάρτη.

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 ισηνθαλπική 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: $u=0,898\text{m}^3/\text{kg}$, αναλογικά με βάση τις διαγώνιες ευθείες σταθερού ειδικού όγκου εκατέρωθεν του σημείου κατάστασης αέρα.

4.6. Αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα

Έστω αέρας αρχικής κατάστασης 1 που υφίσταται μεταβολή στη θερμική κατάστασή του και τελικά μεταβαίνει στην κατάσταση 2 (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: 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:

$$q_a = h_3 - h_1 \quad (4.15)$$

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:

$$q_\lambda = h_2 - h_3 \quad (4.16)$$

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:

$$q_{\text{συν}} = q_a + q_\lambda = h_2 - h_1 \quad (4.17)$$

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:

$$SHF = \frac{q_a}{q_{\text{συν}}} = \frac{h_3 - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4.18)$$

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 ημικόκλιο στο άνω αριστερό άκρο του ψυχομετρικού χάρτη. Από το ίδιο ημικόκλιο δίνεται και ο λόγος της μεταβολής της κατάστασης αέρα, δηλαδή:

$$\frac{\Delta h}{\Delta w} = \frac{h_2 - h_1}{w_2 - w_1} \quad (4.19)$$

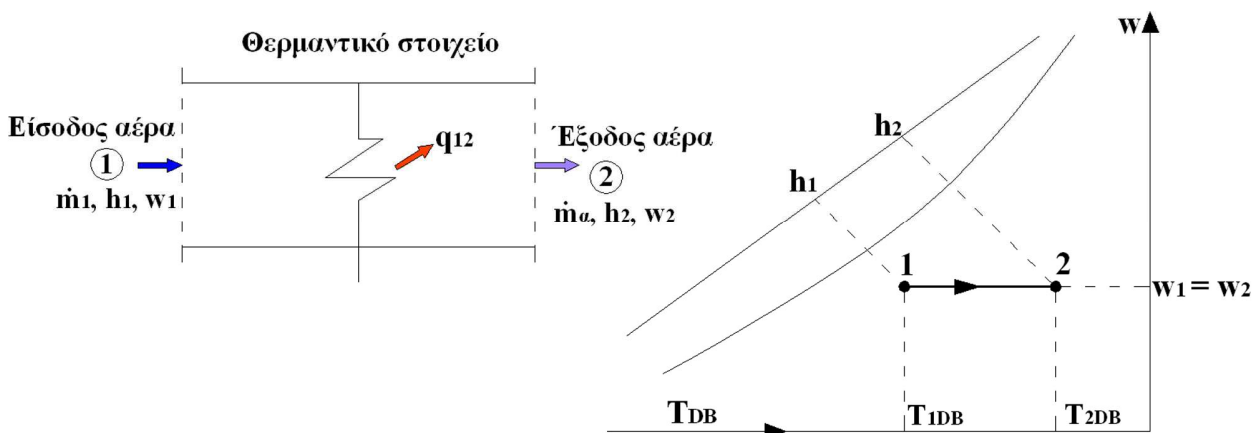
4.7. Μεταβολές κατάστασης αέρα

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.

4.7.1. 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 4.6 παρουσιάζεται σχηματικά η μεταβολή αυτή, καθώς και η παράστασή της στον ψυχομετρικό χάρτη.



Σχήμα 4.6: Θέρμανση του αέρα χωρίς μεταβολή της υγρασίας του.

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

$$\dot{m}_a \cdot h_1 + q_{12} = \dot{m}_a \cdot h_2 \Leftrightarrow q_{12} = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1). \quad (4.20)$$

Επίσης ισχύει:

$$w_1 = w_2. \quad (4.21)$$

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

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{u} \quad (4.22)$$

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

Παράδειγμα 4.2

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 $36\text{kg}/\text{h}$.

Λύση

Το σημείο που αναπαριστά την αρχική κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{\text{DB1}}=10^\circ\text{C}$ 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 $T_{\text{DB2}}=32^\circ\text{C}$ 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:

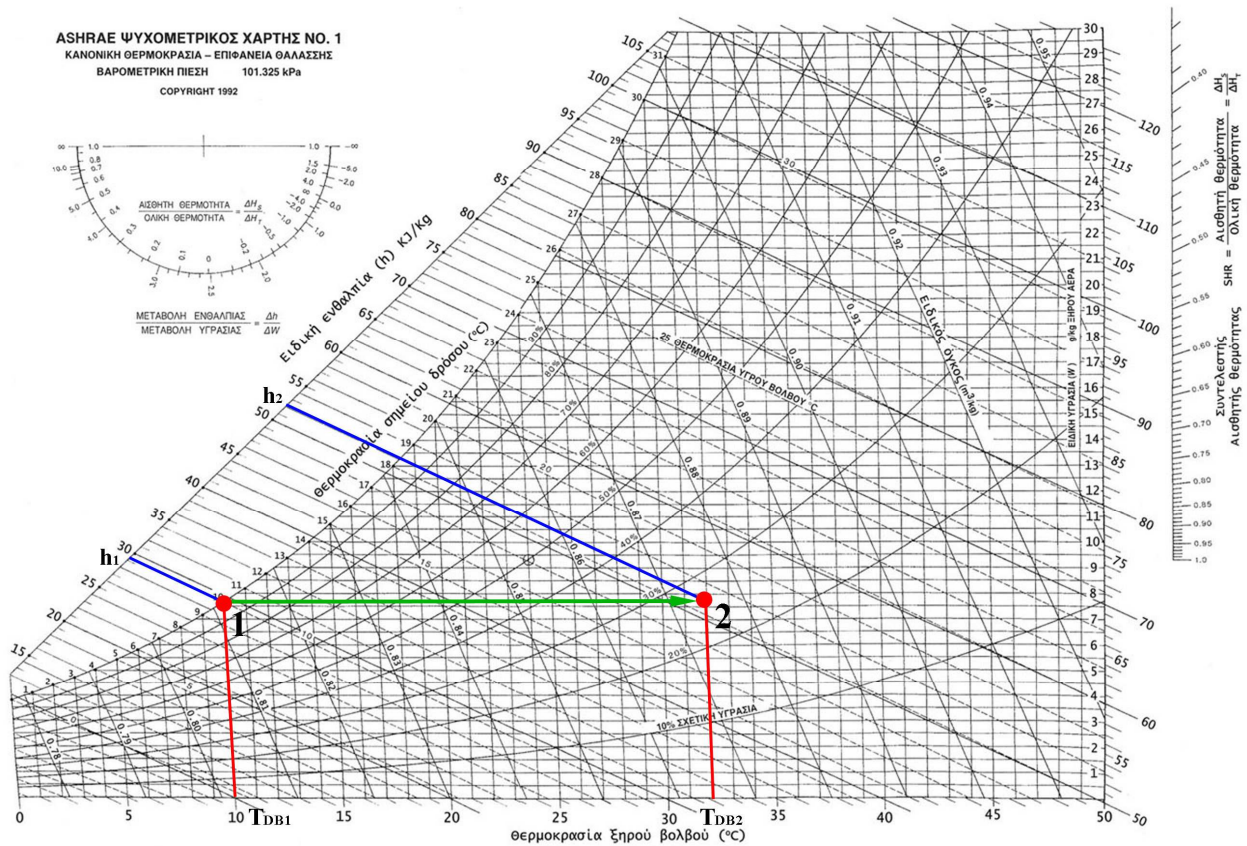
- ειδική ενθαλπία αρχικής κατάστασης: $h_1=29,4\text{kJ}/\text{kg}$
- ειδική ενθαλπία τελικής κατάστασης: $h_2=52,0\text{kJ}/\text{kg}$.

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



Σχήμα 4.7: Υπολογισμοί στον ψυχομετρικό χάρτη κατά τη θέρμανση του αέρα χωρίς τη μεταβολή της υγρασίας του.

4.7.2. Ψύξη του αέρα χωρίς αφύγρανση (αισθητή ψύξη)

Η ψύξη χωρίς αφύγρανση μπορεί να θεωρηθεί ως η αντίθετη μεταβολή της αισθητής θέρμανσης. Η μεταβολή παριστάνεται στον ψυχομετρικό χάρτη από οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα αντίθετης φοράς από την περίπτωση της θέρμανσης. Καθώς δεν υπάρχει αφύγρανση, το ευθύγραμμο τμήμα δεν συναντά την καμπύλη κορεσμού στο χάρτη. Σχηματική παρουσίαση και αναπαράσταση της μεταβολής στον ψυχομετρικό χάρτη δίνονται στο σχήμα 4.8.

Κατά τη μεταβολή αυτή ισχύουν οι προηγούμενες σχέσεις:

$$W_1 = W_2 \tag{4.23}$$

και

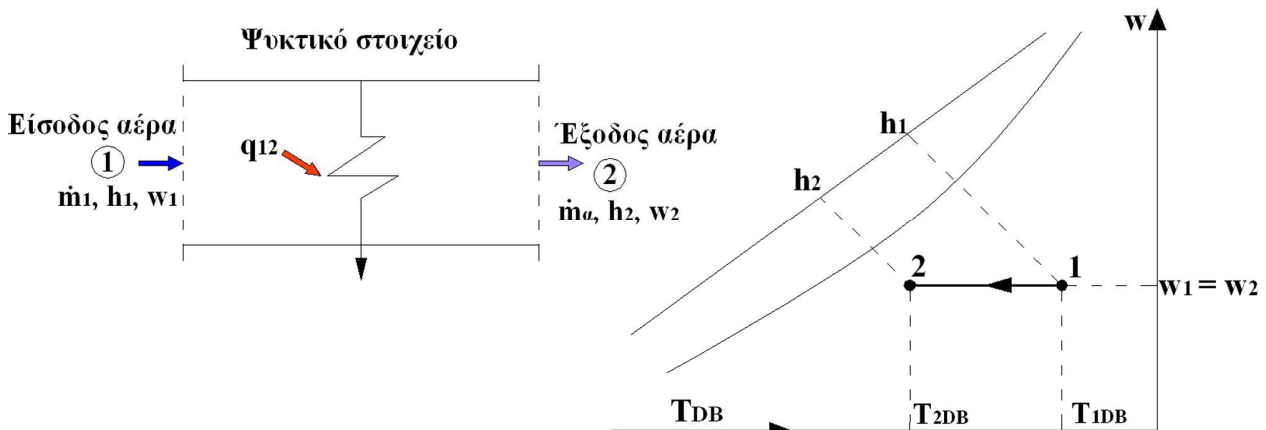
$$q_{12} = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) < 0. \tag{4.24}$$

Παρατήρηση:

Όταν η θερμότητα κατά τη μεταβολή του αέρα είναι αρνητική ($q_{12} < 0$) ο αέρας αποβάλλει θερμότητα προς το ψυκτικό στοιχείο. Επομένως η ποσότητα:

$$|q_{12}| = \dot{m}_a \cdot |h_2 - h_1|$$

θα χαρακτηρίζεται ως η «αποβαλλόμενη θερμική ισχύς από τον αέρα» ή η «ψυκτική ισχύς του ψυκτικού στοιχείου».



Σχήμα 4.8: Ψύξη του αέρα χωρίς αφύγρανση.

Παράδειγμα 4.3

Ψύξη του αέρα χωρίς αφύγρανση

Ρεύμα αέρα $4,72\text{m}^3/\text{sec}$ εισάγεται σε ψυκτική συσκευή και ψύχεται χωρίς αφύγρανση. Να υπολογιστεί η αποβαλλόμενη θερμική ισχύς από τον αέρα. Δίνονται οι θερμοκρασίες αέρα στην είσοδο της συσκευής $T_{\text{DB1}}=20,5^\circ\text{C}$ και $T_{\text{WB1}}=12,8^\circ\text{C}$. Στην έξοδο της συσκευής δίνεται η θερμοκρασία $T_{\text{WB2}}=10^\circ\text{C}$.

Λύση

Το σημείο που αναπαριστά την αρχική κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{\text{DB1}}=20,5^\circ\text{C}$ και της ισοθερμοκρασιακής υγρού βολβού $T_{\text{WB1}}=12,8^\circ\text{C}$.

Το σημείο που αναπαριστά την τελική κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής υγρού βολβού $T_{\text{WB2}}=10^\circ\text{C}$ 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 κατάστασης 1: $h_1=36,0\text{kJ/kg}$
- ειδικός όγκος αέρα κατάστασης 1: $u_1=0,839\text{m}^3/\text{kg}$
- ειδική ενθαλπία κατάστασης 2: $h_2=29,0\text{kJ/kg}$.

Έχοντας προσδιορίσει τις συνθήκες του αέρα στην αρχική και τελική κατάσταση, μπορούμε να υπολογίσουμε:

- παροχή μάζας ρεύματος αέρα:

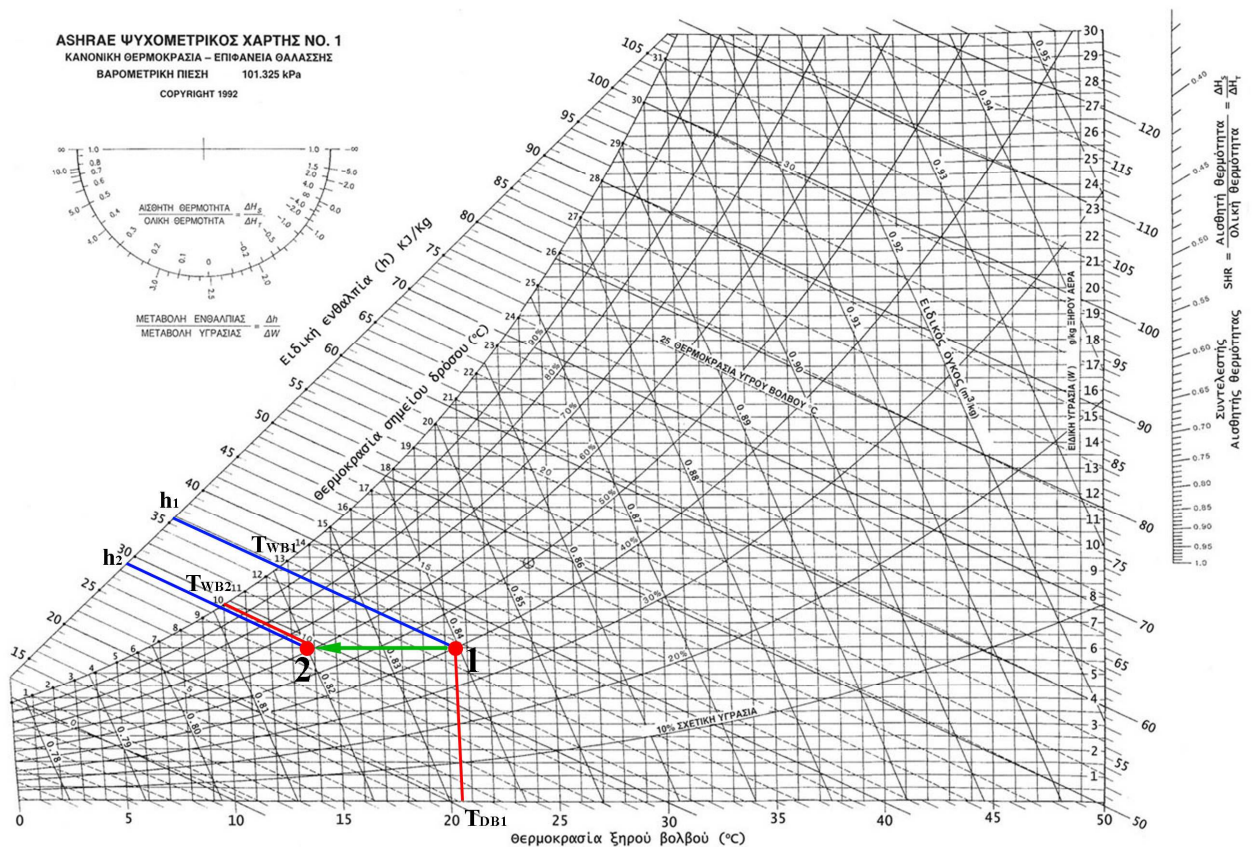
$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{u} \Leftrightarrow \dot{m}_a = \frac{4,72 \text{ m}^3/\text{sec}}{0,839 \text{ m}^3/\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_a = 5,626 \text{ kg/sec}$$

- αποβαλλόμενη θερμική ισχύς στο ψυκτικό στοιχείο:

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

$$q_{12} = 5,626 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \cdot (36,0 - 29,0) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow q_{12} = 39,38 \text{ kW}$$

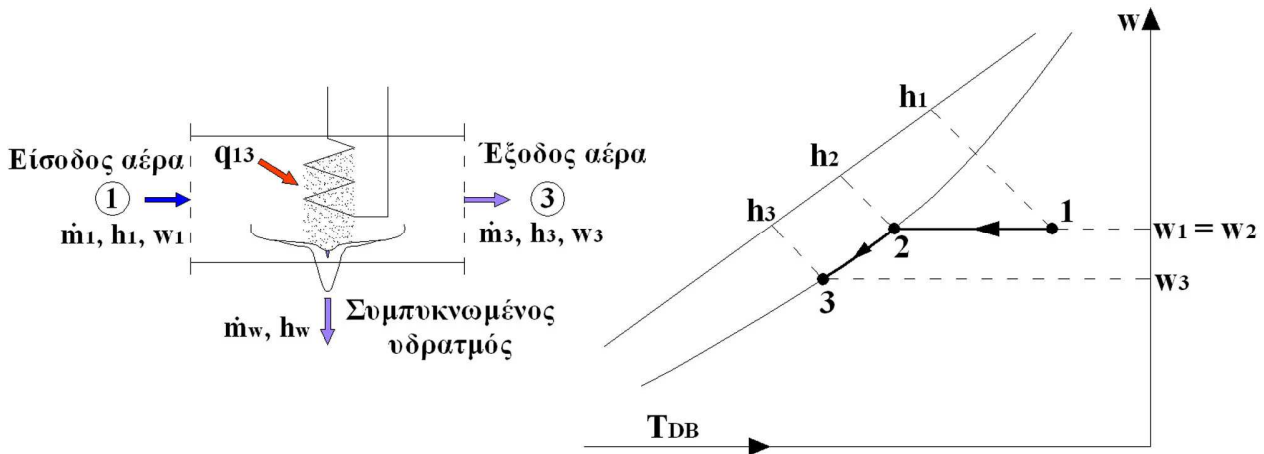
Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη για τον εντοπισμό των σημείων αρχικής και τελικής κατάστασης ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 4.9: Υπολογισμοί στον ψυχομετρικό χάρτη κατά την ψύξη του αέρα χωρίς αφύγρανση.

4.7.3. Ψύξη του αέρα με αφύγρανση

Κατά τη μεταβολή αυτή, σε αντίθεση με την προηγούμενη, ο ψυχόμενος αέρας φθάνει μέχρι την καμπύλη κορεσμού, όπου μέρος του υδατμού που υπάρχει στον αέρα υγροποιείται. Η μεταβολή παριστάνεται στον ψυχομετρικό χάρτη από το οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα 1-2 και από το τμήμα 2-3 πάνω στην καμπύλη κορεσμού (σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Ψύξη του αέρα με αφύγρανση.

Κατά τη μεταβολή 1-2 δεν αποβάλλεται νερό, οπότε $w_1=w_2$. Ο υδρατμός υγροποιείται κατά τη μεταβολή 2-3, κατά την οποία η ειδική υγρασία μειώνεται, δηλαδή $w_3 < w_2 = w_1$. Για τη συνολική μεταβολή ισχύουν οι σχέσεις:

- ισολογισμός μάζας νερού:

$$\dot{m}_a \cdot w_1 = \dot{m}_a \cdot w_3 + \dot{m}_w \Leftrightarrow \dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot (w_1 - w_3) \tag{4.25}$$

- ισολογισμός θερμικής ισχύος:

$$\begin{aligned} \dot{m}_a \cdot h_1 &= \dot{m}_a \cdot h_3 + \dot{m}_w \cdot h_w + q_{13} \Leftrightarrow \\ q_{13} &= \dot{m}_a \cdot [(h_1 - h_3) - h_w \cdot (w_1 - w_3)] \end{aligned} \tag{4.26}$$

όπου \dot{m}_w η παροχή μάζας των συμπυκνωμένων υδρατμών και h_w η ειδική ενθαλπία τους. Η ενθαλπία h_w μπορεί να υπολογιστεί με ικανοποιητική προσέγγιση από τη σχέση:

$$h_w = 4,187 \cdot T_w \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \tag{4.27}$$

όπου h_w σε kJ/kg και T_w η θερμοκρασία των συμπυκνωμάτων σε °C, η οποία συνήθως λαμβάνεται ίση με τη θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα μετά την ψύξη.

Παράδειγμα 4.4

Ψύξη του αέρα με αφύγρανση

Ρεύμα υγρού αέρα $4,72 \text{ m}^3/\text{sec}$, θερμοκρασίας $T_{DB1}=26,7^\circ\text{C}$ και σχετικής υγρασίας 60% ψύχεται, μέχρι να προκύψει κορεσμένος αέρας με θερμοκρασία $T_{DB3}=10^\circ\text{C}$. Να βρεθεί η αποβαλλόμενη θερμική ισχύς από τον αέρα στη συσκευή.

Λύση

Το σημείο που αναπαριστά την αρχική κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{DB1}=26,7^{\circ}\text{C}$ και της καμπύλης σχετικής υγρασίας $\phi_1=60\%$.

Το σημείο που αναπαριστά την τελική κατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής υγρού βολβού $T_{DB3}=10^{\circ}\text{C}$ και της καμπύλης κορεσμού, καθώς αναφέρεται ότι ο αέρας στην τελική κατάσταση προκύπτει κορεσμένος.

Με βάση τα ανωτέρω, από τον ψυχομετρικό χάρτη βρίσκουμε:

- ειδική ενθαλπία κατάστασης 1: $h_1=60,5\text{kJ/kg}$
- ειδικός όγκος αέρα κατάστασης 1: $u_1=0,868\text{m}^3/\text{kg}$
- ειδική υγρασία κατάστασης 1: $w_1=13,3\text{gr υδ./kg ξ.α.}$
- ειδική ενθαλπία κατάστασης 3: $h_3=29,4\text{kJ/kg}$
- ειδική υγρασία κατάστασης 3: $w_3=7,7\text{gr υδ./kg ξ.α.}$
- θερμοκρασία συμπυκνωμάτων υδρατμών: $T_w=T_{DB3}=10^{\circ}\text{C}$.

Μετά τον προσδιορισμό των ανωτέρω συνθηκών υπολογίζουμε:

- ενθαλπία υδρατμών:

$$h_w = 4,187 \cdot T_w \Leftrightarrow h_w = 4,187 \cdot 10^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow h_w = 41,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- παροχή μάζας αέρα:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{u} \Leftrightarrow \dot{m}_a = \frac{4,72 \text{ m}^3/\text{sec}}{0,868 \text{ m}^3/\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_a = 5,438\text{kg/sec}$$

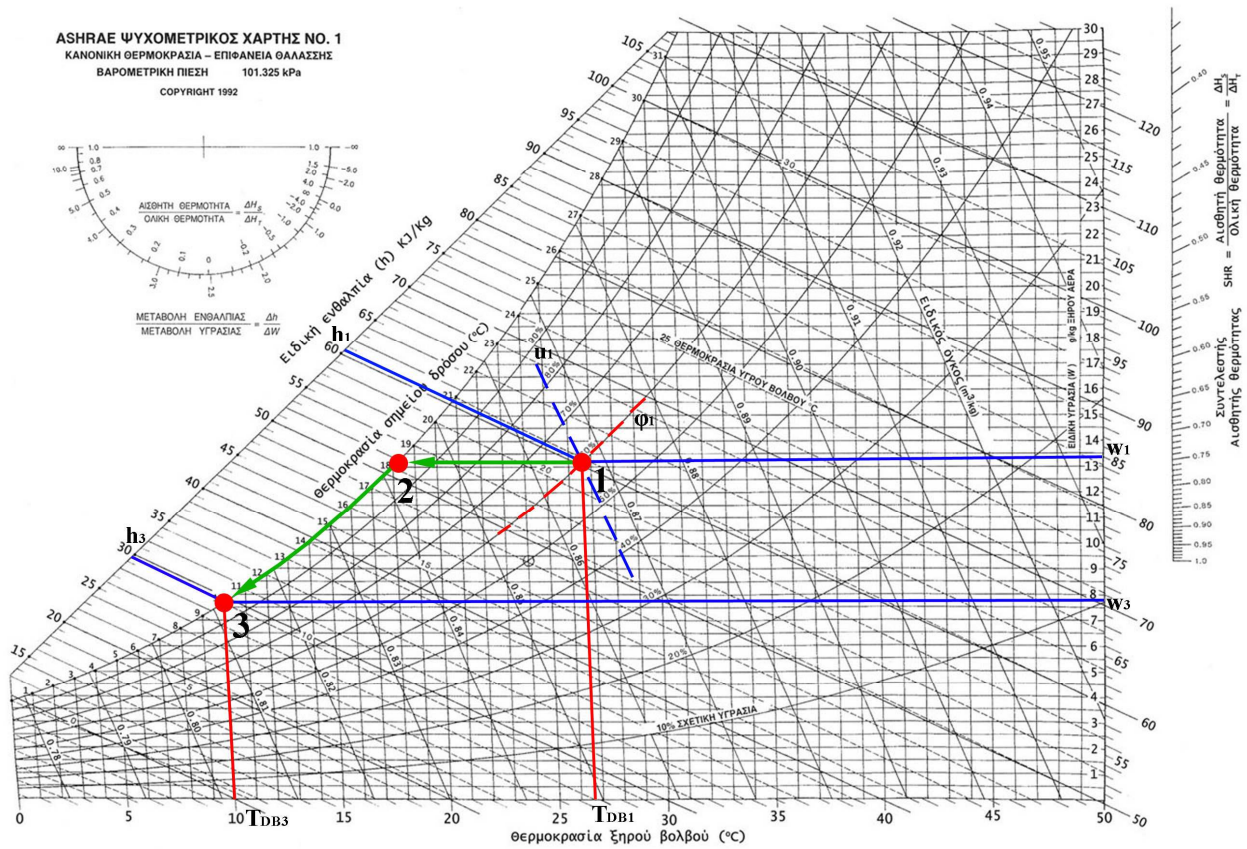
- αποβαλλόμενη θερμική ισχύς:

$$q_{13} = \dot{m}_a \cdot [(h_1 - h_3) - h_w \cdot (w_1 - w_3)] \Leftrightarrow$$

$$q_{13} = 5,438 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \cdot \left[(60,5 - 29,4) \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} - 41,87 \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \cdot (0,0133 - 0,0077) \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$$

$$\Leftrightarrow q_{13} = 167,85\text{kW}$$

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη για τον εντοπισμό των σημείων αρχικής και τελικής κατάστασης ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 4.11: Υπολογισμοί στον ψυχομετρικό χάρτη κατά την ψύξη του αέρα με αφύγρανση.

4.7.4. Αδιαβατική ανάμιξη δύο ρευμάτων υγρού αέρα

Κατά τη διεργασία αυτή δύο αρχικά ανεξάρτητα ρεύματα αέρα (1) και (2) αναμιγνύονται αδιαβατικά για να προκύψει τελικά ένα νέο ρεύμα (3) (σχήμα 4.12). Η αδιαβατική ανάμιξη συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας από ή προς το περιβάλλον, παρά μόνο μεταξύ των ρευμάτων.

Ισχύουν οι σχέσεις:

- Ισολογισμός μάζας:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \tag{4.28}$$

- Ισολογισμός μάζας υδρατμών:

$$\dot{m}_1 \cdot w_1 + \dot{m}_2 \cdot w_2 = \dot{m}_3 \cdot w_3 \tag{4.29}$$

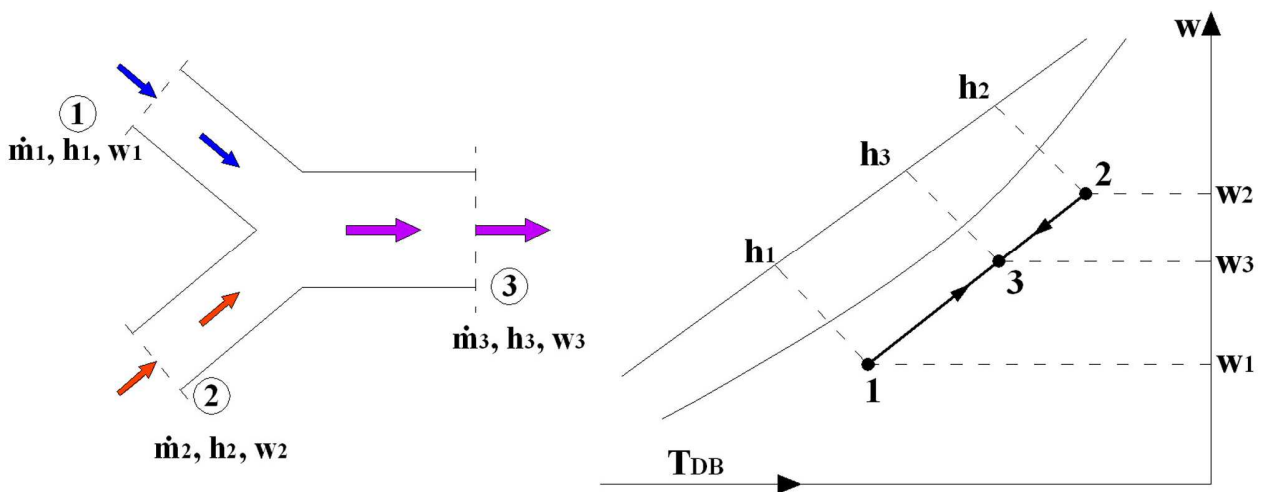
- Ισολογισμός θερμικής ισχύος:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_3 \cdot h_3 \tag{4.30}$$

Από τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτει:

$$\frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \quad (4.31)$$

Από την ανωτέρω σχέση συνεπάγεται (αποδεικνύεται γεωμετρικά), ότι τα σημεία 1, 2 και 3 βρίσκονται στην ίδια ευθεία του ψυχομετρικού χάρτη. Επομένως συμπεραίνεται ότι το καταστατικό σημείο 3 του μίγματος στον ψυχομετρικό χάρτη θα βρίσκεται πάνω στην ευθεία που ορίζουν τα σημεία 1 και 2 των αναμειγνυόμενων ρευμάτων και μάλιστα ανάμεσα στα σημεία 1 και 2, πλησιέστερα δε στο σημείο του μεγαλύτερου ρεύματος αέρα.



Σχήμα 4.12: Αδιαβατική ανάμιξη ρευμάτων αέρα και αναπαράσταση στον ψυχομετρικό χάρτη.

Η θέση του σημείου 3 μπορεί να βρεθεί υπολογιστικά αν από τις προηγούμενες σχέσεις υπολογιστεί η ενθαλπία h_3 ή η ειδική υγρασία του μίγματος w_3 . Στην περίπτωση αυτή, το σημείο 3 προκύπτει ως η τομή της ευθείας που ορίζεται από τα σημεία 1 και 2 και της ευθείας σταθερής ειδικής ενθαλπίας h_3 ή ειδικής υγρασίας w_3 . Επίσης, η θέση του σημείου 3 στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται και γραφικά, κατά αντίστροφη αναλογία με τις παροχές των αναμειγνυόμενων ρευμάτων.

Παράδειγμα 4.5

Αδιαβατική ανάμιξη δύο ρευμάτων υγρού αέρα

Ρεύμα αέρα $1,89\text{m}^3/\text{sec}$, θερμοκρασίας ξηρού βολβού $T_{DB1}=4,5^\circ\text{C}$ και θερμοκρασίας υγρού βολβού $T_{WB1}=1,5^\circ\text{C}$, αναμειγνύεται αδιαβατικά με ρεύμα αέρα $6,13\text{m}^3/\text{sec}$, θερμοκρασίας ξηρού βολβού $T_{DB2}=23,9^\circ\text{C}$ και σημείου δρόσου $T_{DP2}=12,8^\circ\text{C}$. Να βρεθούν οι θερμοκρασίες υγρού και ξηρού βολβού του μίγματος που θα προκύψει.

Λύση

Το σημείο που αναπαριστά την κατάσταση του πρώτου ρεύματος αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{DB1}=4,5^\circ\text{C}$ και της ισοθερμοκρασιακής υγρού βολβού $T_{WB1}=1,5^\circ\text{C}$.

Το σημείο που αναπαριστά την κατάσταση του δεύτερου ρεύματος αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{DB2}=23,9^\circ\text{C}$ και της ισοθερμοκρασιακής σημείου δρόσου $T_{DP2}=12,8^\circ\text{C}$.

Με βάση τα ανωτέρω, από τον ψυχομετρικό χάρτη βρίσκουμε:

- ειδικός όγκος ρεύματος 1: $u_1=0,79\text{m}^3/\text{kg}$
- ειδική ενθαλπία ρεύματος 1: $h_1=12,1\text{kJ/kg}$
- ειδικός όγκος ρεύματος 2: $u_2=0,854\text{m}^3/\text{kg}$
- ειδική ενθαλπία ρεύματος 2: $h_2=47,2\text{kJ/kg}$.

Μετά τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των δύο ρευμάτων αέρα, υπολογίζουμε:

- Παροχή μάζας ρεύματος 1:

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{V}_1}{u_1} \Leftrightarrow \dot{m}_1 = \frac{1,89 \text{ m}^3/\text{sec}}{0,79 \text{ m}^3/\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_1 = 2,392\text{kg/sec}.$$

- Παροχή μάζας ρεύματος 2:

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{V}_2}{u_2} \Leftrightarrow \dot{m}_2 = \frac{6,13 \text{ m}^3/\text{sec}}{0,854 \text{ m}^3/\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_2 = 7,178\text{kg/sec}.$$

- Ισολογισμός παροχών μάζας ρευμάτων αέρα κατά την αδιαβατική ανάμιξή τους:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \Leftrightarrow \dot{m}_3 = 7,178 + 2,392 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \Leftrightarrow \dot{m}_3 = 9,570 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}.$$

- Ισολογισμός θερμικής ισχύος κατά την αδιαβατική ανάμιξη των ρευμάτων:

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_3 \cdot h_3 \Leftrightarrow h_3 = \frac{\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2}{\dot{m}_3} \Leftrightarrow$$

$$h_3 = \frac{2,392\text{kg/s} \cdot 12,1\text{kJ/kg} + 7,178\text{kg/s} \cdot 47,2\text{kJ/kg}}{9,570\text{kg/s}} \Leftrightarrow h_3 = 38,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Το σημείο 3 εντοπίζεται πάνω στον ψυχομετρικό χάρτη από την τομή της ισενθαλπικής $h_3=38,42\text{kJ/kg}$ και της ευθείας που ενώνει τα σημεία 1 και 2 που αναπαριστούν τις καταστάσεις των αρχικών ρευμάτων αέρα.

Εναλλακτικά, το σημείο 3 εντοπίζεται πάνω στο χάρτη στο ευθύγραμμο τμήμα 1-2 αναλογικά με τις παροχές μάζας. Ο λόγος των παροχών μάζας είναι:

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{2,392}{7,178} = \frac{1}{3}.$$

Με βάση την ανωτέρω αναλογία παροχών μάζας των δύο ρευμάτων, το σημείο 3 θα βρίσκεται μεταξύ των σημείων 1 και 2, με απόσταση από το σημείο 1 τριπλάσια της απόστασης από το σημείο 2. Δηλαδή ο λόγος των μηκών των ευθυγράμμων τμημάτων (13) και (23) είναι αντιστρόφως ανάλογος των λόγων των παροχών μάζας, ώστε το σημείο 3 να βρίσκεται κοντύτερα στο ρεύμα αέρα με τη μεγαλύτερη παροχή:

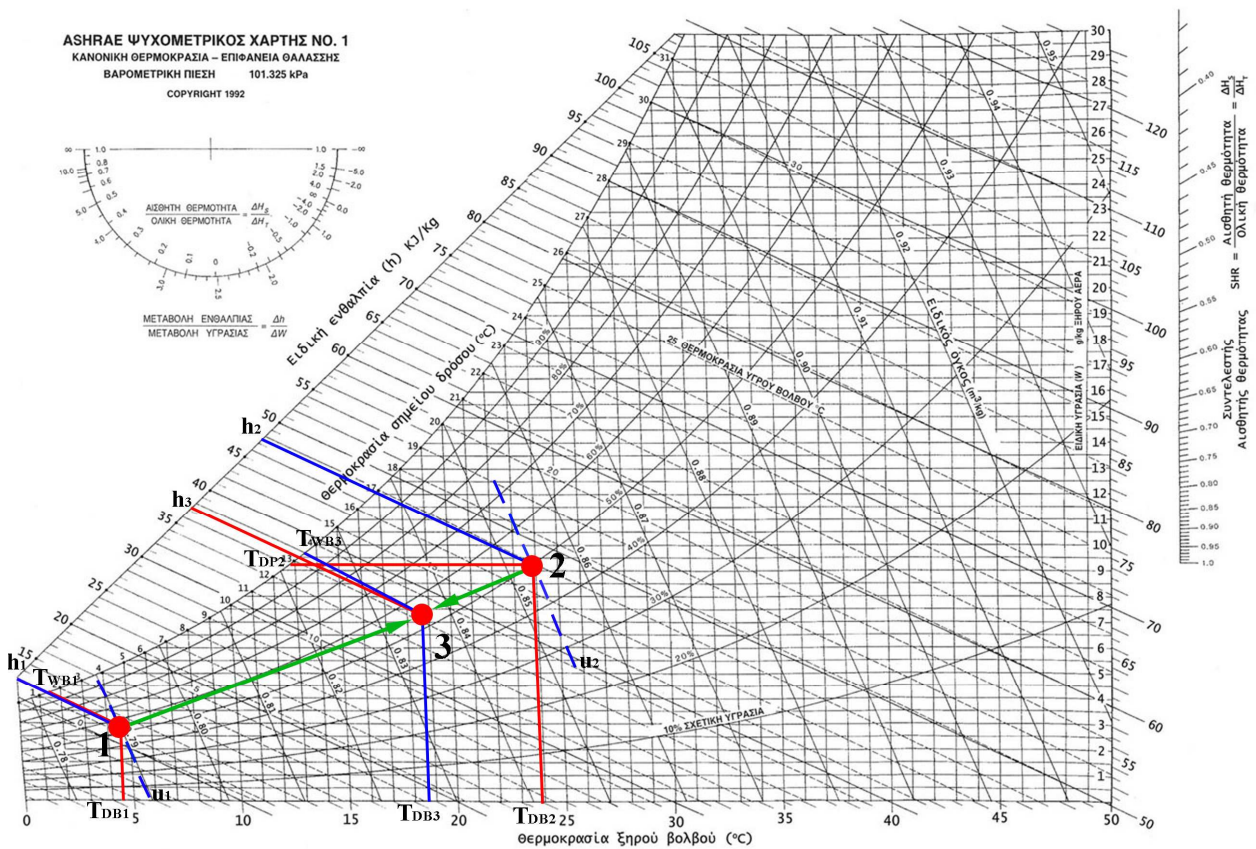
$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{|23|}{|13|} = \frac{1}{3}.$$

Η εύρεση του σημείου 3 πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα 1-3 με το γραφικό τρόπο είναι άμεση με τη διαίρεση του τμήματος σε 4 ίσα μέρη.

Τελικά, εντοπίζοντας το σημείο 3 του μίγματος των ρευμάτων αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, προκύπτει:

- $T_{DB3}=19,1^{\circ}\text{C}$
- $T_{WB3}=13,7^{\circ}\text{C}$.

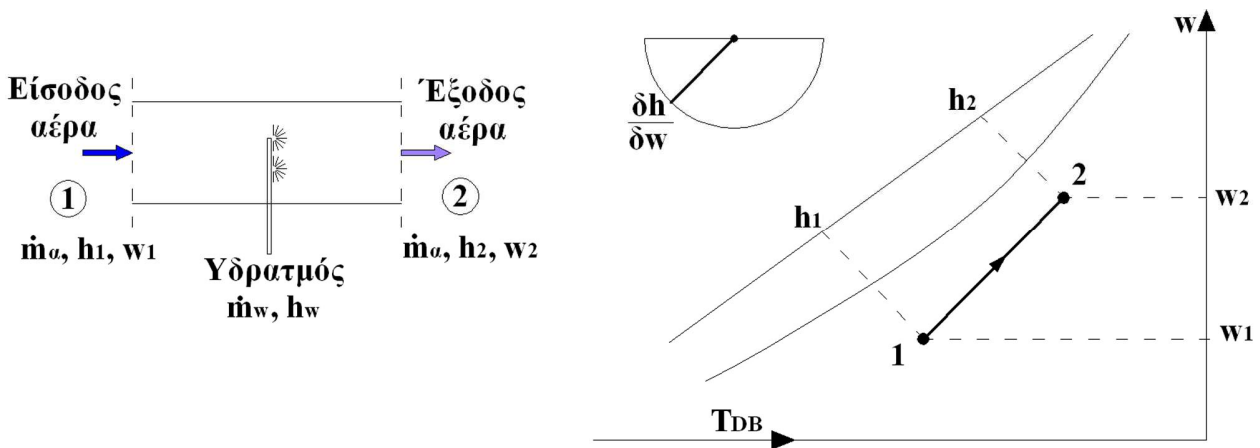
Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη για τον εντοπισμό των σημείων αρχικής και τελικής κατάστασης ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 4.13: Ψυχομετρικοί υπολογισμοί στον ψυχομετρικό χάρτη κατά την αδιαβατική ανάμιξη ρευμάτων αέρα.

4.7.5. Αδιαβατική ύγρανση ρεύματος αέρα

Κατά τη μεταβολή αυτή της κατάστασης του αέρα, νερό ή υδρατμός διασκορπίζεται σε ρεύμα αέρα, το οποίο υγραίνεται αδιαβατικά, χωρίς τη συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, παρά μόνο μεταξύ αέρα και νερού (σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Αδιαβατική ύγρανση ρεύματος αέρα.

Αν \dot{m}_w και h_w είναι η παροχή μάζας και η ειδική ενθαλπία του εγχυόμενου νερού στο ρεύμα, τότε ισχύουν οι εξισώσεις:

- Ισολογισμός μάζας υδρατμών:

$$\dot{m}_a \cdot w_1 + \dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot w_2 \quad (4.32)$$

- Ισολογισμός θερμικής ισχύος:

$$\dot{m}_a \cdot h_1 + \dot{m}_w \cdot h_w = \dot{m}_a \cdot h_2 \quad (4.33)$$

- Από τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτει:

$$h_w = \frac{h_1 - h_2}{w_1 - w_2} \Leftrightarrow h_w = \frac{\Delta h}{\Delta w} \quad (4.34)$$

Όμως ο λόγος $\Delta h/\Delta w$ καθορίζει την κλίση της καταστατικής ευθείας 1-2. Από την τελευταία σχέση φαίνεται, συνεπώς, ότι η κλίση της καταστατικής ευθείας 1-2 του αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη εξαρτάται από την ενθαλπία h_w του νερού ή του υδρατμού που εγχύεται στο ρεύμα του αέρα.

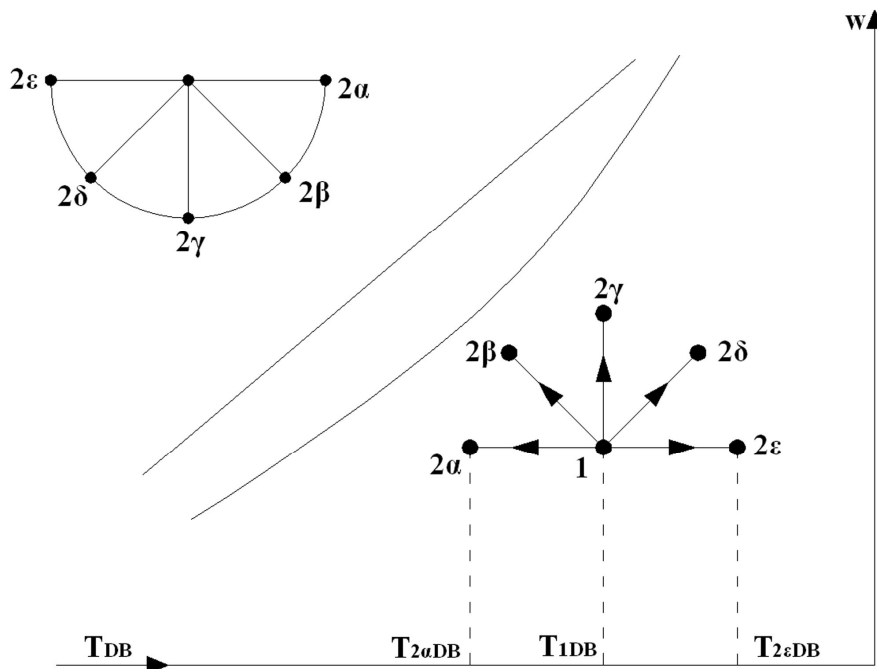
Και πάλι η ειδική ενθαλπία h_w για το νερό υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$h_w = 4,187 \cdot T_w \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (4.35)$$

όπου h_w σε kJ/kg και T_w η θερμοκρασία του νερού σε °C. Στην περίπτωση υδρατμών, η ενθαλπία h_w λαμβάνεται από πίνακες ή διαγράμματα.

Το ημικύκλιο στο άνω αριστερό μέρος του ψυχομετρικού χάρτη δίνει και την κλίση $\Delta h/\Delta w$ (εξωτερική κλίμακα ημικυκλίου). Στην περίπτωση της αδιαβατικής ύγρανσης, η καταστατική ευθεία 1-2 θα είναι παράλληλη με την ευθεία στο ημικύκλιο του χάρτη που έχει τιμή $h_w = \Delta h/\Delta w$. Συνεπώς, ανάλογα με την τιμή της ειδικής

ενθαλπίας των υδρατμών που διασκορπίζονται στο ρεύμα αέρα, είναι δυνατό να προκύψουν καταστατικές ευθείες με διαφορετική κλίση (σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15: Διαφορετικές κλίσεις της καταστατικής ευθείας ανάλογα με την ειδική ενθαλπία των διασκορπιζόμενων υδρατμών κατά την αδιαβατική ύγρανση.

Από το σχήμα 4.15 φαίνεται ότι με την ύγρανση και μόνο του ατμοσφαιρικού αέρα είναι δυνατό να υφίστανται μεταβολές που να αντιστοιχούν άλλες σε αύξηση της θερμοκρασίας ξηρού βολβού (θέρμανση) και άλλες σε μείωση της θερμοκρασίας ξηρού βολβού (ψύξη), ανάλογα με την ειδική ενθαλπία του διασκορπιζόμενου υδρατμού. Άρα, σε περιβάλλοντα θερμά και ξηρά, στα οποία εννοείται η εξάτμιση των υδρατμών, είναι σχετικά εύκολη η ψύξη του αέρα με ψεκασμό ψυχρών υδρατμών (χαμηλής ειδικής ενθαλπίας) ή νερού. Η ψύξη με αυτό τον τρόπο έχει το πλεονέκτημα ότι απαιτεί απλές συσκευές και δεν προκύπτει υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

Αντίθετα, ο ψεκασμός ζεστών υδρατμών (υψηλής ειδικής ενθαλπίας) σε ένα χώρο, θα προκαλέσει θέρμανση του χώρου. Χαρακτηριστικές τέτοιες εφαρμογές είναι τα χαμάμ.

Παράδειγμα 4.6

Αδιαβατική ύγρανση ρεύματος αέρα

Υγρός αέρας ειδικής υγρασίας $w_1=7\text{gr}$ υδρατμών / kg ξηρού αέρα και ειδικής ενθαλπίας $h_1=41,4\text{kJ/kg}$ υγραίνεται με υδρατμό θερμοκρασίας $T_w=132^\circ\text{C}$ και ειδικής ενθαλπίας $h_w=2.690\text{kJ/kg}$, μέχρι να προκύψει αέρας σχετικής υγρασίας $\phi=60\%$. Να βρεθούν οι θερμοκρασίες υγρού και ξηρού βολβού του αέρα στην έξοδο της συσκευής και η παροχή ατμού, αν στην είσοδο της συσκευής η παροχή αέρα είναι $1,20\text{m}^3/\text{sec}$.

Λύση

Το σημείο 1, που αναπαριστά την αρχική κατάσταση του ρεύματος ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη, εντοπίζεται από την τομή της ισηνθαλπικής $h_1=41,4\text{kJ/kg}$ και της ευθείας σταθερής ειδικής υγρασίας $w_1=7\text{gr/kg}$.

Το σημείο 2, που αναπαριστά την τελική κατάσταση του ρεύματος ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη, εντοπίζεται από την τομή της καμπύλης σχετικής υγρασίας $\phi_2=60\%$ και της κλίσης της καταστατικής ευθείας 1-2, η οποία δίνεται από την τιμή της ειδικής ενθαλπίας υδρατμών $h_w=2.690\text{kJ/kg} = \Delta h/\Delta w$. Η κλίση αυτή διαβάζεται από την εξωτερική κλίμακα του ημικυκλίου στο αριστερό και πάνω άκρο του ψυχομετρικού χάρτη.

Έχοντας εντοπίσει τις θέσεις των σημείων 1 και 2 στον ψυχομετρικό χάρτη διαβάζουμε:

- ειδικός όγκος στην κατάσταση 1: $u_1=0,848\text{m}^3/\text{kg}$
- θερμοκρασία ξηρού βολβού στην κατάσταση 2: $T_{DB2}=24^\circ\text{C}$
- θερμοκρασία υγρού βολβού στην κατάσταση 2: $T_{WB2}=18,6^\circ\text{C}$
- ειδική υγρασία στην κατάσταση 2: $w_2=11,2\text{ gr υδρ. /kg ξ.α.}$

Έχοντας υπολογίσει τις συνθήκες των δύο καταστάσεων αέρα, πλέον υπολογίζουμε:

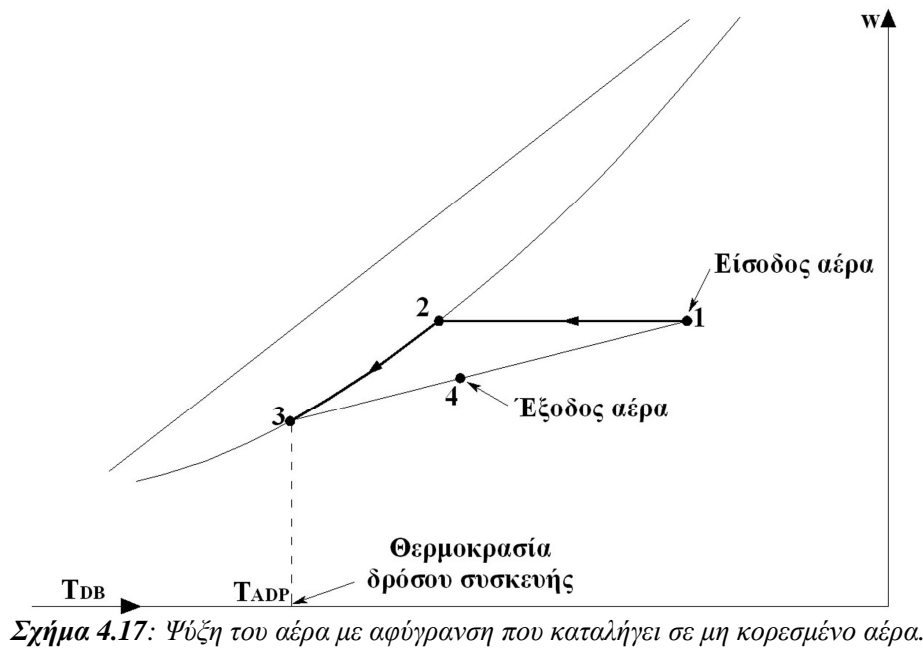
- Παροχή μάζας υδρατμού:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot (w_2 - w_1) \Leftrightarrow \dot{m}_w = \frac{\dot{V}_a}{u_1} \cdot (w_2 - w_1) \Leftrightarrow$$

$$\dot{m}_w = \frac{1,20\text{ m}^3/\text{sec}}{0,848\text{ m}^3/\text{kg}} \cdot (0,0112 - 0,007) \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \Leftrightarrow$$

$$\dot{m}_w = 0,00594 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \Leftrightarrow \dot{m}_w = 5,94 \frac{\text{gr}}{\text{sec}} \Leftrightarrow \dot{m}_w = 21,4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη για τον εντοπισμό των σημείων αρχικής και τελικής κατάστασης ατμοσφαιρικού αέρα.



Το σημείο (3) ονομάζεται σημείο δρόσου της συσκευής (apparatus dew point) και η αντίστοιχη θερμοκρασία συμβολίζεται με T_{ADP} . Επιδιώκεται πάντα να είναι $T_{ADP} > 0^\circ\text{C}$ για να αποφεύγεται ο σχηματισμός πάγου πάνω στα ψυκτικά στοιχεία της ψυκτικής συσκευής.

Ονομάζεται συντελεστής παράκαμψης της συσκευής (by pass factor) ο λόγος (ποσοστό) της μάζας του αέρα που παρακάμπτει τη συσκευή χωρίς να ψυχθεί προς τη συνολική μάζα του αέρα που περνάει από τη συσκευή, δηλαδή:

$$BF = \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_a} \Leftrightarrow BF = \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a3}} \Leftrightarrow BF = \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_3} = \frac{w_4 - w_3}{w_1 - w_3} \quad (4.36)$$

Παράδειγμα 4.7

Ψύξη αέρα με αφύγρανση που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα

Σε ψυκτική συσκευή εισέρχονται $0,20\text{m}^3/\text{sec}$ αέρα θερμοκρασίας ξηρού βολβού $T_{DB1}=26,7^\circ\text{C}$ και υγρού βολβού $T_{WB1}=22,1^\circ\text{C}$ και εξέρχονται σε θερμοκρασία ξηρού βολβού $T_{DB4}=13,3^\circ\text{C}$ και υγρού βολβού $T_{WB4}=12,8^\circ\text{C}$.

Να βρεθεί το σημείο δρόσου της συσκευής, η αποβαλλόμενη θερμική ισχύς από τον αέρα, η αποβαλλόμενη παροχή νερού καθώς και ο συντελεστής παράκαμψης της συσκευής.

Λύση

Τα σημεία που αναπαριστούν την αρχική και τελική κατάσταση του αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη βρίσκονται από τις τομές των ισοθερμοκρασιακών ξηρού και υγρού βολβού που δίνονται αντίστοιχα για τις δύο καταστάσεις αέρα.

Εντοπίζοντας τα σημεία της αρχικής και τελικής κατάστασης αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη διαβάζουμε:

- ειδικός όγκος στην κατάσταση 1: $u_1=0,869\text{m}^3/\text{kg}$
- ειδική ενθαλπία στην κατάσταση 1: $h_1=65,0\text{kJoule/kg}$
- ειδική υγρασία στην κατάσταση 1: $w_1=14,9 \text{ gr υδρ. /kg ξ.α.}$
- ειδική ενθαλπία στην κατάσταση 4: $h_4=36,0\text{kJoule/kg}$
- ειδική υγρασία στην κατάσταση 4: $w_4=9,0 \text{ gr υδρ. /kg ξ.α.}$
- με προέκταση της ευθείας 1-4 έως την καμπύλη κορεσμού βρίσκουμε το σημείο 3: $T_{\text{ADP}}=8^\circ\text{C}$
- ειδική ενθαλπία σημείου δρόσου συσκευής (κατάσταση 4): $h_3=24,8\text{kJoule/kg}$

Έχοντας υπολογίσει τις ιδιότητες του αέρα στην αρχική και τελική κατάσταση, καθώς και το σημείο δρόσου της συσκευής, μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε:

- Παροχή μάζας εισερχόμενου αέρα:

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{V}_1}{u_1} \Leftrightarrow \dot{m}_1 = \frac{0,20 \text{ m}^3/\text{sec}}{0,869 \text{ m}^3/\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_1 = 0,23\text{kg}/\text{sec} .$$

- Αποβαλλόμενη θερμική ισχύς:

$$q_{14} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_4) \Leftrightarrow q_{14} = 0,23 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \cdot (65,0 - 36,0) \frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \Leftrightarrow$$

$$q_{14} = 6,67\text{kW}$$

- Αποβαλλόμενο ποσό νερού:

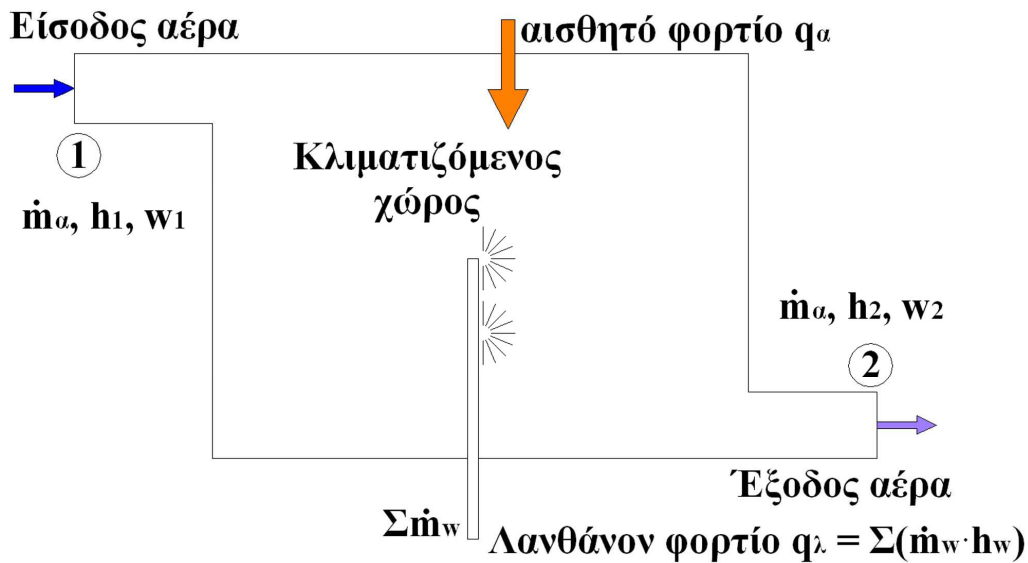
$$\dot{m}_w = \dot{m}_1 \cdot (w_1 - w_4) \Leftrightarrow \dot{m}_w = 0,23 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \cdot (0,0149 - 0,009) \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \Leftrightarrow$$

$$\dot{m}_w = 0,001357 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \Leftrightarrow \dot{m}_w = 1,357 \frac{\text{gr}}{\text{sec}} \Leftrightarrow \dot{m}_w = 4,885 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- Συντελεστής παράκαμψης B.F:

$$\text{B.F} = \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_3} \Leftrightarrow \text{B.F} = \frac{36,0 - 24,8}{65,0 - 24,8} \Leftrightarrow \text{B.F} = 27,86\% \cong 28\%$$

Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη για τον εντοπισμό των σημείων αρχικής και τελικής κατάστασης ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 4.19: Σκαρίφημα ροής θερμικής ισχύος κατά το θερινό κλιματισμό χώρου.

Για την περίπτωση θερινού κλιματισμού ισχύουν οι σχέσεις:

- Ισολογισμός ισχύος:

$$\begin{aligned} \dot{m}_a h_1 + q_a + \sum (\dot{m}_w \cdot h_w) &= \dot{m}_a h_2 \Leftrightarrow \\ \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) &= q_a + \sum (\dot{m}_w \cdot h_w) = q_a + q_\lambda \end{aligned} \quad (4.37)$$

- Ισολογισμός μάζας υδρατμών:

$$\dot{m}_a w_1 + \sum \dot{m}_w = \dot{m}_a w_2 \Leftrightarrow \sum \dot{m}_w = \dot{m}_a (w_2 - w_1). \quad (4.38)$$

- Διαιρώντας τις ανωτέρω σχέσεις κατά μέλη και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση 4.34:

$$\frac{h_2 - h_1}{w_2 - w_1} = \frac{q_a + \sum (\dot{m}_w \cdot h_w)}{\sum \dot{m}_w} = \frac{\Delta h}{\Delta w}. \quad (4.39)$$

Με βάση την τελευταία σχέση, από το ημικόκλιο του ψυχομετρικού χάρτη μπορεί να υπολογιστεί η κλίση της καταστατικής ευθείας $\Delta h/\Delta w$ αν είναι γνωστός ο αντίστοιχος όρος:

$$\frac{\Delta h}{\Delta w} = \frac{q_a + \sum (\dot{m}_w \cdot h_w)}{\sum \dot{m}_w} = \frac{q_a + q_\lambda}{\sum \dot{m}_w}.$$

Συνήθως είναι γνωστά τα αισθητά και λανθάνοντα φορτία ενός χώρου. Συνεπώς, συνήθως είναι ευκολότερο να υπολογιστεί η κλίση της καταστατικής ευθείας από τον παράγοντα αισθητής θερμότητας SHF, που επίσης δίνεται από το ίδιο ημικόκλιο:

$$\text{SHF} = \frac{q_a}{q_{\text{συν}}}$$

Παράδειγμα 4.8

Υπολογισμός γενικής περίπτωσης θερινού κλιματισμού

Σε κλιματιζόμενο χώρο το αισθητό φορτίο είναι 11,72kW και το λανθάνον φορτίο είναι ίσο με 2,58kW. Η θερμοκρασία ξηρού βολβού του εισερχόμενου αέρα ισούται με $T_{\text{DB1}}=16,7^\circ\text{C}$, ενώ οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού της τελικής κατάστασης του αέρα στο χώρο είναι $T_{\text{DB2}}=27,8^\circ\text{C}$ και $T_{\text{WB2}}=19,4^\circ\text{C}$.

Να υπολογιστεί η παροχή μάζας και όγκου του εισερχόμενου στο χώρο κλιματιζόμενου αέρα, καθώς και η θερμοκρασία υγρού βολβού αυτού.

Λύση

Το σημείο που αναπαριστά την τελική κατάσταση του ρεύματος ατμοσφαιρικού αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη (συνθήκες κλιματιζόμενου χώρου) εντοπίζεται από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{\text{DB2}}=27,8^\circ\text{C}$ και της ισοθερμοκρασιακής υγρού βολβού $T_{\text{WB2}}=19,4^\circ\text{C}$.

Για την κατάσταση του αέρα εισόδου στον κλιματιζόμενο χώρο (έξοδος από την ψυκτική συσκευή) δίνεται μόνο η θερμοκρασία ξηρού βολβού $T_{\text{DB1}}=16,7^\circ\text{C}$.

Με βάση τα δεδομένα που έχουμε όμως μπορούμε να υπολογίσουμε την κλίση της καταστατικής ευθείας 1-2. Το συνολικό φορτίο του χώρου ισούται με:

$$q_{\text{συν}} = q_a + q_l \Leftrightarrow q_{\text{συν}} = 11,72\text{kW} + 2,58\text{kW} \Leftrightarrow q_{\text{συν}} = 14,30\text{kW}$$

Η κλίση της καταστατικής ευθείας 1-2 ισούται με:

$$\text{SHF} = \frac{q_a}{q_{\text{συν}}} \Leftrightarrow \text{SHF} = \frac{11,72}{14,3} \Leftrightarrow \text{SHF} = 0,82$$

Χαράζουμε την κλίση της καταστατικής ευθείας στο ημικόκλιο του ψυχομετρικού χάρτη, βρίσκοντας στην εσωτερική πλευρά του την τομή $\text{SHF} = 0,82$.

Στη συνέχεια μεταφέρουμε στον ψυχομετρικό χάρτη την κλίση της καταστατικής ευθείας στο σημείο 2. Προεκτείνοντας την καταστατική ευθεία από το σημείο 2 έως την ισοθερμοκρασιακή ξηρού βολβού $T_{\text{DB1}}=16,7^\circ\text{C}$ εντοπίζεται η θέση του σημείου 1.

Έχοντας εντοπίσει τις θέσεις της αρχικής και τελικής κατάστασης αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη, διαβάζουμε:

- θερμοκρασία υγρού βολβού κατάστασης 1: $T_{\text{WB1}}=15^\circ\text{C}$
- ειδικός όγκος αέρα κατάστασης 1: $u_1=0,834\text{m}^3/\text{kg}$
- ειδική ενθαλπία αέρα κατάστασης 1: $h_1=42,0\text{kJ}/\text{kg}$
- ειδική ενθαλπία αέρα κατάστασης 2: $h_2=55,8\text{kJ}/\text{kg}$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε:

- Από ισολογισμό θερμικής ισχύος την παροχή μάζας αέρα:

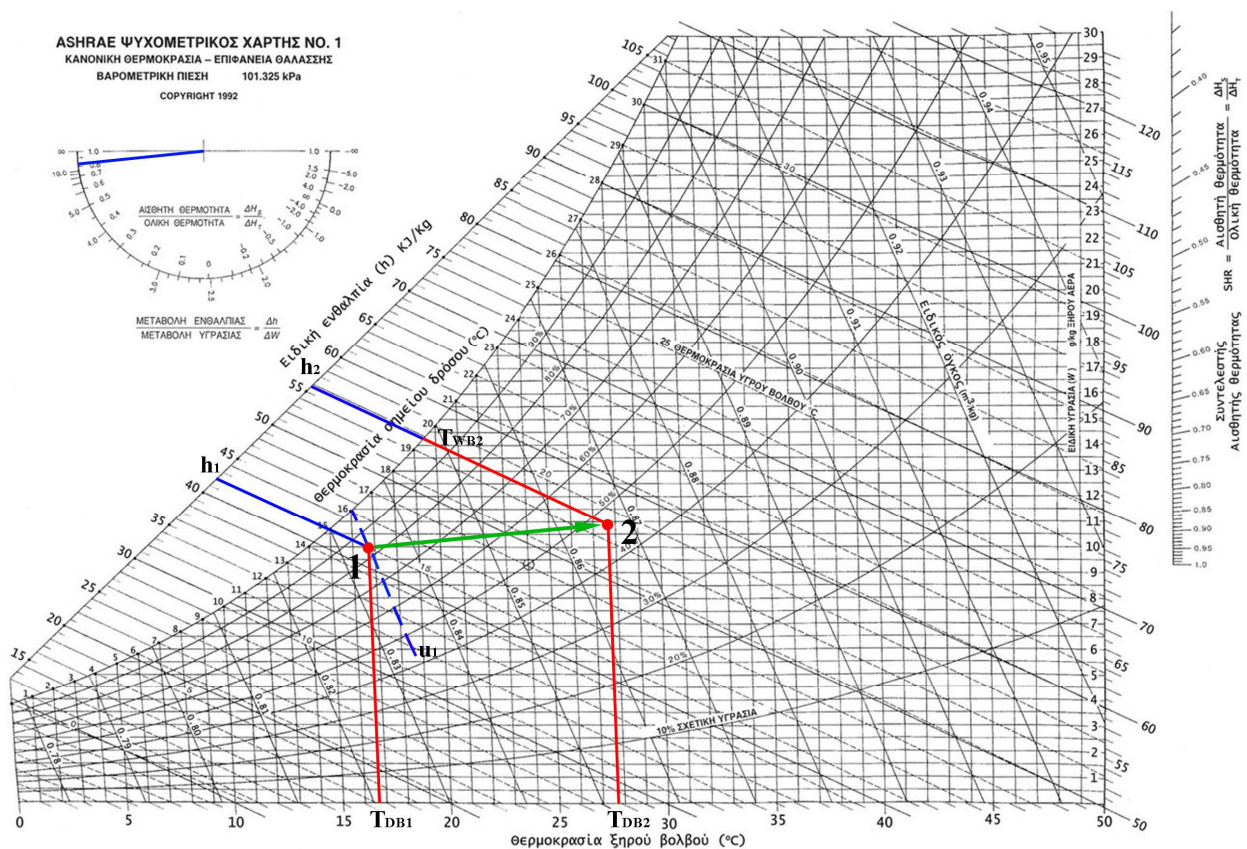
$$q_{\text{συν}} = q_a + q_l = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) \Leftrightarrow \dot{m}_a = \frac{q_{\text{συν}}}{h_2 - h_1} \Leftrightarrow$$

$$\dot{m}_a = \frac{14,30 \text{ kJ/sec}}{55,8 - 42 \text{ kJ/kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_a = 1,036 \text{ kg/sec}$$

- Παροχή όγκου αέρα:

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{V}_1}{u_1} \Leftrightarrow \dot{V}_1 = \dot{m}_1 \cdot u_1 \Leftrightarrow \dot{V}_1 = 1,036 \text{ kg/sec} \cdot 0,834 \text{ m}^3/\text{kg} \Leftrightarrow \dot{V}_1 = 0,864 \text{ m}^3/\text{sec} \Leftrightarrow \dot{V}_1 = 864 \text{ lt/sec}.$$

Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη για τον εντοπισμό των σημείων αρχικής και τελικής κατάστασης ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 4.20: Ψυχομετρικοί υπολογισμοί στον ψυχομετρικό χάρτη κατά το θερινό κλιματισμό χώρων.

4.8.2. Χειμερινός κλιματισμός

Στην περίπτωση του χειμερινού κλιματισμού, θερμότητα από τον κλιματιζόμενο χώρο χάνεται με τη μορφή απωλειών προς το περιβάλλον (μέσω των αδιαφανών και διαφανών δομικών στοιχείων, λόγω αερισμού, απωλειών χαραμάδων κλπ). Η θερμότητα αυτή θα πρέπει να αντισταθμιστεί από θερμό αέρα, που εισάγεται μέσα στο χώρο με αντίστοιχη εξαγωγή κρύου αέρα.

Στην περίπτωση του χειμερινού κλιματισμού συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη φορτία λόγω λαθάνουσας θερμότητας, ακόμα και αν παράγονται υδρατμοί εντός του χώρου. Επειδή ο θερμός αέρας που εισέρχεται στον κλιματιζόμενο χώρο από την κλιματιστική συσκευή είναι συνήθως ξηρότερος των απαιτήσεων του χώρου σε υγρασία, απαιτείται ύγρανση του αέρα αυτού. Τούτο επιτυγχάνεται με τον ψεκάσμο του εισερχόμενου αέρα με υδρατμούς από έναν υγραντήρα που βρίσκεται ενσωματωμένος στην κλιματιστική συσκευή. Οι τυχόν υδρατμοί που μπορεί να παράγονται από άλλες πηγές εντός του χώρου συμβάλλουν στον περιορισμό της λειτουργίας του υγραντήρα.

Στα προβλήματα υπολογισμού χειμερινού κλιματισμού συνήθως απαιτείται, μαζί με τον υπολογισμό της απαιτούμενης θερμικής ισχύος της κλιματιστικής συσκευής, και ο υπολογισμός της παροχής υδρατμών με την οποία πρέπει να εμπλουτιστεί ο εισερχόμενος στο χώρο θερμός αέρας, προκειμένου να διατηρηθεί η υγρασία του κλιματιζόμενου χώρου στα επιθυμητά επίπεδα και να αποφευχθεί η ξήρανσή του.

Ο θερμός αέρας εξέρχεται από την κλιματιστική συσκευή και εισέρχεται στον κλιματιζόμενο χώρο σε κατάσταση 1, ενώ «εξέρχεται» από αυτόν σε κατάσταση 2. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει κάποια εξαγωγή αέρα από το χώρο. Απλώς ο εισερχόμενος θερμός αέρας ψύχεται, λόγω των απωλειών του χώρου (θερμικά φορτία) έτσι, ώστε τελικά να καταλήγει σε μία κατάσταση 2, η οποία βέβαια είναι ίδια με την κατάσταση του αέρα του κλιματιζόμενου χώρου.

Για την περίπτωση αυτή ισχύουν οι σχέσεις:

- Ισολογισμός ισχύος στον κλιματιζόμενο χώρο:

$$\dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2 + q_a \Leftrightarrow \dot{m}_a \cdot (h_1 - h_2) = q_a = q_{\text{συν}} \quad (4.40)$$

- Ισολογισμός μάζας υδρατμών στην κλιματιστική συσκευή:

$$\dot{m}_a w_1 + \sum \dot{m}_w = \dot{m}_a w_2 \Leftrightarrow \sum \dot{m}_w = \dot{m}_a (w_2 - w_1) \quad (4.41)$$

Παράδειγμα 4.9

Υπολογισμός γενικής περίπτωσης χειμερινού κλιματισμού

Για το χειμερινό κλιματισμό ενός εσωτερικού χώρου θα χρησιμοποιηθεί μια κεντρική κλιματιστική συσκευή εφοδιασμένη με θερμαντικό στοιχείο και ανεμιστήρα.

Η επιθυμητή θερμοκρασία ξηρού βολβού του κλιματιζόμενου χώρου είναι $T_{DB2}=20^\circ\text{C}$, ενώ η αντίστοιχη σχετική υγρασία $\phi_2=40\%$. Με τις συνθήκες αυτές ο αέρας επιστρέφει στο θερμαντικό στοιχείο της κλιματιστικής συσκευής. Η θερμοκρασία ξηρού βολβού προσαγωγής του θερμού αέρα από την κλιματιστική συσκευή είναι $T_{DB1}=35^\circ\text{C}$, ενώ η σχετική υγρασία του ισούται με $\phi_1=20\%$. Η θερμική ισχύς του θερμαντικού στοιχείου δίνεται $17,25\text{kW}$. Ζητείται η παροχή αέρα της κλιματιστικής συσκευής. Χρειάζεται ύγρανση ο αέρας πριν εισέλθει στο χώρο; Αν ναι πόση πρέπει να είναι η ικανότητα παροχής του υγραντήρα;

Λύση

Από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{DB1}=35^{\circ}\text{C}$ και της σχετικής υγρασίας $\phi_1=20\%$ εντοπίζεται η θέση του σημείου 1 στον ψυχομετρικό χάρτη.

Ομοίως, από την τομή της ισοθερμοκρασιακής ξηρού βολβού $T_{DB2}=20^{\circ}\text{C}$ και της σχετικής υγρασίας $\phi_2=40\%$ εντοπίζεται η θέση του σημείου 2 στον ψυχομετρικό χάρτη.

Έχοντας εντοπίσει τις θέσεις των σημείων 1 και 2 στον ψυχομετρικό χάρτη, διαβάζουμε:

- ειδική ενθαλπία κατάστασης 1: $h_1=49,0\text{kJ/kg}$
- ειδική υγρασία κατάστασης 1: $w_1=5,3\text{gr/kg}$
- ειδική ενθαλπία κατάστασης 2: $h_2=34,8\text{kJ/kg}$
- ειδική υγρασία κατάστασης 2: $w_2=5,8\text{gr/kg}$.

Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε:

- Ισολογισμός ισχύος:

$$\dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2 + q_{\text{συν}} \Leftrightarrow \dot{m}_a = \frac{q_{\text{συν}}}{h_1 - h_2} \Leftrightarrow \dot{m}_a = \frac{17,25\text{kW}}{(49,0 - 34,8)\text{kJ/kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_a = 1,215\text{kg/s}.$$

Παρατηρούμε ότι το σημείο 2, που αναπαριστά την επιθυμητή κατάσταση κλιματιζόμενου χώρου, παρουσιάζει υψηλότερη ειδική υγρασία $w_2=5,8\text{gr/kg}$ από την ειδική υγρασία $w_1=5,3\text{gr/kg}$ του θερμού αέρα που εισέρχεται στο χώρο από την κλιματιστική συσκευή. Συνεπώς, προκειμένου να μην ξηραθεί σταδιακά ο κλιματιζόμενος χώρος, ο εισερχόμενος αέρας χρειάζεται ύγρανση. Η απαιτούμενη παροχή μάζας υδρατμών δίνεται από τον αντίστοιχο ισολογισμό:

$$\dot{m}_a w_1 + \sum \dot{m}_w = \dot{m}_a w_2 \Leftrightarrow \sum \dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot (w_2 - w_1) \Leftrightarrow$$

$$\sum \dot{m}_w = 1,215 \frac{\text{kg}_{\xi.a.}}{\text{s}} \cdot (5,8 - 5,3) \frac{\text{gr}_{\text{υδρ.}}}{\text{kg}_{\xi.a.}} \Leftrightarrow \sum \dot{m}_w = 0,6075 \frac{\text{gr}_{\text{υδρ.}}}{\text{s}}$$

Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη για τον εντοπισμό των σημείων αρχικής και τελικής κατάστασης ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 4.22: Ανάμιξη νωπού αέρα και αέρα ανακυκλοφορίας και ψύξη του μίγματος για τον κλιματισμό χώρων.

Η παροχή μάζας \dot{m}_N νωπού αέρα καθορίζεται από τις ανάγκες ανανέωσης του χώρου σε φρέσκο αέρα (αριθμός ανανεώσεων ανά μονάδα χρόνου). Η συνολική παροχή μάζας \dot{m}_M του μίγματος αέρα που διέρχεται από την κλιματιστική συσκευή προσδιορίζεται από το θερμικό ή ψυκτικό φορτίο που αναλαμβάνει η συσκευή. Η παροχή μάζας \dot{m}_R του αέρα ανακυκλοφορίας προκύπτει από τον ισολογισμό μάζας που ισχύει κατά την αδιαβατική ανάμιξη των ρευμάτων αέρα:

$$\dot{m}_M = \dot{m}_R + \dot{m}_N \quad (4.42)$$

Κατά την αδιαβατική ανάμιξη των ρευμάτων νωπού αέρα και αέρα ανακυκλοφορίας ισχύει επίσης ο ισολογισμός θερμικής ισχύος και ο ισολογισμός μάζας υδρατμών:

$$h_M \cdot \dot{m}_M = h_R \cdot \dot{m}_R + h_N \cdot \dot{m}_N \quad (4.43)$$

$$w_M \cdot \dot{m}_M = w_R \cdot \dot{m}_R + w_N \cdot \dot{m}_N \quad (4.44)$$

όπου οι δείκτες M, R και N συμβολίζουν αντίστοιχα την κατάσταση του μίγματος αμέσως μετά την ανάμιξη των δύο ρευμάτων, του αέρα ανακυκλοφορίας και του νωπού αέρα.

Στη συνέχεια το μίγμα αέρα εξερχόμενο από το κιβώτιο ανάμιξης της κλιματιστικής συσκευής εισέρχεται στο ψυκτικό ή θερμαντικό στοιχείο της συσκευής, όπου ψύχεται ή θερμαίνεται αντίστοιχα προκειμένου να παραλάβει τα φορτία του χώρου. Το επεξεργασμένο μίγμα ρευμάτων εξέρχεται τελικά από την κλιματιστική συσκευή και εισέρχεται στον κλιματιζόμενο χώρο σε κατάσταση που αναπαρίσταται στον ψυχομετρικό χάρτη με το σημείο S.

Το συνολικό θερμικό ή ψυκτικό φορτίο που αναλαμβάνει η κλιματιστική συσκευή θα ισούται πλέον με το άθροισμα του φορτίου του αέρα ανακυκλοφορίας και του φορτίου νωπού αέρα. Το φορτίο αυτό αποτελεί το συνολικό φορτίο του χώρου:

$$q_S = q_R + q_N \quad (4.45)$$

όπου q_S το φορτίο της κλιματιστικής συσκευής, q_R το φορτίο του κλιματιζόμενου χώρου και q_N το φορτίο του νωπού αέρα.

Καθώς το μίγμα αέρα εισέρχεται στο θερμικό ή ψυκτικό στοιχείο σε κατάσταση M , όπως αυτή προκύπτει μετά την ανάμιξη των ρευμάτων, και εξέρχεται από αυτήν σε κατάσταση S , το συνολικό θερμικό ή ψυκτικό φορτίο που αναλαμβάνει η κλιματιστική συσκευή προκύπτει από τον ισολογισμό ισχύος ανάμεσα στις καταστάσεις του αέρα M και S . Λαμβάνοντας υπόψη ότι η παροχή του αέρα μίγματος ισούται με \dot{m}_M , στην περίπτωση της θέρμανσης, ο ισολογισμός ισχύος θα έχει ως εξής:

$$\dot{m}_M \cdot h_M + q_S = \dot{m}_M \cdot h_S \Leftrightarrow q_S = \dot{m}_M \cdot (h_S - h_M). \quad (4.46)$$

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της ψύξης, ο ισολογισμός ισχύος γράφεται:

$$\dot{m}_M \cdot h_S + q_S = \dot{m}_M \cdot h_M \Leftrightarrow q_S = \dot{m}_M \cdot (h_M - h_S). \quad (4.47)$$

Το αισθητό και το λανθάνον φορτίο της συσκευής προκύπτει αν φέρουμε από τα σημεία M και S τις παράλληλες προς τον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα του χάρτη αντίστοιχα, οπότε αυτές θα τέμνονται σε ένα νέο σημείο M' (σχήμα 4.23). Στην περίπτωση αυτή, το αισθητό και λανθάνον φορτίο της συσκευής θα είναι αντίστοιχα για την περίπτωση της ψύξης (ας θυμηθούμε ότι για την περίπτωση της θέρμανσης δεν υπάρχουν λανθάνοντα φορτία):

$$\begin{aligned} q_{Sa} &= \dot{m}_M \cdot (h_{M'} - h_S) \\ q_{Sl} &= \dot{m}_M \cdot (h_M - h_{M'}) \end{aligned} \quad (4.48)$$

Το φορτίο του νωπού αέρα προκύπτει από τη μεταβολή της καταστάσεως νωπού αέρα N έως την κατάσταση κλιματιζόμενου χώρου R . Τούτο γίνεται αντιληπτό αν σκεφτούμε ότι δεν θα είχαμε φορτίο νωπού αέρα αν αυτός βρισκόταν σε κατάσταση ίδια με την κατάσταση R του κλιματιζόμενου χώρου. Συνεπώς, το φορτίο νωπού αέρα προκύπτει αν εφαρμόσουμε ισολογισμό θερμικής ισχύος μεταξύ των δύο καταστάσεων R και N , λαμβάνοντας υπόψη ότι η παροχή νωπού αέρα είναι \dot{m}_N . Για την περίπτωση της θέρμανσης θα ισχύει:

$$\dot{m}_N \cdot h_N + q_N = \dot{m}_N \cdot h_R \Leftrightarrow q_N = \dot{m}_N \cdot (h_R - h_N). \quad (4.49)$$

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της ψύξης, ο ισολογισμός ισχύος γράφεται:

$$\dot{m}_N \cdot h_R + q_N = \dot{m}_N \cdot h_N \Leftrightarrow q_N = \dot{m}_N \cdot (h_N - h_R). \quad (4.50)$$

Τέλος, το φορτίο του χώρου ή φορτίο αέρα ανακυκλοφορίας προκύπτει αν σκεφτούμε ότι το φορτίο της κλιματιστικής συσκευής θα ήταν ίσο με το φορτίο του αέρα ανακυκλοφορίας, αν δεν υπήρχε αναρρόφηση νωπού αέρα, δηλαδή θα ήταν $q_S = q_R$, αφού $q_N = 0$. Στην περίπτωση αυτή, το φορτίο της κλιματιστικής συσκευής θα προέκυπτε αν λάβουμε υπόψη μας ότι ο αέρας εισέρχεται σε αυτό σε κατάσταση R κλιματιζόμενου χώρου και εξέρχεται από αυτή σε κατάσταση S . Η παροχή μάζας και στην περίπτωση αυτή θα ήταν ίση με τη συνολική παροχή μάζας μίγματος \dot{m}_M . Λαμβάνοντας τα ανωτέρω ως δεδομένα, ο ισολογισμός ισχύος μεταξύ των σημείων R και S που θα δώσει το φορτίο του αέρα ανακυκλοφορίας γράφεται για την περίπτωση της θέρμανσης:

$$\dot{m}_M \cdot h_R + q_R = \dot{m}_M \cdot h_S \Leftrightarrow q_R = \dot{m}_M \cdot (h_S - h_R). \quad (4.51)$$

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της ψύξης, ο ισολογισμός ισχύος γράφεται:

$$\dot{m}_M \cdot h_S + q_R = \dot{m}_M \cdot h_R \Leftrightarrow q_R = \dot{m}_M \cdot (h_R - h_S). \quad (4.52)$$

Το αισθητό και το λανθάνον φορτίο του χώρου προκύπτει αν φέρουμε από τα σημεία R και S τις ισοθερμοκρασιακές ξηρού βολβού και τις ισοϋγρασιακές ειδικής υγρασίας (οριζόντιες ευθείες) αντίστοιχα, οπότε αυτές θα τέμνονται σε ένα νέο σημείο R' (σχήμα 4.23). Στην περίπτωση αυτή, το αισθητό και λανθάνον φορτίο της συσκευής θα είναι αντίστοιχα για την περίπτωση της ψύξης (ας θυμηθούμε ότι για την περίπτωση της θέρμανσης δεν υπάρχουν λανθάνοντα φορτία):

$$\begin{aligned} q_{Ra} &= \dot{m}_M \cdot (h_{R'} - h_S) \\ q_{R\lambda} &= \dot{m}_M \cdot (h_R - h_{R'}) \end{aligned} \quad (4.53)$$

Οι κλίσεις των καταστατικών ευθειών M-S και R-S, που παριστάνουν τα φορτία συσκευής και χώρου (αέρα ανακυκλοφορίας) αντίστοιχα, θα δίνονται από τον παράγοντα αισθητής θερμότητας SHF, δηλαδή θα είναι:

- κλίση καταστατικής ευθείας M-S:

$$SHF = \frac{q_{Sa}}{q_S} \quad (4.54)$$

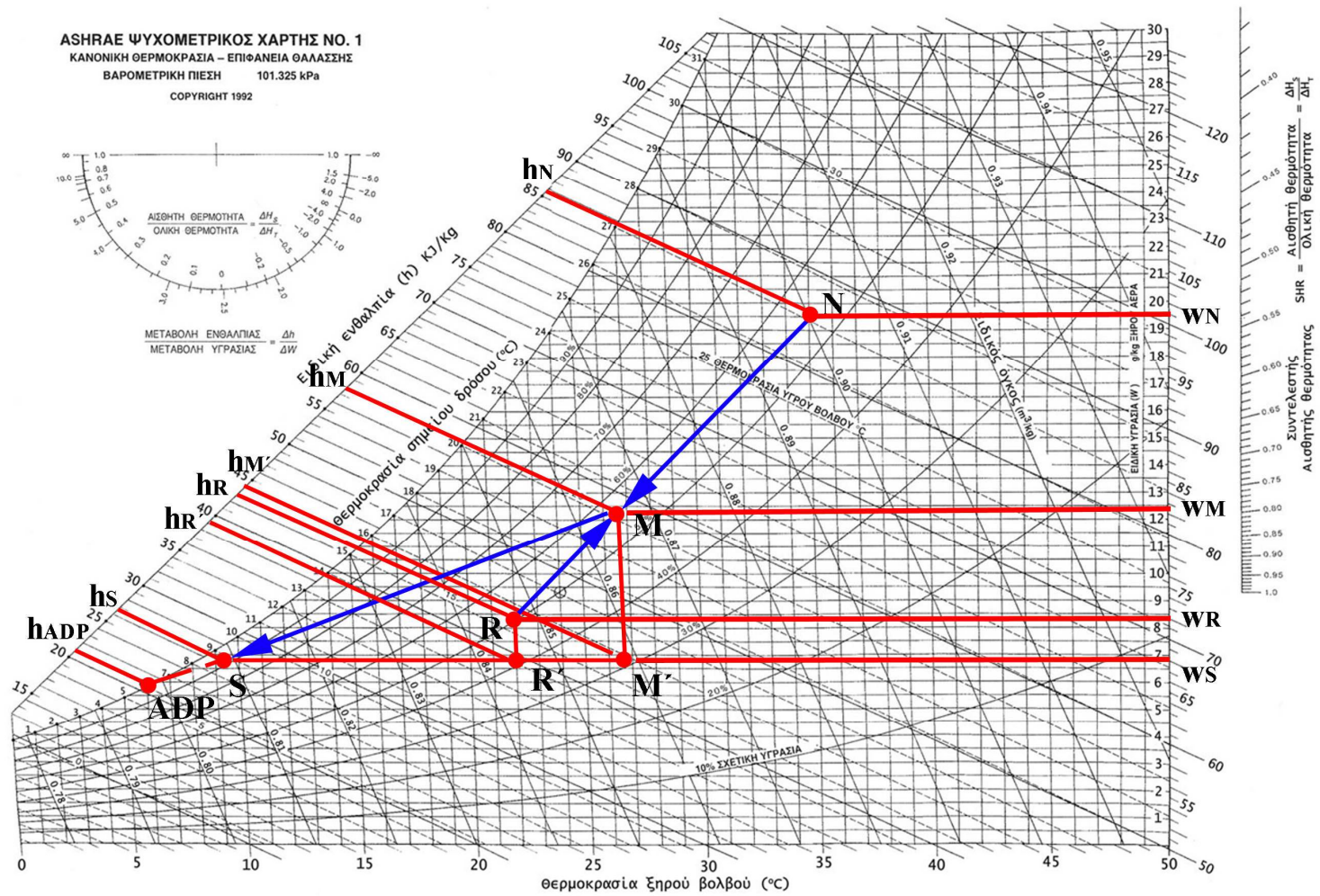
- κλίση καταστατικής ευθείας R-S:

$$SHF = \frac{q_{Ra}}{q_R} \quad (4.55)$$

Τέλος, προεκτείνοντας την ευθεία M-S έως την καμπύλη κορεσμού, εντοπίζουμε το σημείο δρόσου της συσκευής ADP. Ο συντελεστής παράκαμψης της συσκευής BF θα ισούται με:

$$B.F. = \frac{h_S - h_{ADP}}{h_M - h_{ADP}} \quad (4.56)$$

Με τις ανωτέρω σχέσεις είναι δυνατός ο υπολογισμός συστήματος κλιματισμού χώρου για θέρμανση ή ψύξη με την ανάμιξη ρευμάτων ανακυκλοφορίας και νωπού αέρα περιβάλλοντος. Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζονται γραφικά οι καταστατικές μεταβολές που αναφέρθηκαν στην παρούσα ενότητα για την περίπτωση της ψύξης.



Σχήμα 4.23: Ψυχομετρικοί υπολογισμοί στον ψυχομετρικό χάρτη κατά τον κλιματισμό χώρων με ανάμιξη ρευμάτων αέρα (λειτουργία ψύξης).

Παράδειγμα 4.10**Υπολογισμός περίπτωσης θερινού κλιματισμού**

Για τον κλιματισμό μιας μεγάλης αίθουσας γραφείων δημοσίου κτηρίου είναι εγκατεστημένη μια κεντρική κλιματιστική συσκευή (ΚΚΣ), συγκεκριμένου κατασκευαστικού οίκου. Οι επιθυμητές συνθήκες χώρου είναι 26,5°C DB / φ=50%, όταν οι συνθήκες αέρα περιβάλλοντος είναι 36°C DB / 26°C WB.

Η συσκευή διαθέτει ψυκτική συσκευή (ΨΣ) και ανεμιστήρα με δυνατότητα μεταβολής της παροχής από 4.800m³/h έως 5.400m³/h, μέσω συστήματος ρυθμιζόμενης τροχαλίας μετάδοσης κίνησης.

Θεωρείται ότι ο αέρας έχει σταθερό ειδικό όγκο ίσο με 0,84m³/kg.

Η ΚΚΣ διαθέτει ένα κιβώτιο ανάμειξης, μέσω του οποίου είναι δυνατή η αναρρόφηση νωπού αέρα παροχής 600m³/h, ενώ ταυτόχρονα η παροχή του ανεμιστήρα της ΚΚΣ ρυθμίζεται στη (μέγιστη δυνατή) τιμή των 5.400m³/h. Σε αυτή την περίπτωση τα τεχνικά φυλλάδια του κατασκευαστή δίνουν:

- ολική ψυκτική ισχύς της ΨΣ: 36.800kcal/h»
- αισθητή ψυκτική ισχύς της ΨΣ: 21.500kcal/h».

Ζητούνται: (με την προϋπόθεση επίτευξης των συνθηκών χώρου):

- Οι συνθήκες του αέρα μέσα στο κιβώτιο ανάμειξης.
- Το φορτίο λόγω εισόδου νωπού αέρα.
- Οι συνθήκες εξόδου του αέρα από την ΨΣ.
- Το σημείο δρόσου της κλιματιστικής συσκευής και το συντελεστή παράκαμψης.

Λύση

Ένα μέρος από τον αέρα που απάγεται από τον κλιματιζόμενο χώρο επιστρέφει σε αυτόν ως αέρας ανακυκλοφορίας, αναμειγνύομενος με νωπό αέρα περιβάλλοντος, για τις ανάγκες αερισμού του χώρου. Το μίγμα ψύχεται στην ψυκτική συσκευή και στη συνέχεια προσάγεται στους κλιματιζόμενους χώρους για την παραγωγή των ψυκτικών φορτίων (σχήμα 4.22).

Για την κατάσταση του νωπού αέρα και του αέρα του κλιματιζόμενου χώρου δίδονται από δύο καταστατικά μεγέθη (θερμοκρασίες ξηρού βολβού, θερμοκρασία υγρού βολβού και σχετική υγρασία). Συνεπώς είναι δυνατός ο εντοπισμός των αντίστοιχων σημείων N και R στον ψυχομετρικό χάρτη και η ανάγνωση της ειδικής ενθαλπίας των δύο καταστάσεων αέρα. Τα δεδομένα των σημείων N και R και η ειδική ενθαλπία παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Δεδομένα	Κατάσταση αέρα κλιματιζόμενου χώρου (σημείο R στον ψυχομετρικό χάρτη)		Κατάσταση νωπού αέρα (σημείο N στον ψυχομετρικό χάρτη)	
	Θερμοκρασία ξηρού βολβού T _{R,DB} (°C)	Ειδική υγρασία φ _R (%)	Θερμοκρασία ξηρού βολβού T _{N,DB} (°C)	Θερμοκρασία υγρού βολβού T _{N,WB} (°C)
	26,5	50,0	36,0	26,0
Ευρήματα	Ειδική ενθαλπία h _R (kJ/kg)		Ειδική ενθαλπία h _N (kJ/kg)	
	54,2		80,0	

Επίσης, δίνονται οι παροχές όγκου του μίγματος και η παροχή του νωπού αέρα:

- παροχή όγκου μίγματος: $\dot{V}_M = 5.400\text{m}^3/\text{h}$
- παροχή νωπού αέρα: $\dot{V}_N = 600\text{m}^3/\text{h}$.

Η παροχή όγκου του αέρα ανακυκλοφορίας υπολογίζεται από το ισοζύγιο παροχής όγκου:

$$\dot{V}_M = \dot{V}_R + \dot{V}_N \Leftrightarrow \dot{V}_R = \dot{V}_M - \dot{V}_N \Leftrightarrow \dot{V}_R = 4.800\text{m}^3/\text{h}.$$

Με δεδομένο και ανεξάρτητο της κατάστασης αέρα τον ειδικό όγκο αέρα ($u = 0,84\text{m}^3/\text{kg}$), υπολογίζονται οι παροχές μάζας των τριών ρευμάτων αέρα (νωπού αέρα, αέρα ανακυκλοφορίας και μίγματος):

$$\dot{m}_M = \frac{\dot{V}_M}{u} \Leftrightarrow \dot{m}_M = \frac{5.400\text{m}^3/\text{h}}{0,84\text{m}^3/\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_M = 6.428,57\text{kg}/\text{h} \Leftrightarrow \dot{m}_M = 1,786\text{kg}/\text{sec}$$

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{V}_R}{u} \Leftrightarrow \dot{m}_R = \frac{4.800\text{m}^3/\text{h}}{0,84\text{m}^3/\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_R = 5.714,30\text{kg}/\text{h} \Leftrightarrow \dot{m}_R = 1,587\text{kg}/\text{sec}$$

$$\dot{m}_N = \frac{\dot{V}_N}{u} \Leftrightarrow \dot{m}_N = \frac{600\text{m}^3/\text{h}}{0,84\text{m}^3/\text{kg}} \Leftrightarrow \dot{m}_N = 714,27\text{kg}/\text{h} \Leftrightarrow \dot{m}_N = 0,198\text{kg}/\text{sec}.$$

Ερώτημα α1. Οι συνθήκες του αέρα μέσα στο κιβώτιο ανάμειξης.

Το μίγμα αέρα αποτελεί το προϊόν αδιαβατικής ανάμειξης δύο ρευμάτων αέρα. Ο ισολογισμός θερμικής ισχύος κατά την αδιαβατική ανάμειξη αέρα γράφεται:

$$\dot{m}_R \cdot h_R + \dot{m}_N \cdot h_N = \dot{m}_M \cdot h_M.$$

Στην ανωτέρω σχέση όλα τα μεγέθη είναι γνωστά, εκτός από την ειδική ενθαλπία της κατάστασης του μίγματος (σημείο M στον ψυχομετρικό χάρτη), η οποία μπορεί να υπολογιστεί επιλύοντας τη σχέση του ισολογισμού θερμικής ισχύος ανάλογα:

$$\dot{m}_R \cdot h_R + \dot{m}_N \cdot h_N = \dot{m}_M \cdot h_M \Leftrightarrow h_M = \frac{\dot{m}_R \cdot h_R + \dot{m}_N \cdot h_N}{\dot{m}_M} \Leftrightarrow$$

$$h_M = \frac{1,587 \cdot 54,2 + 0,198 \cdot 80}{1,786} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Leftrightarrow h_M = 57,03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Το σημείο M στον ψυχομετρικό χάρτη θα πρέπει να βρίσκεται πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα σημεία R και N, αφού προκύπτει από την αδιαβατική ανάμειξη των δύο αυτών ρευμάτων αέρα. Συνεπώς, ο εντοπισμός του σημείου M στον ψυχομετρικό χάρτη προκύπτει από την τομή της ισηνθαλπικής ευθείας των 57,03kJ/kg με το ευθύγραμμο τμήμα R-N. Εντοπίζοντας τη θέση του σημείου M στον ψυχομετρικό χάρτη, διαβάζουμε τις ιδιότητες της κατάστασης του αέρα στο κιβώτιο ανάμειξης:

- θερμοκρασία ξηρού βολβού: $T_{M/DB} = 27,3^\circ\text{C}$
- θερμοκρασία υγρού βολβού: $T_{M/WB} = 19,8^\circ\text{C}$
- σχετική υγρασία: $\phi_M = 50\%$
- ειδική υγρασία: $w_M = 11,5\text{gr H}_2\text{O}/\text{kg ξ.α.}$

Ερώτημα α2. Φορτίο λόγω εισόδου νωπού αέρα.

Ο νωπός αέρας εισέρχεται στο κιβώτιο ανάμιξης με παροχή \dot{m}_N και με ειδική ενθαλπία h_N . Το φορτίο του νωπού αέρα αντιστοιχεί στη θερμική ισχύ που πρέπει να αποβάλλει, ώστε να φτάσει σε κατάσταση αέρα κλιματιζόμενου χώρου, δηλαδή ειδικής ενθαλπίας h_R . Συνεπώς, το φορτίο νωπού αέρα υπολογίζεται ως εξής:

$$q_N = \dot{m}_N \cdot (h_N - h_R) \Leftrightarrow q_N = 0,198 \text{ kg/sec} \cdot (80,0 - 54,2) \text{ kJ/kg} \Leftrightarrow$$

$$q_N = 5,11 \text{ kW} \Leftrightarrow q_N = 4.395 \text{ kcal/h}$$

Ερώτημα α3. Συνθήκες εξόδου αέρα από το ψυκτικό στοιχείο.

Το ολικό φορτίο $q_{\Psi\Sigma}$ που καλείται να αναλάβει η ψυκτική συσκευή αντιστοιχεί στη μεταβολή της παροχής μάζας μίγματος \dot{m}_M από αρχική κατάσταση M σε τελική κατάσταση S (έξοδος από την ψυκτική συσκευή). Συνεπώς το ολικό φορτίο της ψυκτικής συσκευής γράφεται:

$$q_{\Psi\Sigma} = \dot{m}_M \cdot (h_M - h_S).$$

Το ολικό φορτίο της ψυκτικής συσκευής δίνεται $36.800 \text{ kcal/h} = 42,77 \text{ kW}$. Άρα, στην ανωτέρω σχέση είναι όλα τα μεγέθη γνωστά, εκτός από την ειδική ενθαλπία της κατάστασης αέρα στην έξοδο από την ψυκτική συσκευή (σημείο S στον ψυχομετρικό χάρτη), η οποία μπορεί να υπολογιστεί λύνοντας ανάλογα την ανωτέρω σχέση:

$$q_{\Psi\Sigma} = \dot{m}_M \cdot (h_M - h_S) \Leftrightarrow h_S = \frac{\dot{m}_M \cdot h_M - \dot{Q}_{\Psi\Sigma}}{\dot{m}_M} \Leftrightarrow h_S = \frac{1,786 \cdot 57,03 - 42,77 \text{ kJ}}{1,786} \Leftrightarrow h_S = 33,08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

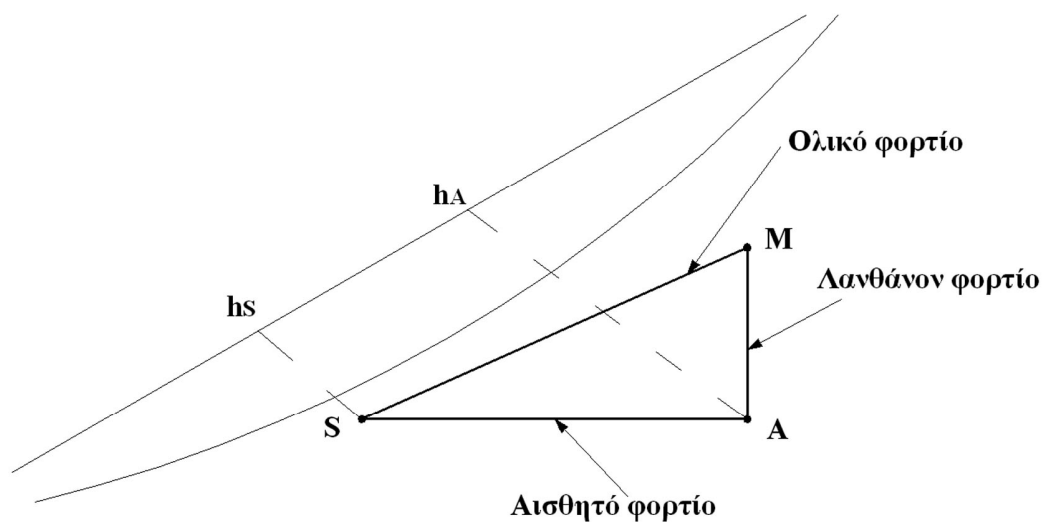
Επιπλέον ως δεδομένο δίνεται η αισθητή ψυκτική ισχύς της ψυκτικής συσκευής, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$q_{\Psi\Sigma s} = \dot{m}_M \cdot (h_A - h_S)$$

όπου h_A είναι η ειδική ενθαλπία ενός σημείου A που στον ψυχομετρικό χάρτη προκύπτει από την τομή της κατακόρυφης ευθείας από το σημείο M και της οριζόντιας ευθείας από το σημείο S, του οποίου βέβαια η θέση αναζητείται (σχήμα 4.24).

Η ειδική ενθαλπία του σημείου A υπολογίζεται επιλύοντας την ανωτέρω σχέση ανάλογα:

$$q_{\Psi\Sigma s} = \dot{m}_M \cdot (h_A - h_S) \Leftrightarrow h_A = \frac{q_{\Psi\Sigma s} + \dot{m}_M \cdot h_S}{\dot{m}_M} \Leftrightarrow h_A = \frac{24,99 + 1,786 \cdot 33,11 \text{ kJ}}{1,786} \Leftrightarrow h_A = 47,10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$



Σχήμα 4.24: Ανάλυση ολικού φορτίου ψυκτικής συσκευής σε αισθητό και λανθάνον.

Η θέση του σημείου A μπορεί πλέον να εντοπιστεί στον ψυχομετρικό χάρτη από την τομή της ισενθαλπικής ευθείας των $47,10\text{kJ/kg}$ και της κατακόρυφης ευθείας που διέρχεται από το σημείο M. Επιπλέον, είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης του σημείου S στον ψυχομετρικό χάρτη, ως η τομή της οριζόντιας ευθείας που διέρχεται από το σημείο A και της ισενθαλπικής των $33,08\text{kJ/kg}$.

Εντοπίζοντας τη θέση του σημείου S διαβάζουμε τελικά από τον ψυχομετρικό χάρτη τις ιδιότητές του:

- θερμοκρασία ξηρού βολβού: $T_{S/DB} = 14,0^\circ\text{C}$
- θερμοκρασία υγρού βολβού: $T_{S/WB} = 11,6^\circ\text{C}$
- σχετική υγρασία: $\phi_S = 75\%$
- ειδική υγρασία: $w_S = 7,5\text{gr H}_2\text{O/kg ξ.α.}$
- σημείο δρόσου: $T_{S/dp} = 9,7^\circ\text{C}$.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι η θέση του σημείου S στον ψυχομετρικό χάρτη θα μπορούσε να εντοπιστεί εναλλακτικά χρησιμοποιώντας την κλίση της ευθείας M-S. Δεδομένου του ότι είναι γνωστά το ολικό και το αισθητό ολικό φορτίο της κλιματιστικής συσκευής, είναι δυνατό να υπολογιστεί το παράγοντα αισθητής θερμότητας SHF:

$$\text{SHF} = \frac{q_a}{q_{\text{συν}}}$$

Με τον παράγοντα αισθητής θερμότητας SHF γνωστό, με τη βοήθεια του ημικυκλίου στο άνω δεξιό μέρος του ψυχομετρικού χάρτη εντοπίζεται η κλίση της ευθείας M-S. Τελικά το σημείο S εντοπίζεται στον ψυχομετρικό χάρτη από την τομή της ισενθαλπικής των $33,08\text{kJ/kg}$ και της ευθείας που διέρχεται από το σημείο M και έχει κλίση ίση με SHF.

Γίνεται αντιληπτό ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι απλούστερη, καθώς εμπεριέχει λιγότερους υπολογισμούς. Ωστόσο, παρουσιάζει το μειονέκτημα του σχεδιαστικού σφάλματος, καθώς προϋποθέτει την

ακριβή χάραξη από το σημείο M ευθείας παράλληλης με την κλίση που καθορίζεται από τον SHF στο ημικύκλιο του χάρτη. Συνεπώς, με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι δυνατή η περισσότερο ακριβής προσέγγιση της λύσης του προβλήματος.

Ερώτημα α4. Το σημείο δρόσου της κλιματιστικής συσκευής και το συντελεστή παράκαμψης.

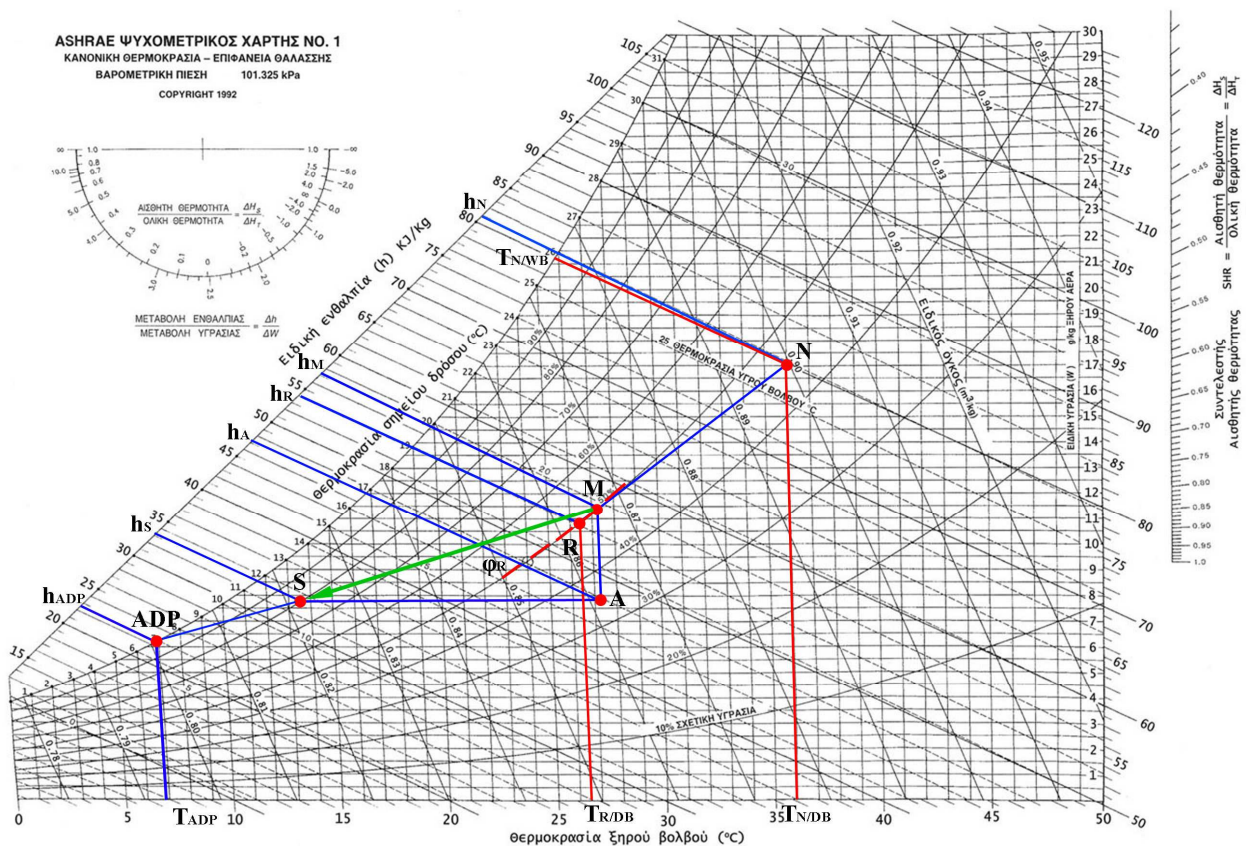
Το σημείο δρόσου προκύπτει από την τομή της προέκτασης της ευθείας της μεταβολής M-S με την καμπύλη κορεσμού στον ψυχομετρικό χάρτη. Από τον ψυχομετρικό χάρτη τελικά διαβάζουμε:

$$T_{ADP} = 6,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Τέλος ο συντελεστής παράκαμψης υπολογίζεται από τη σχέση ορισμού του, έχοντας προηγουμένως εκτιμήσει την ειδική ενθαλπία του για το σημείο δρόσου της ψυκτικής συσκευής $h_{ADP} = 22,6\text{kJ/kg}$.

$$B.F. = \frac{h_S - h_{ADP}}{h_M - h_{ADP}} \Leftrightarrow B.F. = \frac{33,08 - 22,6}{57,03 - 22,6} \Leftrightarrow B.F. = 30,44\% .$$

Στο σχήμα 4.25 παρουσιάζονται οι σχεδιαστικές εργασίες στον ψυχομετρικό χάρτη που απαιτήθηκαν κατά τη διαδικασία επίλυσης του παρόντος παραδείγματος.



Σχήμα 4.25: Ψυχομετρικοί υπολογισμοί στον ψυχομετρικό χάρτη κατά το θερινό κλιματισμό χώρων.