



N.K.U.A. - Department of Science

Psachna, Euboea - Euripus Campus

# Φυσική Περιβάλλοντος :

## “Νερό στην Ατμόσφαιρα”

*Καθ. Μιχάλης Γρ Βραχόπουλος*

Energy and Environmental Research Laboratory



## Νερό στην Ατμόσφαιρα

Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες της ατμόσφαιρας που μελετάται ξεχωριστά λόγω της σπουδαιότητάς της, είναι η ατμοσφαιρική υγρασία.

Το ατμοσφαιρικό νερό υπάρχει στην ατμόσφαιρα και στις τρεις φάσεις. Αέρια κατάσταση (υδρατμοί), υγρή κατάσταση (βροχή, δρόσος) και στερεή κατάσταση (χιόνι, χαλάζι, πάχνη).

Οι ατμοσφαιρικοί υδρατμοί αποτελούν από το 1 ~3 ή και ~5% του ατμοσφαιρικού ρευστού αλλά οι ποσότητές τους μεταβάλλονται σε μεγάλο εύρος.

Με τον όρο υγρασία χαρακτηρίζεται η ποσότητα των υδρατμών στον ατμοσφαιρικό αέρα.

# Υδρολογικός Κύκλος

Ο κύκλος του νερού – γνωστός και ως υδρολογικός κύκλος – είναι η συνεχής ανακύκλωση του νερού της Γης μέσα στην υδρόσφαιρα και στην ατμόσφαιρα.

Το συνεχές της κυκλικής διαδικασίας (του κύκλου του νερού) επιτυγχάνεται εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το νερό στον πλανήτη αλλάζει συνεχώς φυσική κατάσταση, από τη στερεά μορφή των πάγων, στην υγρή μορφή των ποταμών, λιμνών και της θάλασσας και την αέρια κατάσταση των υδρατμών.

# Νερό στην Ατμόσφαιρα

Η ατμόσφαιρα μπορεί να χαρακτηριστεί:

**Ξηρή** η ατμόσφαιρα με μικρές ποσότητες υγρασίας (πάνω από ερήμους) ή

**υγρή** η ατμόσφαιρα με μεγάλες ποσότητες υγρασίας (πάνω από ωκεανούς, ή μεγάλες μάζες νερού ... θάλασσες, λίμνες κ.λπ.)

Εισέρχονται στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης από μεγάλες μάζες νερού και της εξάτμισης - διαπνοής από τα φυτά.

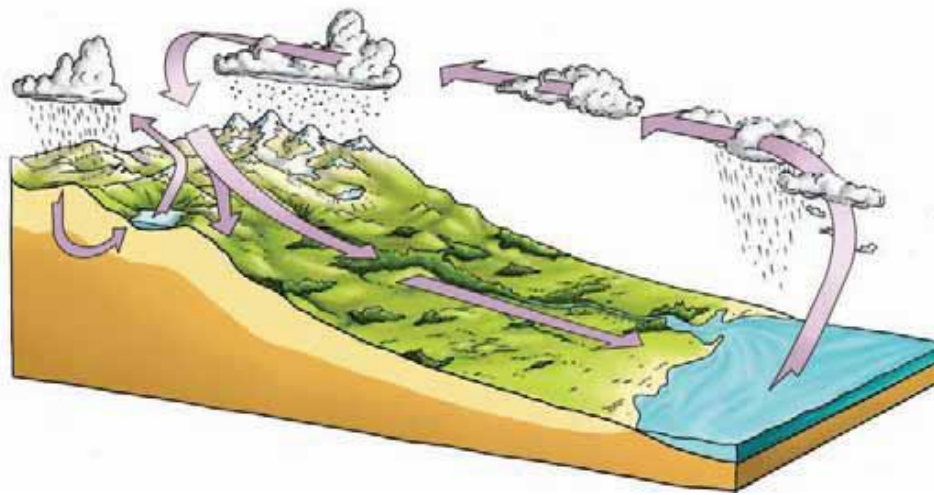
Οι αλλαγές φάσης του νερού παίζουν κεφαλαιώδη σημασία στην ατμόσφαιρα επειδή συνοδεύονται από απορροφήσεις ή απελευθερώσεις θερμότητας.

**Η θερμότητα αυτή ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα.**

Συγκεκριμένα, λόγω της θέρμανσης και των ανέμων στην επιφάνεια της Γης, τα νερά της **εξατμίζονται** και μαζεύονται ως **υδρατμοί** δημιουργώντας **σύννεφα**.

Οι υδρατμοί **συμπυκνώνονται, υγροποιούνται** και στη συνέχεια πέφτουν ως βροχή (ή άλλες μορφές **υετού**), εμπλουτίζοντας έτσι τις αποθήκες νερού της Γης, είτε αυτές είναι επιφανειακές, όπως οι **θάλασσες** και οι **λίμνες**, είτε είναι υπόγειες.

Μορφή	Όγκος (x10 <sup>3</sup> km <sup>3</sup> )	Ποσοστό (%)
Θάλασσες (αλμυρό νερό)	1.320.000	97,22
Παγετοί - Χιόνια	29.200	2,15
Υπόγεια Νερα	8.250	0,608
Λίμνες	125	0,014
Εδαφική υγρασία	65	
Ποταμοί	1,25	
Λίμνες αλμυρού νερού - υφάλμυρα νερά	105	0,008
Νερό ατμόσφαιρας	13	0,001
<b>Σύνολο</b>	<b>1.357.759</b>	<b>100</b>



**Υδρολογικός κύκλος:** Η σταθερή και αδιάκοπη κίνηση του νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της Γης, στο υπέδαφος και πάλι στην ατμόσφαιρα.

**Εξάτμιση:** Η μεταβολή του νερού της επιφάνειας της Γης (ωκεανών, λιμνών, ποταμών) σε ατμό με την επίδραση της θερμότητας.

**Εξάτμιση-διαπνοή:** Κάθε φυτό μοιάζει με μια αντλία που παίρνει νερό από το έδαφος και το στέλνει στην ατμόσφαιρα, μέσα από τα στόματα του φυλλώματός του.

**Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα:** Οι μορφές με τις οποίες το νερό πέφτει στη γη (χιόνι, χαλάζι, βροχή, δροσιά κτλ.).

**Απορροή:** Η κίνηση του νερού στην επιφάνεια του εδάφους με τη μορφή ρυακιών, ποταμών, χειμάρρων.

**Κατείσδυση:** Ένα μέρος του νερού κατεισδύει (δηλαδή εισέρχεται) στη γη από τους πόρους ή τις ρωγμές των διάφορων πετρωμάτων και από τα ρήγματα της Γης. Αυτά είναι τα λεγόμενα υπόγεια νερά.

## **Εξάτμιση:**

Είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου τα μόρια ενός σώματος μεταπίπτουν από την υγρή (ή τη στερεά φάση), στην αέρια. Η εξάτμιση του νερού στην ατμόσφαιρα γίνεται από τις υδάτινες μάζες, όπως είναι οι ωκεανοί, οι λίμνες και τα ποτάμια και επίσης από τα έλη, το έδαφος και τις υγρές καλλιέργειες.

## **Διαπνοή:**

Είναι η διαδικασία με την οποία τα φυτά χρησιμοποιούν το νερό για το μεταβολισμό και την ανάπτυξη τους. Τα φυτά απορροφούν το εδαφικό νερό με το ριζικό τους σύστημα και το μεταβιβάζουν στην ατμόσφαιρα υπό μορφή υδρατμών, δια των πόρων που υπάρχουν στο φύλλωμα τους, **είναι γνωστοί ως "στόματα"**. Η διαπνοή μπορεί να θεωρηθεί **ανάλογη διαδικασία με την εξάτμιση, με τη διαφορά ότι τα φυτά ελέγχουν την ποσότητα νερού που διαπνέεται ανοίγοντας και κλείνοντας τα "στόματα" του φυλλώματος.**

**Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή:** Η απευθείας εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή γίνονται ταυτόχρονα στη φύση και είναι δύσκολο να διαχωριστούν οι υδρατμοί που παράγονται με τις δυο διεργασίες. Ως εκ τούτου, ο όρος εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration-ET) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συνολική διεργασία μεταφοράς νερού στην ατμόσφαιρα από φυτό καλυμμένες επιφάνειες.

**Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή:** Η έννοια της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (potential evapotranspiration- *EPT* ή *PET*) χρησιμοποιείται ευρύτατα στη μελέτη της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής. Με τον όρο αυτό περιγράφεται η ποσότητα εξατμισοδιαπνοής που πραγματοποιείται σε πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες με χλωρίδα επιφάνειες, κάτω από συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι πάντα μικρότερη (συνήθως πολύ μικρότερη τους θερινούς μήνες) ή το πολύ ίση με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Ο όρος εισήχθη για πρώτη φορά από τον **Thornthwaite (1948)** για να εκφράσει τις απώλειες νερού από έδαφος με βλάστηση, όταν υπάρχει επάρκεια νερού. Την ίδια εποχή ο **Penman (1948)** ανέπτυξε την πρώτη εξίσωση που βασίζεται σε κλιματικά δεδομένα και περιέγραψε τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. **Στην πραγματικότητα η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από το έδαφος, την καλλιέργεια και τους κλιματικούς παράγοντες, χωρίς να είναι εύκολο να προσδιοριστούν επακριβώς αυτές οι επιδράσεις.**



# Φάσεις του Νερού στην Ατμόσφαιρα και μετατροπές

Εξάτμιση, αν πρόκειται για μετάβαση από την υγρή στην αέρια φάση.

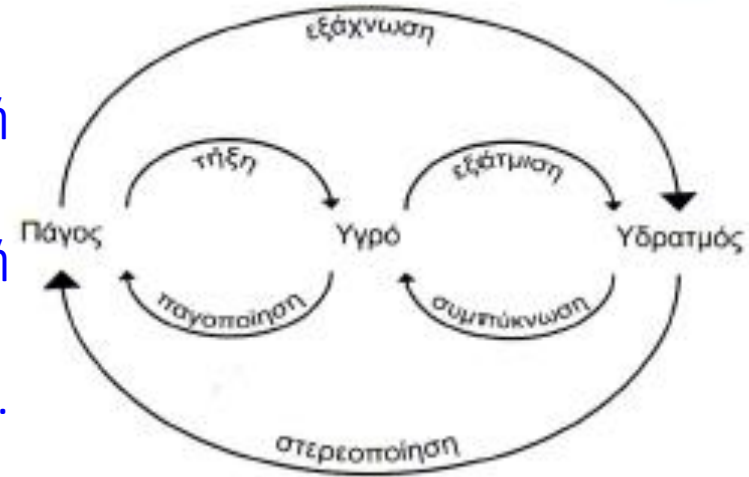
Συμπύκνωση, μετατροπή από την αέρια στην υγρή φάση.

Παγοποίηση, μετάβαση από την υγρή στη στερεά φάση.

Τήξη, μετάβαση από την στερεή στην υγρή φάση.

Εξάχνωση, μετάβαση από την στέρεή στην αέρια φάση και

Στερεοποίηση, μετάβαση από την αέρια στην στερεή φάση.



Ο συνδυασμός απωλειών νερού από εξάτμιση και διαπνοή σε μια περιοχή ονομάζεται εξατμισοδιαπνοή.

Επομένως, η ατμόσφαιρα πάνω από πυκνή βλάστηση έχει μεγαλύτερη υγρασία από ότι επάνω από περιοχές με λίγη ή καθόλου βλάστηση.

Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από την ηλιακή ενέργεια που φτάνει σε ένα τόπο και είναι μεγαλύτερο στα γεωγραφικά πλάτη 20° N – 20° S.

# Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του αέρα

# Ιδιότητες Αέρα

- Θερμοκρασία Ξηρού Βολβού
- Θερμοκρασία υγρού Βολβού
- Θερμοκρασία δρόσου
- Σχετική υγρασία
- Λόγος υγρασίας



# Θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου ή βολβού ( $T_{db}$ )

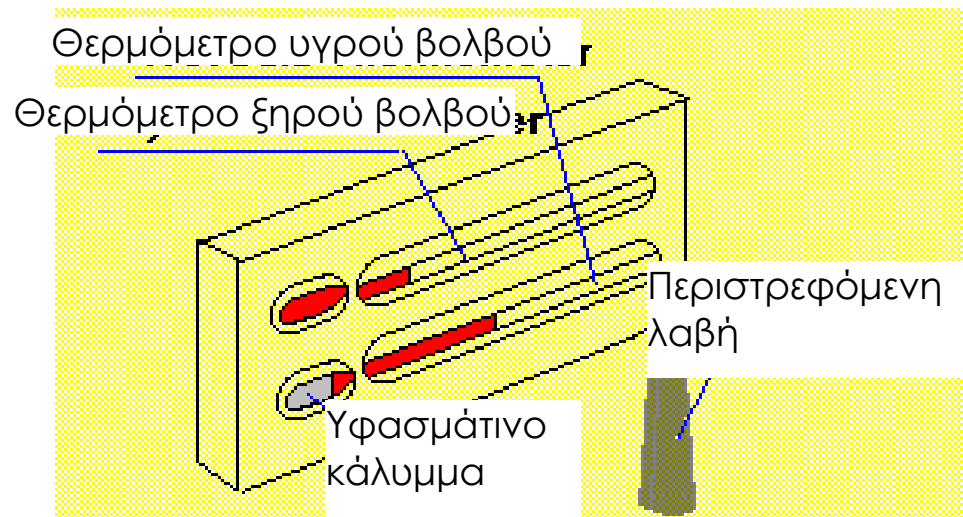
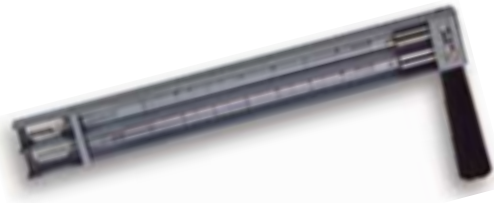
- Συχνά αναφέρεται απλώς ως θερμοκρασία και είναι η θερμοκρασία του αέρα που μετράται με απλό θερμόμετρο.



Απλό γυάλινο θερμόμετρο

# Η Θερμοκρασία υγρού βολβού ή βολβού ( $T_{wb}$ )

- Είναι η ελάχιστη θερμοκρασία που δίνει ένα κοινό θερμόμετρο, του οποίου ο βολβός είναι τυλιγμένος με βρεγμένο ύφασμα και εκτεθεί σε ρεύμα αέρα, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η εξάτμιση του νερού.
- Η θερμοκρασία του υγρού βολβού μπορεί να είναι μικρότερη ή ίση από τη θερμοκρασία ξηρού βολβού (απλού θερμόμετρου). Και αυτό συμβαίνει γιατί για την εξάτμιση του νερού από το βρεγμένο ύφασμα, πρέπει να απορροφηθεί ένα ποσό θερμότητας (λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης).



Ψυχρόμετρο

# Πυκνότητα υγρού αέρα ( $\rho$ )

- Είναι ο λόγος της ολικής μάζας ( $m_{υ.α}$ ) προς τον ολικό όγκο ( $v$ ) του υγρού αέρα, σε καθορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, δηλαδή:

$$\rho = \frac{m_{υ.α.}}{v} = \frac{m_w + m_{\xi.α}}{v} = \frac{m_w}{v} + \frac{m_{\xi.α}}{v} = \frac{m_w}{v} + \rho_{da}$$

( $\text{kg}_{υ.α}/\text{m}^3_{υ.α}$ )

○ εκφράζεται επίσης και σε ( $\text{Lb}_{υ.α}/\text{Ft}^3_{υ.α}$ )

# Ειδικός όγκος υγρού αέρα ( $\nu$ )

- Είναι ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνει ο υγρός αέρας ( $\nu$ ) προς τη μάζα του ξηρού αέρα ( $m_{\xi.a}$ ), σε καθορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, δηλαδή:

$$\nu = \frac{\nu}{m_{\xi.a}} (m^3_{\nu.a} / kg_{\xi.a})$$

# Ειδική υγρασία ( $w$ )



- Είναι ο λόγος της μάζας των υδρατμών ( $m_w$ ) που υπάρχουν στο μίγμα, προς τη μάζα του ξηρού αέρα ( $m_{\xi.a}$ ) του μίγματος, δηλαδή:

$$w = \frac{m_w}{m_{\xi.a}} \quad (\text{kg}_w/\text{kg}_{\xi.a})$$

Η υγρασία κορεσμού ( $w_s$ ), είναι η ειδική υγρασία σε κατάσταση κορεσμού ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\xi.a}$ ). Είναι δηλαδή, ο λόγος της μάζας των υδρατμών που υπάρχουν στο μίγμα σε κατάσταση κορεσμού (η μέγιστη ποσότητα των υδρατμών που μπορεί να περιέχει ο αέρας), προς τη μάζα του ξηρού αέρα του μίγματος.



# Θερμοκρασία κορεσμού ή σημείου δρόσου ( $T_{dp}$ )

- Είναι η θερμοκρασία του κορεσμένου σε υδρατμούς αέρα, δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η συμπύκνωση των υδρατμών.



Αν ψυχθεί το μίγμα υγρού αέρα υπό σταθερή πίεση και με σταθερή (ειδική) υγρασία ( $w$ ), τότε πλησιάζει την κατάσταση κορεσμού και εμφανίζει τα πρώτα σταγονίδια σε θερμοκρασία ( $T_{dp}$ ). Είναι κατανοητό ότι, όσο μικρότερη είναι η (ειδική) υγρασία  $w$  του αέρα (για δεδομένη θερμοκρασία αέρα), τόσο μικρότερη είναι και η θερμοκρασία κορεσμού του αέρα και αντίστροφα.

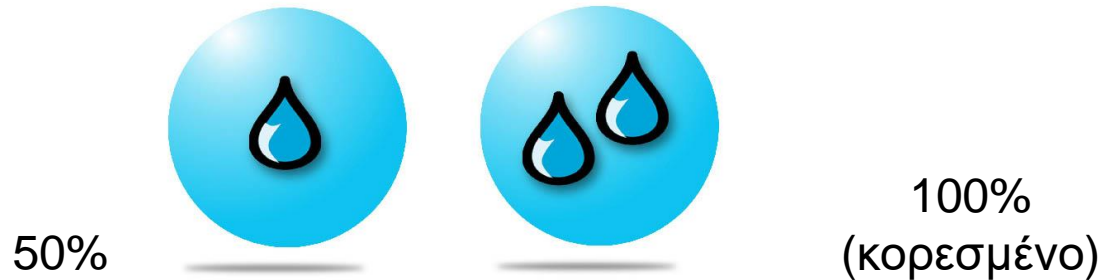
# Σχετική υγρασία ( $\phi$ , RH)

- Η σχετική υγρασία, εκφράζει το ποσοστό που ο αέρας είναι κορεσμένος σε υδρατμούς και είναι ο λόγος της ειδικής υγρασίας ( $w$ ) που περιέχεται στον αέρα, προς την υγρασία κορεσμού ( $w_s$ ) κάτω από ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, δηλαδή:

$$\phi = RH = \frac{w}{w_s}$$

- Η σχετική υγρασία δίνεται σε ποσοστό επί τοις εκατό, δηλαδή:

$$\phi = RH = \frac{w}{w_s} \cdot 100\%$$



# Όργανα μέτρησης της σχετικής υγρασίας

- Τα όργανα μέτρησης της σχετικής υγρασίας, ονομάζονται υγρόμετρα και υπάρχουν σε αναλογική και ψηφιακή μορφή.



Τα ψηφιακά υγρόμετρα που διατίθενται, συνήθως προσφέρουν τη δυνατότητα μέτρησης και της θερμοκρασίας

# Ειδική ενθαλπία μίγματος υγρού αέρα ( $h_+$ )

- Ονομάζεται το ποσό θερμότητας που περιέχεται σε 1 kg μίγματος ξηρού αέρα και νερού, και είναι το σύνολο της αισθητής ( $h_s$ ) και της λανθάνουσας ( $h_l$ ) θερμότητας που περιέχεται στη μονάδα της μάζας του ξηρού αέρα.

Μονάδες μέτρησης της ειδικής ενθαλπίας: J/kg ή συνήθως kJ/kg

- Κατ' αντιστοιχία, ενθαλπία ( $H_+$ ) του αέρα ονομάζεται το σύνολο της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας, που περιέχεται σε όλη την ποσότητα του εξεταζόμενου υγρού αέρα.

Μονάδες μέτρησης της ενθαλπίας: J ή συνήθως kJ

# Ψυχρομετρικός χάρτης

- Ο ψυχρομετρικός χάρτης είναι η γραφική απεικόνιση, όπου εμφανίζεται η σχέση μεταξύ των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του υγρού αέρα.
- Η μεγάλη σπουδαιότητα του ψυχρομετρικού χάρτη, οφείλεται στο γεγονός, ότι με γνώση δύο μόνο ψυχρομετρικών χαρακτηριστικών του ατμοσφαιρικού αέρα, μπορούν να βρεθούν όλα τα υπόλοιπα.

# Ψυχομετρικός χάρτης

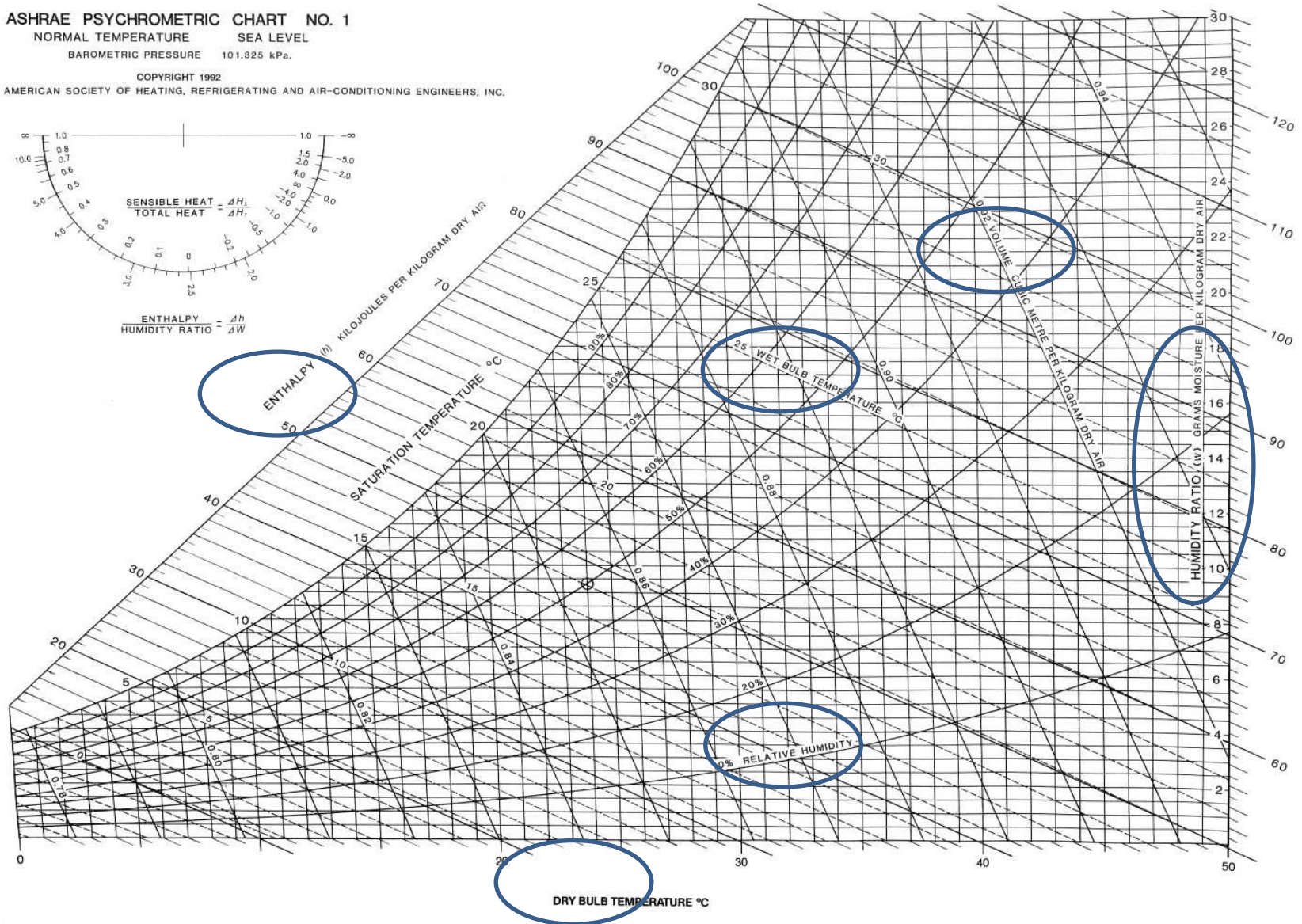
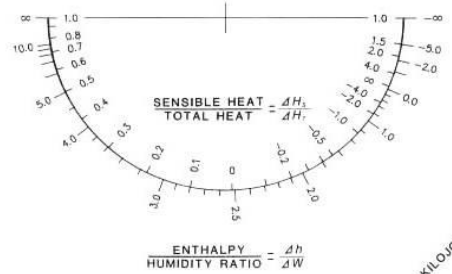
## ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 1

NORMAL TEMPERATURE SEA LEVEL

BAROMETRIC PRESSURE 101.325 kPa.

COPYRIGHT 1992

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.





# Εύρεση θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του αέρα με χρήση ψυχομετρικού χάρτη

- Τα συνήθη χαρακτηριστικά του αέρα που μπορούν να μετρηθούν εύκολα είναι: η θερμοκρασία ξηρού βολβού με ένα απλό θερμόμετρο, η θερμοκρασία υγρού βολβού με θερμόμετρο υγρού βολβού και η σχετική υγρασία με υγρόμετρο.
- Με μετρημένα τα δύο χαρακτηριστικά του αέρα, π.χ. τη θερμοκρασία ξηρού βολβού και τη θερμοκρασία υγρού βολβού, η διαδικασία εύρεσης των υπόλοιπων έχει ως εξής:

# Εκφράσεις της υγρασίας στην Ατμόσφαιρα

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς ανάλογα με το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εκφράσεις και ορισμοί:

**1. Τάση υδρατμών:** Η μερική πίεση των ακόρεστων υδρατμών στον αέρα (hPa)

Η καταστατική εξίσωση για τους ακόρεστους υδρατμούς (ως ιδανικό αέριο) δίδεται:

$$e = \rho_{wv} * R_{wv} * T$$

Όπου:  $e$ , η τάση των ακόρεστων ατμών

$\rho_{wv}$ , η πυκνότητα των ακόρεστων υδρατμών ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$ )

$R_{wv}$ , η σταθερά των αερίων για τους υδρατμούς ( $\text{Jkg}^{-1}\text{grad}^{-1}$  ή  $\text{Jmol}^{-1}\text{grad}^{-1}$ ) και

$T$ , η θερμοκρασία του αέρα (K, grad)

**2. Απόλυτη υγρασία ( $e$ ),** ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχονται σε ένα όγκο υγρού αέρα διά του όγκου αυτού. Η απόλυτη υγρασία μετράται σε  $\text{gr}/\text{m}^3$ .



## Εκφράσεις της υγρασίας στην Ατμόσφαιρα

**3. Αναλογία μείγματος (w):** Είναι ο λόγος της μάζας των υδρατμών σε μια μονάδα μάζας ξηρού αέρα (που δεν περιέχει υδρατμούς) **(gr w/kgda).**

λ.χ. εάν 10gr υδρατμών βρίσκονται σε ένα kg ξηρού αέρα, η αναλογία μείγματος είναι 10grw/kgda. Συνεπώς η ολική ποσότητα του αέρα με τους υδρατμούς είναι 1,01kg.

$$w = \frac{m_{wv}}{m_{da}} = \frac{\frac{m_{wv}}{V}}{\frac{m_{da}}{V}} = \frac{\rho_{wv}}{\rho_{da}}$$

Από την καταστατική εξίσωση για τους υδρατμούς:  $e = \rho_{wv} * R_{wv} * T$   
Επιλύοντας ως προς  $\rho_{wv}$ , προκύπτει:

$$\rho_{wv} = \frac{e}{R_{wv} T}$$

## Εκφράσεις της υγρασίας στην Ατμόσφαιρα

Από την καταστατική εξίσωση του αέρα που περιέχει υδρατμούς, με  $P = \rho_{da} * R_{da} * T$ , τότε η πίεση του ξηρού αέρα είναι  $p - e = \rho_{da} * R_{da} * T$ , επιλύοντας ως προς  $\rho_{da}$ , προκύπτει:

$$\rho_{da} = \frac{p - e}{R_{da} T}$$

Με αντικατάσταση υπολογίζεται .....

$$w = \frac{\rho_{wv}}{\rho_{da}} = \frac{\frac{e}{R_{wv} T}}{\frac{p - e}{R_{da} T}} = \frac{\frac{e}{R_{wv}}}{\frac{p - e}{R_{da}}} = \frac{e}{p - e} \frac{R_{da}}{R_{wv}}$$

Αλλά, .....  $R_{da} = \frac{R}{M_{da}}$  ...και  $R_{wv} = \frac{R}{M_{wv}}$  ...και επομένως  $\frac{R_{da}}{R_{wv}} = \frac{M_{wv}}{M_{da}}$

Ο λόγος της εξίσωσης είναι  $\varepsilon = 0,622$  και η αναλογία μείγματος γίνεται:

Εάν θεωρηθεί ότι  $p - e \sim p$ , τότε .....

$$w \approx \frac{e}{p} \varepsilon$$

$$w = \frac{e}{p - e} \varepsilon$$

Ομοίως σε κατάσταση κόρου, ο τύπος μετασχηματίζεται σε:  $w_s = \varepsilon^* e_s / p$

Ειδική θερμότητα του ξηρού Αέρα υπό σταθερή πίεση	$c_p$	1004	J/kgK
Ειδική θερμότητα του ξηρού Αέρα υπό σταθερό όγκο	$c_v$	717	J/kgK
Ειδική θερμότητα των υδρατμών υπό σταθερή πίεση	$c_{pw}$	1864	J/kgK
Ειδική θερμότητα των υδρατμών υπό σταθερό όγκο	$c_{vw}$	1403	J/kgK
Ειδική θερμότητα του νερού στους 0°C	$c_w$	4218	J/kgK
Ειδική θερμότητα του πάγου στους 0°C	$c_i$	2106	J/kgK
Πυκνότητα του νερού στους 0°C	$\rho_w$	1000	kg/m <sup>3</sup>
Πυκνότητα του πάγου στους 0°C	$\rho_i$	917	kg/m <sup>3</sup>
Μοριακό βάρος νερού	$M_w$	18,016	kg/molK
Μοριακό βάρος ξηρού αέρα	$M_{da}$	28,0966	kg/molK
Λόγος μοριακού βάρους νερού προς το ξηρού αέρα	$\varepsilon$	0,622	
Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης στους 0°C (-)	$L_e$	$2,5 \times 10^6$	J/kg
Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης στους 100°C (-)	$L_e$	$2,25 \times 10^6$	J/kg
Λανθάνουσα θερμότητα εξάχνωσης (-)	$L_s$	$2,85 \times 10^6$	J/kg
Λανθάνουσα θερμότητα τήξης (-)	$L_m$	$3,35 \times 10^6$	J/kg
Λανθάνουσα θερμότητα πήξης (παγοποίησης)	$L_d$	$3,35 \times 10^6$	J/kg
Λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης στους 0°C	$L_c$	$2,5 \times 10^6$	J/kg
Λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης	$L_{sol}$	$2,85 \times 10^6$	J/kg
Θερμική αγωγιμότητα στους 0°C, ανεξάρτητη από την πίεση	$k$	$2,4 \times 10^{-2}$	W/mK
Σταθερά αερίων για τους υδρατμούς	$R_{wv}$	461	J/kgK
Σταθερά αερίων για τον ξηρό αέρα	$R_{da}$	287	J/kgK

Πίνακας: τιμές διαφόρων σταθερών που εμπλέκονται σε θερμοδυναμικές διεργασίες σε σχέση με το νερό

**4. Ειδική υγρασία (q):** Είναι ο λόγος της μάζας των υδρατμών που υπάρχουν στον αέρα. Στη μονάδα μάζας αέρα που περιέχει υδρατμούς ( $gr_w/kg_{wa}$ ).

λ.χ. εάν 10gr υδρατμών βρίσκονται σε ένα kg αέρα, η αναλογία μείγματος είναι  $10gr_w/kg_{wa}$ .

$$q = \frac{m_{wv}}{m_{wv} + m_{da}} = \frac{\rho_{wv}}{\rho_{wv} + \rho_{da}} = \frac{\frac{\rho_{wv}}{\rho_{da}}}{1 + \frac{\rho_{wv}}{\rho_{da}}} = \frac{w}{1 + w}$$

η εξίσωση αυτή συνδέει την ειδική υγρασία με την αναλογία μείγματος.

Με αντικατάσταση .... Προκύπτει:

$$q = \frac{\frac{e}{p-e} \varepsilon}{1 + \frac{e}{p-e} \varepsilon} = \frac{\frac{e}{p-e} \varepsilon}{\frac{p-e + e\varepsilon}{p-e}} = \frac{e\varepsilon}{p-e(1-\varepsilon)}$$

Επειδή όμως  $(1-\varepsilon)e \ll p$ , θεωρείται ότι  $q \sim \varepsilon^* e/p$  και συνεπώς ....  $q \sim w$

Τόσο η ειδική υγρασία, όσο και η αναλογία μείγματος μεταβάλλονται με την πίεση και τη θερμοκρασία και θεωρούνται διατηρούμενες ιδιότητες του υγρού αέρα όταν δεν λαμβάνει χώρα συμπύκνωση υδρατμών.

5. **Τάση κορεσμένων υδρατμών:** όταν ο όγκος αέρα περιέχει το μέγιστο ποσό υδρατμών σε δεδομένη θερμοκρασία και πίεση αποκαλείται κορεσμένος. Τότε η μερική πίεση των υδρατμών (υπό αυτές τις συνθήκες) ονομάζεται τάση κορεσμένων ατμών (hPa), ισχύει η :

$$e_s = \rho_{wvs} * R_{wvs} * T$$

η θερμοκρασία του αέρα στην οποία είναι κορεσμένος σε υδρατμούς ο αέρα καλείται **σημείο δρόσου (°C)**.

Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία αρχίζει η συμπύκνωση των υδρατμών.

**6. Σχετική υγρασία:** είναι ο λόγος της ποσότητας υδρατμών σε ένα όγκο αέρα προς τη μέγιστη ποσότητα των υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει αυτός ο όγκος αέρα στην ίδια θερμοκρασία.

Έτσι, εάν ένας όγκος αέρα περιέχει 6gr υδρατμών και η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να συγκρατήσει στην ίδια θερμοκρασία υπό σταθερή πίεση είναι 8 gr τότε η σχετική υγρασία είναι 75% (καλείται και βαθμός κορεσμού). Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται και η μέγιστη ποσότητα των υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρα με αντίστοιχη μείωση του βαθμού κορεσμού.

Η σχετική υγρασία και ο βαθμός κορεσμού παρουσιάζει σε γενικές γραμμές πάνω από την ξηρά, **μέγιστα το πρωί** και τον χειμώνα και **ελάχιστα το απόγευμα** και το θέρος

Σχετική υγρασία:

Με αντικατάσταση προκύπτει ... 
$$h_r = \frac{w}{w_s}$$
 ...βαθμός κορεσμού

**7. Σημείο δρόσου:** είναι η θερμοκρασία στην οποία ο υγρός αέρας πρέπει να ψυχθεί υπό σταθερή πίεση και αναλογία μείγματος, ώστε να φτάσει στον κορεσμό, συμβολίζεται με  $T_{dp}$ . Το μέγεθος αυτό δίνει την καλύτερη εκτίμηση των υδρατμών που περιέχει ο ατμοσφαιρικός αέρας. Όσο πιο ξηρός είναι ο αέρας, τόσο χαμηλότερη η θερμοκρασία του σημείου δρόσου συγκριτικά με την θερμοκρασία του αέρα.

$$h_v = \frac{m_{wv}}{m_{wvs}} = \frac{\frac{m_{wv}}{V}}{\frac{m_{wvs}}{V}} = \frac{e}{e_s}$$

## Φάσεις του νερού στην ατμόσφαιρα

Το νερό βρίσκεται στην ατμόσφαιρα και στις τρεις φάσεις του (στερεά, υγρή και αέρια) και μετέχει στον υδρολογικό κύκλο. Έχει μέγιστη πυκνότητα στους 4 °C και ως αέριο είναι άχρωμο και άοσμο. Σε μεγάλες μάζες υδρατμών παίρνει γαλάζιο χρώμα. Είναι τριατομικό μόριο και μπορεί να μεταβάλει τη φάση του απελευθερώνοντας ή προσλαμβάνοντας λανθάνουσα θερμότητα.

Η διαδικασία της εξάτμισης απαιτεί συνήθως μεγάλα ποσά ενέργειας που μεταφέρονται από την επιφάνεια της Γης στην ατμόσφαιρα.

Η μαθηματική περιγραφή των ενεργειακών μεταβολών δίδεται από τη βασική εξίσωση της θερμιδομετρίας ....

$$Q=Lw \dots dQ=m*c*dT$$

L , λανθάνουσα θερμότητα και c, ειδική θερμότητα

\*Υδρογεωλογικός κύκλος είναι ο κύκλος του νερού σε οποιαδήποτε μορφή, που περιγράφει την κυκλοφορία του πάνω στην επιφάνεια και στην ατμόσφαιρα σε όλο τον πλανήτη



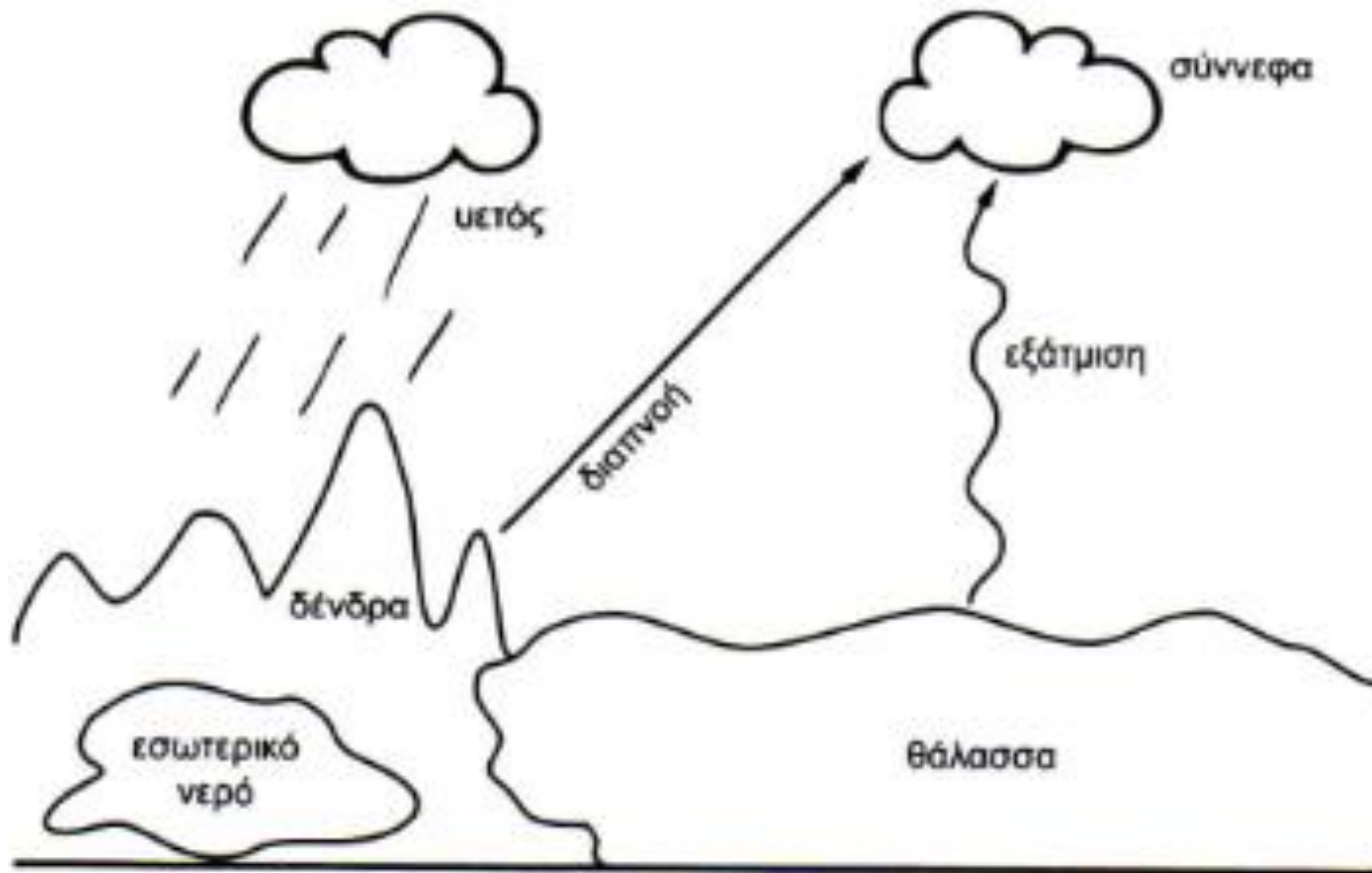
Ανάλογα με τις μεταβολές φάσης που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται και οι αντίστοιχες τιμές των μεγεθών,  $c$ : ειδική θερμότητα και  $L$ : λανθάνουσα θερμότητα.

Η εξάτμιση καθορίζεται από τη τάση ατμών, τη θερμοκρασία και την κίνηση του αέρα. Αυξάνεται όσο η τάση κεκορεσμένων ατμών στην επιφάνεια του νερού γίνεται μεγαλύτερη από την τάση ατμών του παρακείμενου αέρα. Συνεπώς, η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη στον ξηρό αέρα από ότι σε αέρα με μεγάλη σχετική υγρασία. Η εξάτμιση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού. Επίσης αυξάνεται με την κίνηση του αέρα γιατί αντικαθίσταται ο υγρός αέρας με άλλο σχετικά ξηρότερο, πάνω από την υδάτινη επιφάνεια.

**Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης** είναι η θερμική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την μετατροπή του υγρού σε αέριο και αντίστοιχα **συμπύκνωσης** η βαθμιαία μετατροπή του αερίου σε υγρό χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας.

Όταν ο υγρός αέρας μεταφέρεται πάνω από ψυχρές επιφάνειες ψύχεται παραπάνω από το σημείο δρόσου και ένα μέρος υδρατμών συμπυκνώνεται πάνω από τη ψυχρή επιφάνεια.

Το συμπυκνωμένο νερό καλείται **δρόσος**.



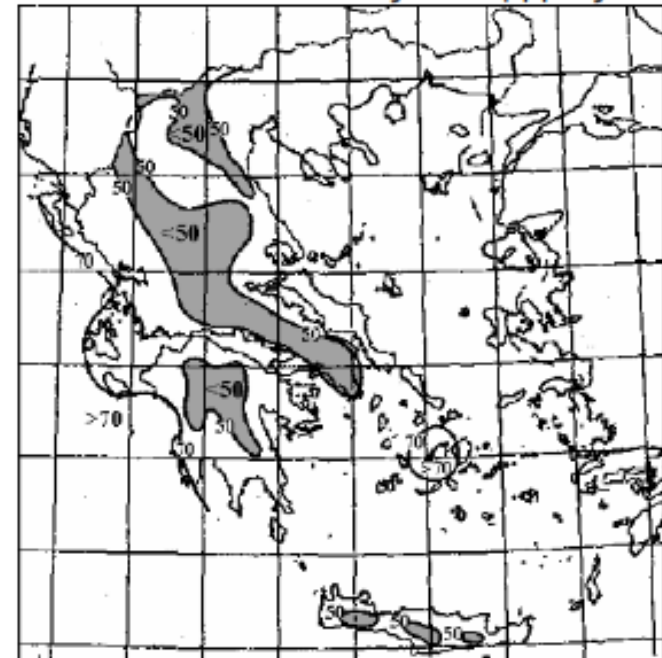
Σχηματική παράσταση του κύκλου του νερού.

# Γεωγραφική διανομή της Σχετικής Υγρασίας στην Ελλάδα

**ΧΕΙΜΩΝΑΣ:** Νοέμβριος-Φεβρουάριος



**ΘΕΡΟΣ:** Ιούνιος-Σεπτέμβριος



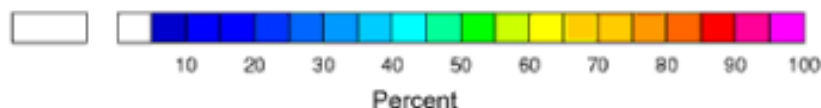
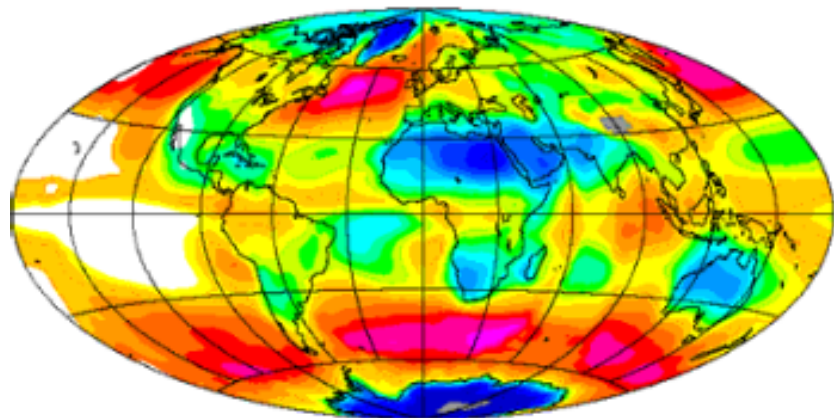
Πηγή: adapted from A.A. Φλόκας, Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 1997

- Οι **μέγιστες τιμές** της σχετικής υγρασίας (**RH**) στον Ελλαδικό χώρο σημειώνονται κατά τη **ψυχρή περίοδο** (Νοέμβριο – Φεβρουάριο) πάνω από τους ορεινούς όγκους % πάνω από τις κεντρικές και νότιες περιοχές των Κυκλάδων
- Οι **ελάχιστες** τιμές παρατηρούνται κατά τη **θερμή περίοδο** (Ιούνιο – Σεπτέμβριο) πάνω από τους ορεινούς όγκους
- Το ετήσιο εύρος της RH είναι μέγιστο στις ορεινές περιοχές και ελάχιστο στις θαλάσσιες και παράκτιες περιοχές της Δυτικής Ελλάδος

## Νέφωση

- **Νέφωση:** καλείται το τμήμα του ουράνιου θόλου το οποίο καλύπτεται από νέφη. Μετράται με προσωπική εκτίμηση βάσει μιας κλίμακας, η οποία έχει 9 βαθμίδες, από τους αριθμούς **0 - 8** και στην οποία το **μηδέν** αντιστοιχεί στον εντελώς ανέφελο ουρανό και το **8** στον πλήρη νεφοσκεπή
- Καθορίζει σημαντικά την ηλιοφάνεια

ISCCP Total Cloud Amount  
1983-1990

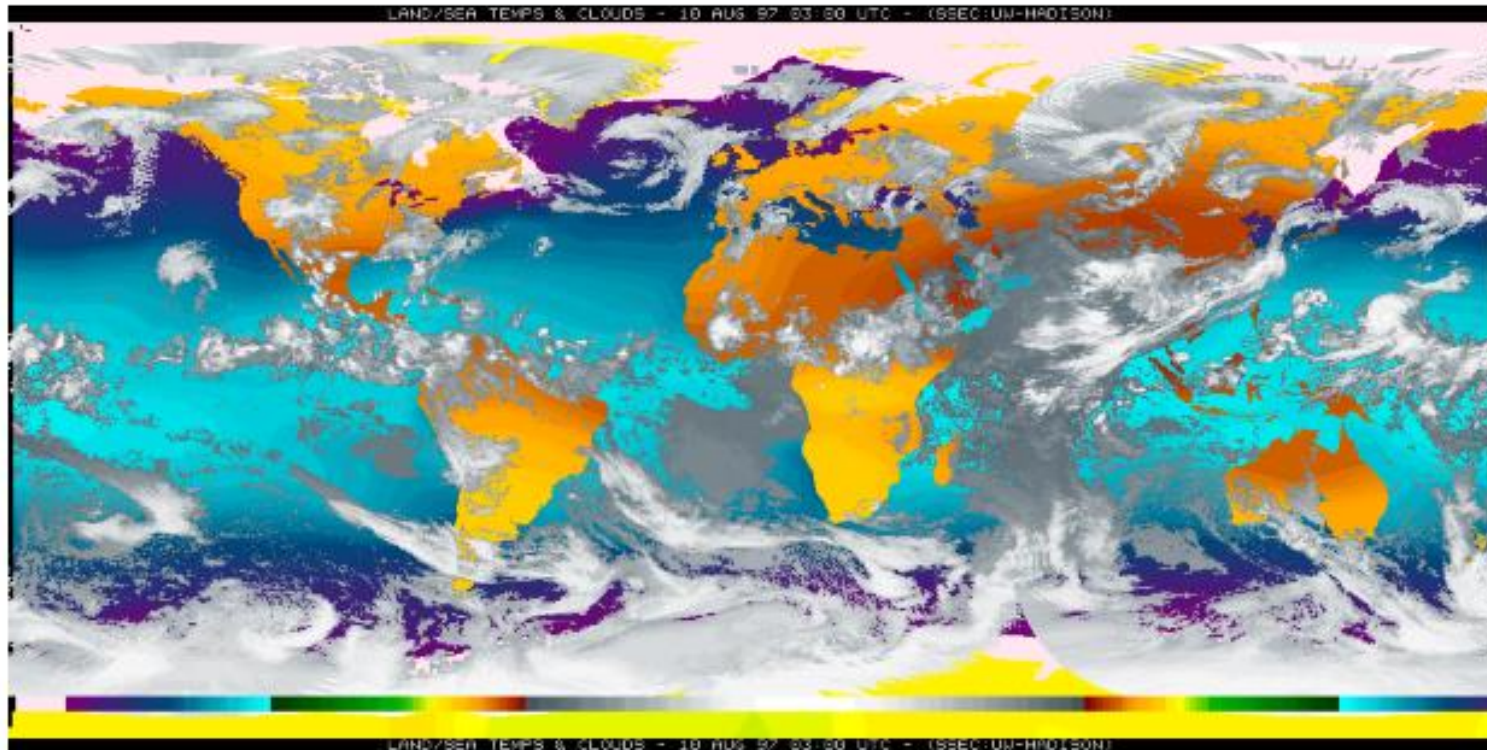


Πηγή: [http://www.nasa.gov/images/content/266652main\\_iscpp-1rp.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/266652main_iscpp-1rp.jpg)

- **Περιοχές μέγιστης νέφωσης:**
  - περιοχές επικράτησης χαμηλών πιέσεων (Βόρειος Ατλαντικός λόγω του Ισλανδικού χαμηλού, ΒΑ Ειρηνικός λόγω του χαμηλού των Αλεουτίων νήσων, ζώνη των μόνιμων καταιγίδων στις 45° - 50° του νοτίου ημισφαιρίου)
  - περιοχές επιφανειακής σύγκλισης όπως η ενδοπτροπική ζώνη σύγκλισης (ITCZ)
- **Περιοχές ελάχιστης νέφωσης:**
  - περιοχές επικράτησης υψηλών πιέσεων (αντικυκλώνων) με καθοδικές κινήσεις και επιφανειακή απόκλιση (έρημοι

Αφρικής, Σαουδική Αραβία, Νότια Αφρική, τμήματα της Αυστραλίας, Χιλής και Περού)





Πηγή: <http://denali.gsfc.nasa.gov/sla/sla02/clouds/19972220300.gif>

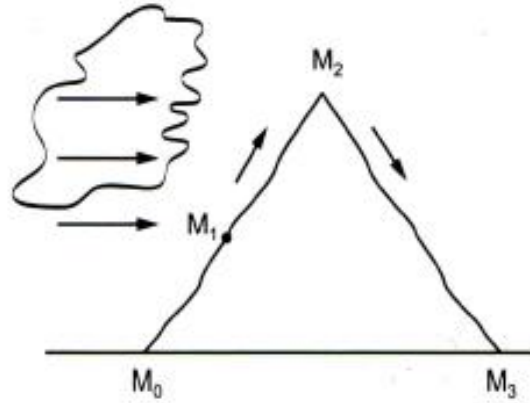
- **Στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος:** η νέφωση είναι μεγαλύτερη πάνω από τους ωκεανούς απ' ό τι πάνω από τις ηπείρους
- **Στις παράκτιες περιοχές:** η νέφωση είναι μεγαλύτερη όταν ο άνεμος πνέει από τον ωκεανό προς το εσωτερικό των ηπείρων, ενώ είναι ελάχιστη όταν ο άνεμος πνέει από την ξηρά προς τον ωκεανό

## Ασκήσεις

1. Στην ισοβαρική στάθμη των 950hPa η αναλογία μείγματος είναι 4gr/kg και η θερμοκρασία 10° C. Υπολογίστε την ειδική, τη σχετική και την απόλυτη υγρασία. Δίνεται η τάση κορεσμένων ατμών ίση με 12hPa.
2. Βρείτε τη σχέση που συνδέει τη θερμοκρασία δρόσου με τη σχετική υγρασία.
3. Σε ένα τόπο η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς είναι 5%. Αν η σχετική υγρασία είναι 65%, υπολογίστε την αναλογία μείγματος, την τάση και τη μέγιστη τάση υδρατμών αν η πίεση είναι 1010hPa.
4. Αν η θερμοκρασία είναι 30° C, πόση πρέπει να είναι η θερμοκρασία δρόσου ώστε η σχετική υγρασία να είναι 90%. Αν η θερμοκρασία δρόσου μειωθεί στους 20° C, πόση θα είναι τότε η σχετική υγρασία; Σε ποια θερμοκρασία έχει μια θερμοκρασία δρόσου 20° C ως αποτέλεσμα 90% σχετική υγρασία.

5. Υγρός αέρα ρέει αδιαβατικά κατά μήκος οροσειράς, όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί  $M_0$  και  $M_3$  μετρούν ίσες ατμοσφαιρικές πιέσεις 100kPa, ενώ ο μετεωρολογικός σταθμός  $M_2$  μετρά 70 kPa. Η θερμοκρασία του αέρα στο σταθμό  $M_0$  είναι 20° C. Καθώς ο αέρας ανεβαίνει αρχίζει να σχηματίζεται ένα σύννεφο σε ύψος πίεσης 84,5kPa. Υποθέστε ότι η ποσότητα του υγρού αέρα που ανεβαίνει το βουνό μάζας 2000kg για κάθε  $m^2$ . Αυτός ο υγρός αέρας φτάνει στην κορυφή του βουνού (σταθμός  $M_2$ ) μετά από βροχή 1500s. Κατά τη διάρκεια της ανάβασης, ένα ποσό 2μ45g νερού ανά kg αέρα πέφτει σε μορφή βροχής.

- α) Προσδιορίστε τη θερμοκρασία  $T_1$  στο  $M_1$  όπου σχηματίζεται η βάση του σύννεφου
- β) Ποιο το ύψος  $h_1$  (στο  $M_1$ ) πάνω από τον σταθμό  $M_0$  της βάσης του σύννεφου, με γραμμική ελάττωση της ατμοσφαιρικής πυκνότητας;
- γ) Τι θερμοκρασία  $T_2$  μετράτε στην κορυφή της οροσειράς;
- δ) Προσδιορίστε το ύψος της στήλης του νερού (επίπεδο πτώσης νερού) που πέφτει με μορφή βροχής από το ρεύμα του αέρα μέσα σε 3 ώρες, με ομογενή πτώση βροχής μεταξύ των σημείων  $M_1$  και  $M_2$ ;
- ε) τι θερμοκρασία  $T_1$  μετράτε στο πίσω μέρος της οροσειράς στον σταθμός  $M_3$ ;
- στ) Σχολιάστε την κατάσταση της ατμόσφαιρας στον σταθμό  $M_3$ , σε σχέση με αυτή στον σταθμό  $M_0$ ;



Thanks for your attention!

Prof. Mic.Gr.Vrachopoulos

**Τέλος κεφαλαίου**



HELLENIC REPUBLIC  
**National and Kapodistrian  
University of Athens**

EST. 1837



## Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση:

Andrews G. David (2010). *An Introduction to Atmospheric Physics*. Second Edition. Cambridge University Press.

Ahrens C. Donald (2001). *Essentials of Meteorology. An invitation to the Atmosphere*. Third Edition, Thomson Brooks/Cole.

Lawrence Marc G. (2005). *The relationship between Relative Humidity and Dew point Temperature in Moist Air*. BAMS, 225–233.

Munson Bruce R., Donald F. Young, Theodore R. Okiishi (2006). *Fundamentals of Fluid Dynamics*. Fifth Edition. John Wiley and Sons.

### Ελληνική:

Κατσούλης Β.Δ. (2000). *Μαθήματα Μετεωρολογίας*. Σημειώσεις που διδάσκονται στους φοιτητές του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Κατσούλης Β.Δ., Ν. Χατζηαναστασίου (2007). *Φυσική της Ατμόσφαιρας*. Σημειώσεις που διδάσκονται στους φοιτητές του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

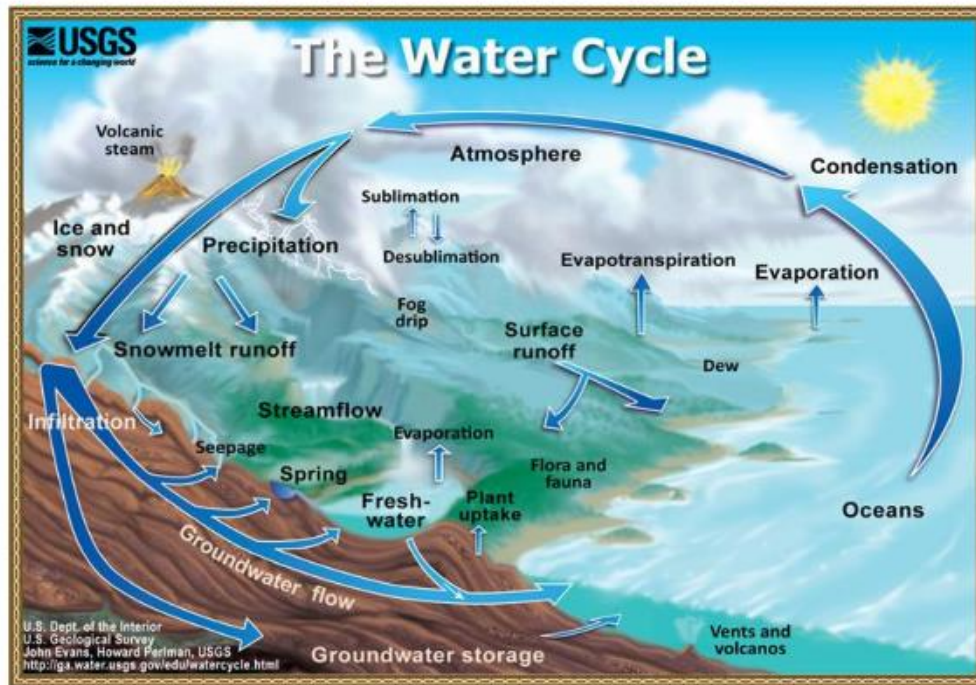
Κατσούλης Β.Δ., Π. Κασσωμένος (2006). *Φυσική Περιβάλλοντος*. Σημειώσεις που διδάσκονται στους φοιτητές του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Σαχσαμάνογλου Χ.Σ., Τ.Ι. Μακρογιάννης (1998). *Γενική Μετεωρολογία*, Εκδόσεις Ζήτη.

Φλόκας Α., (1994). *Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*, Εκδόσεις Ζήτη.

# Το νερό στην ατμόσφαιρα

**Υγρασία του αέρα:** αποτελεί ένα μέτρο της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε υδατμούς. Δείχνει την ποσότητα των υδατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα



- Η ατμόσφαιρα, κυρίως στο κατώτερο τμήμα της, περιέχει πάντα μια μεταβλητή ποσότητα νερού
- Το νερό αυτό υπάρχει:
  1. **αέρια** κατάσταση (υδατμοί)
  2. **υγρή** (νέφη, υδροσταγόνες, βροχή, ομίχλη, ...)
  3. **στερεή** (παγοκρύσταλλοι, χαλάζι, χιόνι, ...)



# Υγρασία

**Υγρασία του αέρα:** αποτελεί ένα μέτρο της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς. Δείχνει την ποσότητα των υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα

Οι υδρατμοί περιέχονται σχεδόν στο σύνολο τους στην τροπόσφαιρα και κυρίως στα στρώματα κάτω των 6.5 km

Η ατμόσφαιρα περιέχει πάντα υδρατμούς η ποσότητα των οποίων μεταβάλλεται τόσο με τον χρόνο όσο και με τον χώρο

Σε μερικές περιοχές βρίσκονται σε εξαιρετικά χαμηλό ποσοστό (σχεδόν απόντες) & σε άλλες αποτελούν μέχρι και το **4%** κατ' όγκο της ατμόσφαιρας

- Η ποσότητα του νερού στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από **2** κυρίως **παράγοντες**:
  1. Οι υδρατμοί εισέρχονται στην ατμόσφαιρα κυρίως μέσω της **εξάτμισης** από τις υδάτινες επιφάνειες και δευτερευόντως μέσω **εξατμισοδιαπνοής** από το έδαφος και τα φυτά,
  2. Τα **ατμοσφαιρικά υδατώδη κατακρημνίσματα** δηλ. τον **υετό** (βροχή, χιόνι, χαλάζι, ...) με τα οποία το νερό απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα και επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης

- Ο ατμοσφαιρικός αέρας, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας του, μπορεί να συγκρατήσει ορισμένη ποσότητα υδρατμών, η οποία αν ξεπεραστεί, οι επιπλέον υδρατμοί **συμπυκνώνονται**
- Η οριακή αυτή ποσότητα των υδρατμών σε δοσμένη θερμοκρασία είναι ορισμένη & εξαρτάται μόνο από την τιμή της θερμοκρασίας
- Σε περίπτωση που ο αέρας περιέχει μια τέτοια οριακή ποσότητα υδρατμών καλείται **κορεσμένος** διαφορετικά καλείται **ακόρεστος**
- Οι υδρατμοί παίζουν σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό & υδρολογικό ισοζύγιο του πλανήτη & στη δημιουργία των καιρικών φαινομένων της ατμόσφαιρας

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{e_s L_u}{R_u T^2}$$



### Εξίσωση **Clausius-Clapeyron**

Όπου:

- $L_u$  = λανθάνουσα θερμότητα
- $R_u$  = ειδική σταθερά των υδρατμών
- $T$  = η θερμοκρασία του αέρα σε Κ

## Υγρασία - Εξάτμιση (evaporation)

- **Εξάτμιση:** η μετατροπή ή μετάβαση του νερού από την υγρή στην αέρια φάση
  - Η εξάτμιση μετριέται με το **ισοδύναμο ύψος** νερού σε **mm**
  - Η εξάτμιση του νερού στην ατμόσφαιρα γίνεται κυρίως από τις **υδάτινες επιφάνειες** (ωκεανοί, λίμνες, ποταμοί) και δευτερευόντως από: **έδαφος, φύλλωμα βλάστησης**, από την **επιφάνεια** του **χιονιού** και των **πάγων** (**εξάχνωση**)
  - Κατά την εξάτμιση τα μόρια από την επιφάνεια του νερού διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα
    - όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του νερού τόσο μεγαλύτερη ενέργεια έχουν τα μόρια του νερού, με τόσο μεγαλύτερη ταχύτητα κινούνται & συνεπώς τόσο περισσότερα μόρια έχουν τη δυνατότητα να διαφύγουν από αυτό προς την ελεύθερη ατμόσφαιρα
    - Τα μόρια του νερού που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα με αυτόν τον τρόπο έχουν αποθηκευμένη ενέργεια με τη μορφή κινητικής ενέργειας η οποία ονομάζεται **λανθάνουσα θερμότητα** εξάτμισης (LE)
    - Επειδή η θερμότητα του νερού μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα στους υδρατμούς, το νερό που παραμένει σε υγρή μορφή ψύχεται (**evaporative cooling**)

- **Εξάτμιση:** περιγράφεται από τον γενικό νόμο της εξάτμισης του **Dalton**

$$E = \frac{A \cdot S \cdot (e_s - e)}{P}$$

**E** = ποσότητα εξάτμισης ή ταχύτητα εξάτμισης (mm ή cm / sec ή min ή ...)

**A** = συντελεστής που εξαρτάται από την φύση του υγρού, την ταχύτητα απαγωγής υδρατμών (π.χ. ταχύτητα ανέμου)

**e<sub>s</sub> - e** = παράγοντας εξάτμισης ή έλλειμμα κόρου (κοροπλήρωμα)

**e** = η τάση των υδρατμών του ατμοσφαιρικού αέρα

**e<sub>s</sub>** = μέγιστη τάση των υδρατμών στη θερμοκρασία της υγρής επιφάνειας

**P** = η ατμοσφαιρική πίεση

**S** = η επιφάνεια του υγρού (συνήθως τη θεωρούμε μοναδιαία)



## ▪ Παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση

### ✓ Θερμοκρασία (του νερού & αέρα)

○ Η ένταση της εξάτμισης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας τόσο του νερού όσο και του αέρα

### ✓ Υπάρχουσα ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα (υγρασία)

○ Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα τόσο περισσότερο μειώνεται η ένταση της εξάτμισης

### ✓ Κίνηση του αέρα (άνεμος & αναταρακτικές κινήσεις)

○ Η κίνηση του αέρα όμως πάνω από την επιφάνεια του νερού αυξάνει την απαγωγή και τη διάχυση των δημιουργούμενων υδρατμών κατά την εξάτμιση με αποτέλεσμα να αυξάνεται η εξάτμιση για την αναπλήρωση αυτών

▪ **Ημερήσια & Ετήσια μεταβολή της Εξάτμισης:** ακολουθεί την αντίστοιχη ημερήσια & ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας

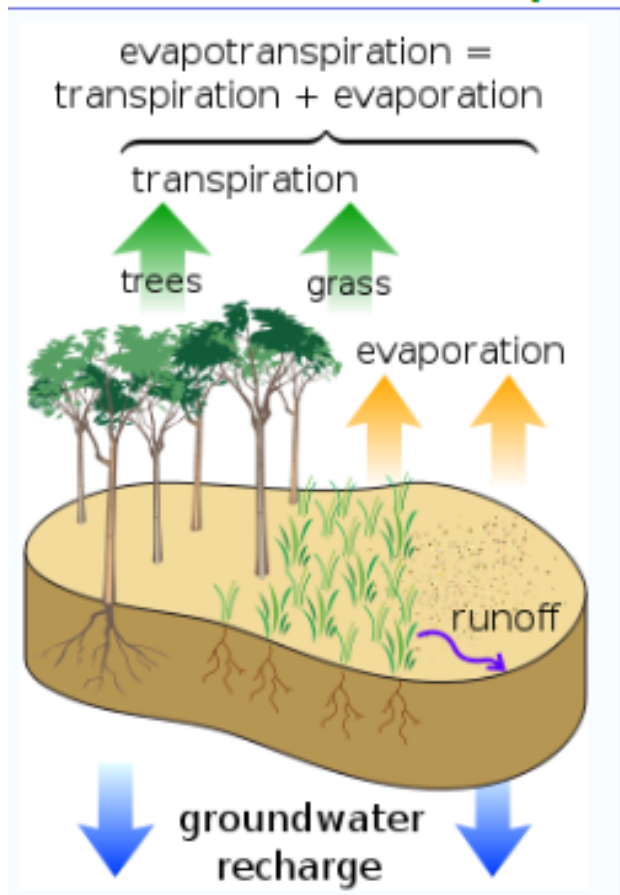
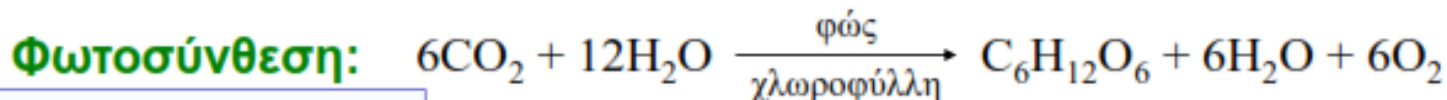
## ▪ Γεωγραφική κατανομή της εξάτμισης

- Οι περιοχές 30° βόρεια και νότια του ισημερινού εμφανίζουν σαφώς μεγαλύτερη εξάτμιση από τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη
- Οι **μεγαλύτεροι ρυθμοί εξάτμισης** παρατηρούνται στις υποτροπικές ωκεάνιες περιοχές κατά το χειμώνα όταν ψυχρές & ξηρές ηπειρωτικές αέριες μάζες πνέουν πάνω από τα θερμά ωκεάνια ρεύματα όπως του κόλπου και το Kuroshio. Πάνω από περιοχές με ισχυρούς ανέμους στην επιφάνεια και πάνω από περιοχές των τυφώνων & κυκλώνων λόγω των μεγάλων ταχυτήτων ανέμου που αναπτύσσονται
- Οι **μικροί ρυθμοί εξάτμισης** κατά μήκος του Ισημερινού οφείλονται στην παρουσία ψυχρών ωκεάνιων ρευμάτων και φαινομένων ανάδυσης (upwelling), στους ασθενείς ανέμους που επικρατούν σε ορισμένες περιοχές και στην παρουσία νεφών μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης (deep convective) που εμποδίζουν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια
- Γενικά, η εξάτμιση μειώνεται από τα μικρά γεωγραφικά πλάτη προς τα μεγάλα



# Υγρασία - Εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration)

- **Εξατμισοδιαπνοή:** η ατμόσφαιρα, εκτός της διαδικασίας της εξάτμισης, εμπλουτίζεται με υδατμούς και από τα φυτά, με τη διαδικασία της **διαπνοής (transpiration)**

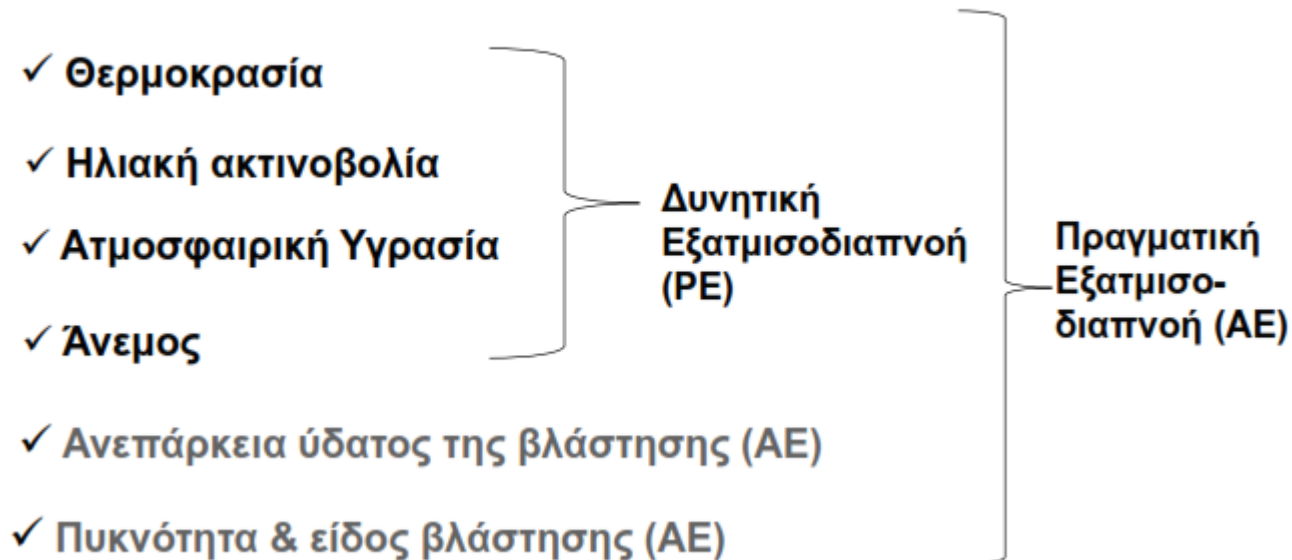


- Η διαπνοή ελέγχεται, ως προς το ρυθμό της, από τα κύτταρα των φυτών μέσω της ρύθμισης των ανοιγμάτων των στομάτων των φύλλων
- Ο συνδυασμός των διεργασιών της εξάτμισης & της διαπνοής καλείται **Πραγματική εξατμισοδιαπνοή (ΑΕ)** & εκφράζει τη διεργασία της μεταφοράς των υδατμών στην ατμόσφαιρα από μια επιφάνεια που καλύπτεται από βλάστηση
- Η εξατμισοδιαπνοή από εδαφικές επιφάνειες εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα του εδάφους σε νερό, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο για την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες όπου αυτή θεωρείται δεδομένη

## ➤ Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PE)

- Η απώλεια νερού από εδαφικές επιφάνειες πλήρως & ομοιόμορφα καλυμμένες από αναπτυσσόμενη βλάστηση, κάτω από συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού στο έδαφος (σε αντιστοιχία με την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες)
- Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή παριστάνει στην ουσία τις απαιτήσεις ενός τόπου για εξατμισοδιαπνοή με βάση τα χαρακτηριστικά του & αν πληρούνταν οι όροι του ορισμού της
- Αποτελεί έναν δείκτη της διαθέσιμης ενέργειας για την εξάτμιση του νερού & του διαθέσιμου ανέμου να μεταφερθούν οι υδρατμοί από το έδαφος στην κατώτερη ατμόσφαιρα
- Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή ισούται με την πραγματική όταν υπάρχει αφθονία νερού
- Για τον καθορισμό της τιμής της **PE** απαιτούνται δεδομένα θερμοκρασίας, βλάστησης, χαρακτηριστικών εδάφους & η τιμή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής
- Για περιοχές που η τιμή της **βροχόπτωσης** > της τιμής της **PE** => πλεόνασμα νερού συσσωρεύεται στο έδαφος
- Όταν **PE** > **βροχόπτωσης** => τότε δεν υπάρχει νερό διαθέσιμο για αποθήκευση στο έδαφος & στα φυτά, με αποτέλεσμα να ξηραίνονται

## ➤ Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή



### ▪ Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας εξατμισοδιαπνοής πάνω από την ξηρά

Μέση τιμή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο 2000-2006 βάσει δεδομένων MODIS

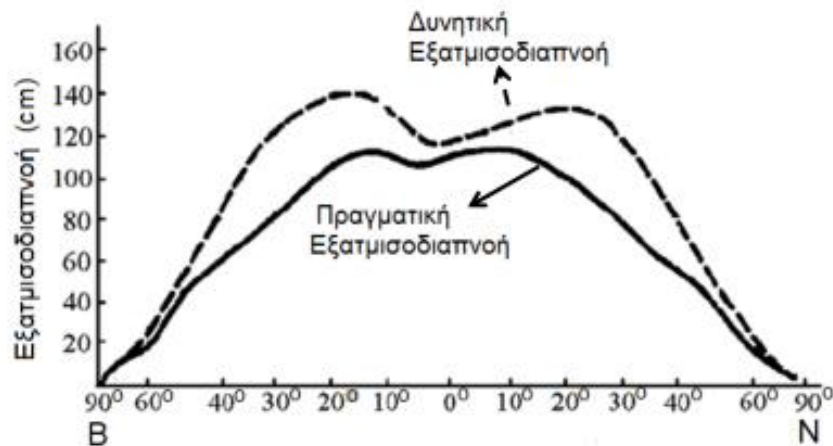
- Μειώνεται από τις τροπικές περιοχές προς τους πόλους
- δεδομένης της εξάρτησης της από τη διαθέσιμη ποσότητα ύδατος, παρουσιάζει ελάχιστες τιμές πάνω από τη ερήμους
- Οι μέγιστες τιμές σημειώνονται στις τροπικές περιοχές λόγω του μεγάλου ύψους βροχόπτωσης, της υψηλής θερμοκρασίας και των πυκνών τροπικών δασών

### ▪ Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας εξατμισοδιαπνοής πάνω από την ξηρά

Εποχική κατανομή της πραγματική εξατμισοδιαπνοής πάνω από τη ξηρά για την περίοδο 2000-2006 βάσει δεδομένων MODIS

## ■ Γεωγραφική κατανομή της εξατμισοδιαπνοής

Κατανομή με το γεωγραφικό πλάτος της μέσης πραγματικής και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής



Πηγή: adapted from A.A. Φλόκας, Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 1997

- Οι μέγιστες τιμές της εξατμισοδιαπνοής σημειώνονται στις υποτροπικές περιοχές (20° – 30°) Βόρεια και Νότια του Ισημερινού
- Οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής είναι μεγαλύτερες πάνω από τις ωκεάνιες περιοχές σε σχέση με την ξηρά
- Γεωγραφική κατανομή της μέσης τιμής της Δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PE)
  - Σαφής βαθμίδα μείωσης των τιμών της PE με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους
  - Διάφορες ανωμαλίες οφείλονται στην παρουσία των ορεινών όγκων (π.χ. Ιμαλάια)



## Γεωγραφική διανομή της μέσης Πραγματικής & Δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στον Ευρωπαϊκό χώρο

- Η Δυνητική εξατμισοδιαπνοή υποθέτει συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού στο έδαφος εμφανίζει βαθμίδα βαίνοντας μειούμενη από τα μικρά προς τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη

### Υγρασία

- Η υγρασία της ατμόσφαιρας μετράται μέσω διαφόρων μεταβλητών οι σπουδαιότερες εκ των οποίων είναι:

- ✓ Απόλυτη υγρασία
- ✓ Θερμοκρασία δρόσου
- ✓ Τάση υδρατμών
- ✓ Σχετική υγρασία
- ✓ Ειδική υγρασία
- ✓ Αναλογία μίγματος

- **Υγρός αέρας:** καλείται ο αέρας που περιέχει υδρατμούς
- **Ξηρός αέρας:** καλείται ο αέρας που θεωρητικά δεν περιέχει υδρατμούς

- **ισχύει:**  $m = m_v + m_a$

$m_v$  = η μάζα των υδρατμών

$m_a$  = η μάζα του ξηρού αέρα

$m$  = η συνολική μάζα του υγρού αέρα

## Υγρασία - Κορεσμένη αέρια μάζα

Ρυθμός εξάτμισης  
=  
Ρυθμό συμπύκνωσης

- Μία δεδομένη μάζα αέρα για μια ορισμένη τιμή της θερμοκρασίας μπορεί να περιέχει μέχρι ένα ορισμένο ποσό μάζας υδρατμών πριν να αρχίζει με την προσθήκη επιπλέον υδρατμών, να συμπυκνώνεται σε σταγόνες. Το όριο αυτό εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα (αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ή μειώνεται η πίεση του αέρα) ονομάζεται **σημείο κόρου ή δρόσου** και το φαινόμενο **κορεσμός**. Για παράδειγμα, αυτό το φαινόμενο συμβαίνει όταν συμπυκνώνονται υδρατμοί στον καθρέπτη του μπάνιου όταν τρέξει ζεστό νερό από το ντους
- Μία αέρια μάζα μπορεί να φτάσει στο σημείο δρόσου με δύο τρόπους:
  - Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία να τροφοδοτείται συνεχώς με υδρατμούς
  - Διατηρώντας σταθερή την ποσότητα των υδρατμών και την πίεση και μειώνοντας τη θερμοκρασία. Το ποσό των υδρατμών που μια αέρια μάζα μπορεί να συγκρατήσει μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας

## Υγρασία - Τάση υδρατμών (vapor pressure)

**Τάση υδρατμών ( $e$ ):** είναι η πίεση που ασκούν οι υδρατμοί όντας αέριο

- Είναι η συνεισφορά των υδρατμών στην ολική ατμοσφαιρική πίεση
- Κυμαίνεται μεταξύ 5 και 30 hPa στην επιφάνεια της θάλασσας
- Εξαρτάται από την ποσότητα των υδρατμών ( $m_v$ ) και την ατμοσφαιρική πίεση ( $P$ )

**Μέγιστη τάση υδρατμών ( $e_s$ ):** είναι η τάση των υδρατμών στο σημείο δρόσου δηλ. στην κατάσταση κορεσμού όπου η τάση των υδρατμών είναι μέγιστη

- Εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και αυξάνεται με αυτή δηλ. όσο πιο θερμός είναι ο αέρας τόσο μεγαλύτερη ποσότητα υδρατμών μπορεί να συγκρατήσει

**Μονάδες:** mbars (hPa), mmHg

- Υπολογίζεται από την εξίσωση Clausius - Clapeyron

$$e_s = e_{so} \cdot \exp\left[\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

Όπου:  $L_v$  = η λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης του νερού = 600 cal/g

$R_v$  = η ειδική σταθερά των υδρατμών = R/MBu



... την εμπειρική σχέση **Magnus – Tetens**:

$$e_s = e_{s0} \cdot 10^{\frac{\alpha \cdot T}{\beta + T}}$$

Όπου:

$$e_{s0} = 6.11 \text{ hPa}$$

$T$  = η θερμοκρασία του αέρα σε °C

$\alpha = 7.5$  και  $\beta = 237.3$  °C πάνω από νερό

$\alpha = 9.7$  και  $\beta = 265.5$  °C πάνω από πάγο

- Για τον προσδιορισμό της  $e_s$  απαιτείται μόνο μία παράμετρος, η θερμοκρασία  $T$
- **Τάση υδρατμών (e)** υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e = e_s(T_w) - \frac{C_{pa}}{0.622L_u} (T - T_w) \cdot P$$

- $T$  = η θερμοκρασία του αέρα (θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου) σε °C
  - $T_w$  = η θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου σε °C
  - $e_s(T_w)$  = η μέγιστη τάση των υδρατμών στη θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου
  - $C_{pa}$  = η ειδική θερμότητα του ξηρού αέρα σε σταθερή πίεση
  - $P$  = η ατμοσφαιρική πίεση
- Για τον προσδιορισμό της  $e$  απαιτείται , η γνώση της θερμοκρασίας  $T$  & της πίεσης  $P$
  - Η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου  $T_w$  προσδιορίζεται από τα ψυχρόμετρα



## Υγρασία - Θερμοκρασία Δρόσου (Dew point)

**Θερμοκρασία Δρόσου ( $T_d$ ):** είναι η θερμοκρασία στην οποία θα πρέπει να ψυχθεί ο αέρας υπό σταθερή ατμοσφαιρική πίεση, ώστε να καταστεί κορεσμένος χωρίς την προσθήκη άλλων υδρατμών

**Μεγάλη τιμή της  $T_d \Rightarrow$  μεγάλη υγρασία και αντίστροφα**

Επειδή η πίεση στην επιφάνεια της Γης δεν μεταβάλλεται σημαντικά, η θερμοκρασία δρόσου αποτελεί έναν καλό δείκτη της υγρασίας στην ατμόσφαιρα

- **Πολύ καλή ένδειξη υγρασίας (σχετικής) η διαφορά θερμοκρασίας =  $T - T_d$** 
  - $T$  θερμοκρασία αέρα
  - $T_d$  θερμοκρασία δρόσου
- ✓ Δείχνει την απόσταση από το σημείο δρόσου
- ✓ Όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά  $T - T_d$  τόσο πιο μακριά βρίσκεται η ατμόσφαιρα από το σημείο δρόσου (από την κατάσταση κορεσμού)
- Σημαντική μετεωρολογική παράμετρος στην πρόγνωση: Δρόσου, πάχνης, παγετού και ομίχλης

- Δεδομένου ότι η ποσότητα των υδρατμών δε μεταβάλλεται, η τάση των υδρατμών  $e_{(T)}$  στη θερμοκρασία  $T$  θα είναι ίδια με την τάση των υδρατμών  $e_{(T_d)}$  στη θερμοκρασία δρόσου  $T_d$ 

$$e_{(T)} = e_{(T_d)}$$

- Όμως στη θερμοκρασία δρόσου ο αέρας καθίσταται κορεσμένος, οπότε

$$e_{(T_d)} = e_{s(T_d)} \Rightarrow e_{(T)} = e_{s(T_d)}$$

- Από τη σχέση **Magnus – Tetens** έχουμε:

$$e_{(T)} = e_{s(T_d)} = e_{so} \cdot 10^{\frac{\alpha \cdot T_d}{\beta + T_d}}$$

$$e_{so} = 6.1 \text{ hPa}$$

$$\Rightarrow T_d = \frac{237.3 \cdot (\log e_{(T)} - \log 6.1)}{7.5 - (\log e_{(T)} - \log 6.1)}$$

- **Θερμοκρασία Δρόσου (Td):** σημαντική μετεωρολογική παράμετρος στην πρόγνωση Δρόσου, πάχνης, παγετού και ομίχλης

## Υγρασία - Απόλυτη Υγρασία

- **Απόλυτη υγρασία ( $\rho$ ):** είναι η μάζα των υδρατμών ( $m_v$ ) που περιέχεται σε όγκο αέρα ( $V$ ), πάνω από μια περιοχή σε μια δεδομένη στιγμή  
Δηλαδή πρόκειται για την πυκνότητα των υδρατμών

$$\rho = \frac{m_v}{V}$$

**Μονάδες:** g / m<sup>3</sup>

- Εξαρτάται από την Θερμοκρασία και την Πίεση η οποία επηρεάζει τον όγκο
- Αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί την εξάτμιση και επομένως αυξάνει και η απόλυτη υγρασία



Λόγω της εξάρτησης από τη θερμοκρασία, η απόλυτη υγρασία μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία εμφανίζοντας την ίδια ετήσια κύμανση με **μέγιστες τιμές το καλοκαίρι** και **ελάχιστες τον χειμώνα**

- Σε συνηθισμένες μετεωρολογικές συνθήκες, στην επιφάνεια της θάλασσας ισχύει:

$$\rho \approx e \quad \text{όταν μετρώνται σε } \mathbf{g / cm^3} \text{ \& } \mathbf{mmHg} \text{ αντίστοιχα}$$

- Εξαιτίας της εξάρτησής της από τον όγκο και τη θερμοκρασία είναι μια **μη διατηρητική παράμετρος** και επομένως δεν είναι τόσο χρήσιμη στη μετεωρολογία

- Για κάθε τιμή της θερμοκρασίας  $T$  υπάρχει μία μέγιστη τιμή της απόλυτης υγρασίας  $\rho_s$
- Επιτρέπει τον προσδιορισμό της ποσότητας των υδρατμών που συμπυκνώνεται όταν ο αέρας ψυχθεί από μια ορισμένη θερμοκρασία σε μια άλλη



## Υγρασία - Αναλογία Μίγματος (mixing ratio)

- **Αναλογία μίγματος (r):** ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υδρατμών ( $m_v$ ) που περιέχονται σ' ένα δείγμα υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα ( $m_a$ ) που περιέχεται στο δείγμα

**Μονάδες:** g υδρατμών / g ξηρού αέρα  
g υδρατμών / Kg ξηρού αέρα

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{ή} \quad r = \frac{\rho_v}{\rho_a}$$

- Γενικά η αναλογία μίγματος r στην ατμόσφαιρα παίρνει πολύ μικρές τιμές, **μικρότερες από 0.04 g / g (ή < 40 g / Kg)**

- Αποδεικνύεται ότι:

$$r = 0.622 \frac{e}{P - e}$$

& για την κατάσταση κορεσμού

$$r_s = 0.622 \frac{e_s}{P - e_s}$$

- Επειδή η τάση των υδρατμών είναι πολύ μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης ( $e \ll P$  και  $e_s \ll P$ ) μπορεί να γραφτεί:

$$r = 0.622 \frac{e}{P}$$

&

$$r_s = 0.622 \frac{e_s}{P}$$

## Υγρασία - Ειδική Υγρασία (specific Humidity)

- **Ειδική Υγρασία ( $q$ ):** ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υδρατμών ( $m_v$ ) προς τη συνολική μάζα του υγρού αέρα ( $m = m_v + m_a$ )

**Μονάδες:** g υδρατμών / g αέρα  
g υδρατμών / Kg αέρα

$$q = \frac{m_v}{m} = \frac{m_v}{m_a + m_v}$$

- Διαιρώντας με  $m_v$  αποδεικνύεται ότι:

$$q = \frac{r}{1+r}$$

& για την κατάσταση κορεσμού

$$q_s = \frac{r_s}{1+r_s}$$

- Επειδή:

$$r = 0.622 \frac{e}{P-e}$$

$\Rightarrow$

$$r = 0.622 \frac{e}{P-0.378 \cdot e}$$

δηλ.  $r = f(e)$

- Επειδή ισχύει  $e \ll P$  και  $e_s \ll P$  αποδεικνύεται:

$$q = 0.622 \frac{e}{P} \Rightarrow q = r$$

&

$$q_s = 0.622 \frac{e_s}{P} \Rightarrow q_s = r_s$$

## Υγρασία - Σχετική υγρασία (Relative Humidity)

**Σχετική υγρασία (%RH):** είναι ο λόγος (επί τοις εκατό, %) της μάζας των υδρατμών ( $m_v$ ) που περιέχεται σε ένα δεδομένο όγκο αέρα προς τη μάζα που θα έπρεπε να περιέχει ο ίδιος όγκος αέρα ώστε να είναι κορεσμένος ( $m_{vs}$ ) δηλ. τη μέγιστη μάζα των υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει

ή ο λόγος της πραγματικής ( $e$ ) προς τη μέγιστη τάση των υδρατμών ( $e_s$ ) στην ίδια θερμοκρασία

Εκφράζεται επί τοις εκατό (%)

$$RH = \frac{m_v}{m_{vs}} = \frac{e}{e_s} = \frac{r}{r_s} = \frac{q}{q_s}$$

**Εκφράζει πόσο η ατμόσφαιρα απέχει από το σημείο κόρου (κορεσμό)**

- Σημαντική παράμετρος από βιολογικής πλευράς. Η ευφορία ή δυσφορία των οργανισμών εξαρτάται περισσότερο από τη σχετική παρά από την απόλυτη υγρασία

**RH ~ 100% ⇒ ατμόσφαιρα κορεσμένη σε υδρατμούς (βροχή ή ομίχλη)**

- Επιλύοντας τη σχέση που εκφράζει την αναλογία μίγματος  $r$  συναρτήσει της τάσης των υδρατμών  $e$  ως προς  $e$ , έχουμε:

$$r = 0.622 \frac{e}{P - e} \Rightarrow e = p \cdot \frac{r}{0.622 + r}$$

- Επομένως, η τάση των υδρατμών μεταβάλλεται συναρτήσει της πίεσης  $p$  και της ποσότητας των υδρατμών  $r$  και ανεξάρτητα της θερμοκρασίας  $T$  δηλ.  **$e = f(p, r)$**
- Από την άλλη η μέγιστη τάση των υδρατμών  $e_s$  είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας  $T$  δηλ.  **$e_s = f(T)$**

- Άρα, για σταθερή πίεση ( **$p = ct$** ), έχουμε:  $RH = \frac{e}{e_s} = \frac{f(r)}{f(T)} \Rightarrow$

$\Rightarrow$  Για σταθερή πίεση ( **$p = ct$** ) η σχετική υγρασία ( **$RH$** ) είναι **ανάλογη** της **ποσότητας των υδρατμών** ( $r$ ) και **αντιστρόφως ανάλογη** της **θερμοκρασίας** ( $T$ )

$\Rightarrow$  Η σχετική υγρασία ( **$RH$** ) μιας μάζας αέρα, όταν η πίεση είναι σταθερή ( **$p = ct$** ), αυξάνει όταν:

1. με την **προσθήκη υδρατμών** (π.χ. μέσω εξάτμισης) όταν η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή
2. **μειώνοντας τη θερμοκρασία**  $T$  όταν η ποσότητα των υδρατμών του δείγματος διατηρείται σταθερή



## Υγρασία - Άλλες παράμετροι

- **Έλλειμμα κόρρου ή κορροπλήρωμα (SD):** ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της τάσης των υδρατμών ( $e$ ) του ατμοσφαιρικού αέρα και της μέγιστης τάσης των υδρατμών ( $e_s$ ) στην ίδια θερμοκρασία

$$SD = e_s - e$$

- **Υετίσιμο ύδωρ ( $P_w$ , precipitable water):** ορίζεται ως το σύνολο των υδρατμών που περιέχονται σε μία κατακόρυφη στήλη ατμοσφαιρικού αέρα μοναδιαίας διατομής η οποία εκτείνεται μεταξύ δύο επιπέδων

Για το σύνολο (ολικό ύψος) της ατμόσφαιρας υπολογίζεται το **συνολικό υετίσιμο ύδωρ**

- Το υετίσιμο ύδωρ εκφράζεται συνήθως από το ύψος του ναρού που θα συλλεγόταν δε δοχείο ίδιας διατομής με τη θεωρούμενη στήλη αν όλοι οι υπεράνω υδρατμοί συμπυκνώνονταν και έπεφταν σαν βροχή

- Αποδεικνύεται ότι: 
$$P_w = 0.01 \int_{P_1}^{P_2} q \cdot dP \quad \text{σε mm}$$

όπου  $P$  σε hPa και  $q$  σε g/Kg

- **Συμπερασματικά:** όλες οι παράμετροι της υγρασίας εκφράζονται σαν συνάρτηση της τάσης των υδρατμών  $e$  και της ατμοσφαιρικής πίεσης  $P$

- Θυμίζουμε ότι: 
$$e = e_s(T_w) - \frac{C_{pa}}{0.622L_u} (T - T_w) \cdot P \quad \Rightarrow$$

- **Επομένως:** για τον υπολογισμό των παραμέτρων της υγρασίας αρκεί να μετρήσουμε την ατμοσφαιρική πίεση  $P$ , τη θερμοκρασία του αέρα  $T$ , και τη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου  $T_w$  που μετράται με τα ψυχρόμετρα

## Υγρασία - Σχετική υγρασία: ημερήσια μεταβολή

**Σχετική υγρασία (%RH) – ημερήσια μεταβολή:** δεδομένου ότι η ποσότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα μεταβάλλεται πολύ λίγο κατά τη διάρκεια του 24-ώρου, η ημερήσια πορεία της σχετικής υγρασίας εξαρτάται από την αντίστοιχη πορεία της θερμοκρασίας

Η ημερήσια πορεία της σχετικής υγρασίας είναι **αντίστροφη** της πορείας της θερμοκρασίας του αέρα

- Αντίστοιχα, η ετήσια πορεία της σχετικής υγρασίας είναι αντίστροφη της ετήσιας πορείας της θερμοκρασίας του αέρα

## Γεωγραφική διανομή της Υγρασίας

Τάση Υδρατμών & Απόλυτη υγρασία: ακολουθεί την κατανομή της θερμοκρασίας & της εξάτμισης

- ✓ **Μέγιστες τιμές:** Ισημερινές, Τροπικές περιοχές & περιοχές Μουσώνων (Ινδία)
- ✓ **Ελάχιστες τιμές:** ψυχρές περιοχές των μεγάλων γεωγραφικών πλατών & πάνω από ερήμους

■ Περισσότερους υδρατμούς πάνω από τους ωκεανούς σε σχέση με την ξηρά

### Σχετική υγρασία

- ✓ **Μέγιστες τιμές:** Ισημερινές, Τροπικές περιοχές γιατί εκεί επικρατεί μεν υψηλή θερμοκρασία αλλά η ατμόσφαιρα περιέχει μεγάλες ποσότητες υδρατμών λόγω αυξημένης εξάτμισης
- ✓ **Μέγιστες τιμές:** Πολικές περιοχές γιατί μεν εδώ η ποσότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι μικρή αλλά και η θερμοκρασία είναι χαμηλή και προσεγγίζει τη θερμοκρασία δρόσου
- ✓ **Ελάχιστες τιμές:** στα μέσα γεωγραφικά πλάτη



# Υγρασία - Μεταβολή της υγρασίας με το ύψος

$$e_z = e_o 10^{\frac{-z}{5000}}$$

- $e_o$ , τάση υδρατμών στην επιφάνεια
- $e_z$ , τάση υδρατμών σε ύψος  $z$

- Πρακτικά η ποσότητα των υδρατμών σε ύψη μεγαλύτερα των 10 km είναι ελάχιστη. Ακόμη και αν υπάρχουν έχουν μετατραπεί σε παγοκρυστάλλους λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών

## Αναφορές

- Φλόκας Α.,: Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 1997, ISBN: 960-431-288-X

ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΦΩΤΙΑΔΗ

Επίκουρος Καθηγήτρια  
του Τμήματος Διαχείρισης  
Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων

# Νέφη - Νέφωση

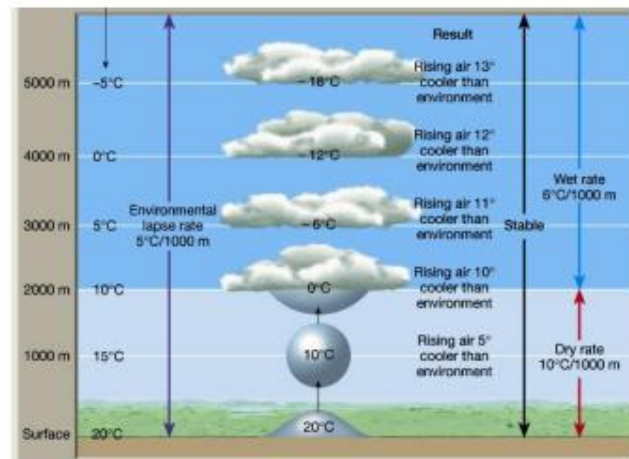
▪ **Νέφη:** αποτελούνται από Υδροσταγόνες διαφόρων μεγεθών και παγοκρυστάλλους, οι οποίοι σχηματίστηκαν σε μια αέρια μάζα λόγω συμπύκνωσης των υδρατμών, όταν η θερμοκρασία της έπεσε κάτω από τη θερμοκρασία δρόσου

Για τον σχηματισμό των νεφών απαιτούνται **2** πράγματα:

**1. Ψύξη της αέριας μάζας** ώστε η θερμοκρασία της να φτάσει ή και να πάσει κάτω από το σημείο δρόσου

**1. Πυρήνες συμπύκνωσης** οι οποίοι θα λειτουργήσουν ως η απαραίτητη επιφάνεια πάνω στην οποία θα συμπυκνωθούν οι υδρατμοί

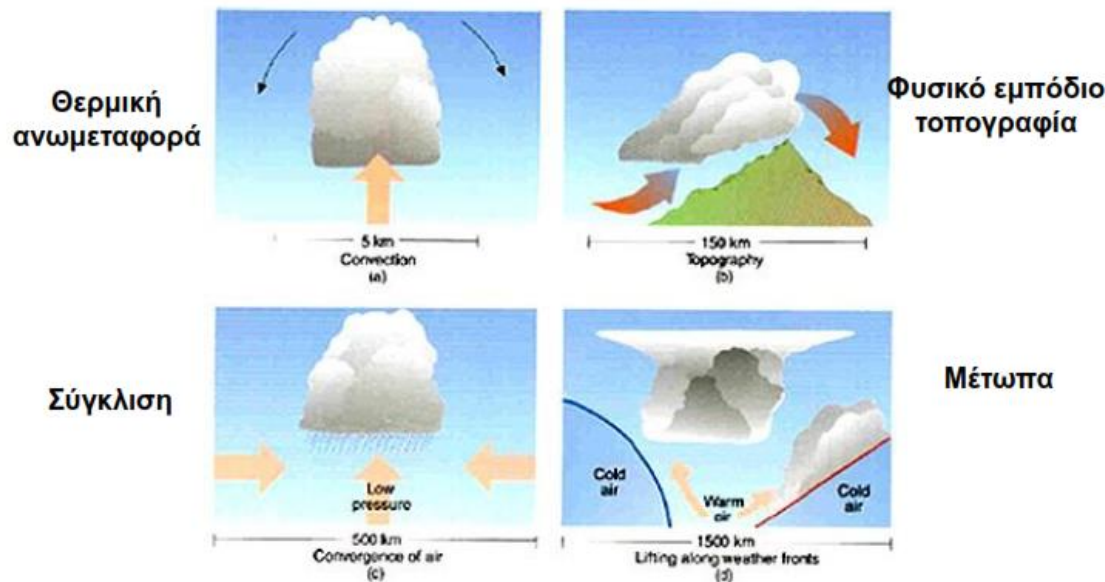
▪ Ο κυριότερος τρόπος ψύξης μιας αέριας μάζας είναι η **αδιαβατική ψύξη** η οποία συμβαίνει κατά την ανοδική κίνηση της μέσα στην ατμόσφαιρα.



▪ Η ανοδική κίνηση των αερίων μαζών οφείλεται στις εξής αιτίες οι οποίες καθορίζουν και τον τύπο του νέφους που θα σχηματιστεί:

1. **Ισχυρές αναταρακτικές κινήσεις** (τυρβώδης ροή-**turbulence** δυναμικής προέλευσης) που δημιουργούνται κυρίως λόγω της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του αέρα και του εδάφους ⇒ **νέφη αναταράξεων**
2. Στην κατακόρυφη μεταφορά του αέρα λόγω έντονης **θέρμανσης της επιφάνειας** (τυρβώδης ροή-**turbulence** θερμικής προέλευσης) ⇒ **νέφη ανοδικών ρευμάτων**
3. Στη **σύγκρουση των αερίων μαζών** πάνω σε μεγάλες **εξάρσεις (φυσικά εμπόδια)** του εδάφους (π.χ. Βουνά) ⇒ **ορογραφικά νέφη**
4. Στη διέλευση **υφέσεων ή θερμών και ψυχρών μετώπων** ⇒ **μετωπικά νέφη**

▪ Η ανοδική κίνηση των αερίων μαζών οφείλεται στις εξής αιτίες:





- **Πυρήνες συμπύκνωσης (CN):** μικρά σωματίδια αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα. Είναι περισσότερο άφθονα στην κατώτερη τροπόσφαιρα και πάνω από αστικές περιοχές. Συνήθως προέρχονται από:

- Σκόνη
- Εκρήξεις ηφαιστειών
- Ρύπους κυρίως από καμινάδες εργοστασίων
- Αιθάλη από πυρκαγιές
- Θαλάσσια άλατα
- Ενώσεις του S προερχόμενες από φυτοπλαγκτον που εισάγονται στην ατμόσφαιρα μέσω sea spray

- **Πυρήνες συμπύκνωσης:** μικρά σωματίδια αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα. Στην ατμόσφαιρα περιέχονται περίπου  $2 \times 10^{12}$  kg

Είδος σωματιδίου	Ακτίνα σωματιδίων (nm)	Αριθμός σωματιδίων ανά $\text{cm}^3$
Μικρά CN (Aitken)	< 0.2	1000-10000 (1000)
Μεγάλα CN	0.2 - 1.0	1-1000 (100)
Γίγαντες CN	> 1.0	<1 to 10 (1)
Υδροσταγόνες νεφών & ομίχλης	> 10.0	10-1000 (300)

✓ Υγροσκοπικοί (π.χ. Θαλάσσια άλατα): 'έλκουν' τα μόρια του νερού άμεσα σε RH, 100%

✓ Υγροφοβικοί (π.χ. μονωτικά υλικά)

- Διακρίνονται σε **υγροσκοπικούς** και **υγροφοβικούς**

- Χαρακτηρίζονται ανάλογα με το **ύψος της θέσης** τους στην ατμόσφαιρα και την κατακόρυφη ανάπτυξη τους, τα οποία είναι αποτέλεσμα του μηχανισμού από τον οποίο σχηματίστηκαν.

- Διακρίνονται σε:

- ✓ **Υψηλά Νέφη** [cirrus (Ci), cirrostratus (Cs), cirrocumulus (Cc)]

- ✓ **Μεσαία Νέφη** [Altostratus (As), Altocumulus (Ac)]

- ✓ **Χαμηλά Νέφη** [Stratus (St), Stratocumulus (Sc), Nimbostratus (Ns)]

- ✓ **Νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης** [Cumulus (Cu), Cumulonimbus (Cb)]



## Υψηλα Νεφη

### 1. Cirrus (Ci) Θύσανοι

- Υψηλά, λεπτά, ινώδη νέφη εμφανίζονται σε διάφορους σχηματισμούς (ίνες, φτερά, άγκιστρα, λοφία) διεσπαρμένα ακανόνιστα στον ουρανό. Οι σχηματισμοί εκτείνονται κατά τη διεύθυνση που πνέει ο άνεμος
- Αποτελούνται από παγοκρυστάλλους και είναι τα λευκότερα από όλα τα νέφη
- Συνδέονται με αίθριο καιρό
- Συχνά αποτελούν προπομπό αλλαγής του καιρού π.χ. διέλευσης μετώπου
- Ύψος βάσης τους:
  - 5 – 13 km (μέσα πλάτη)
  - 6 – 18 km (τροπικές περιοχές)
  - 3 – 8 km (πολικές περιοχές)



Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cirrus\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Cirrus_cloud)

- Όταν ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ορίζοντα (πριν την ανατολή ή μετά τη δύση) αποκτούν κοκκινωπό ή κίτρινο χρώμα



Πηγή: [http://aura.gsfc.nasa.gov/science/top10\\_cirrus.html](http://aura.gsfc.nasa.gov/science/top10_cirrus.html)

## 2. Cirrostratus (Cs) θυσανοστρώματα

■ Υψηλά, λεπτά νέφη αποτελούμενα από παγοκρυστάλλους εμφανίζονται με τη μορφή στρώματος ή πέπλου που σκεπάζει μέρος ή και ολόκληρο τον ουρανό δίνοντας του γαλακτώδη όψη. Δημιουργούν το **φαινόμενο της άλω** γύρω από τη Σελήνη ή τον Ήλιο. Υγρός καιρός φτάνει 12/24 ώρες μετά

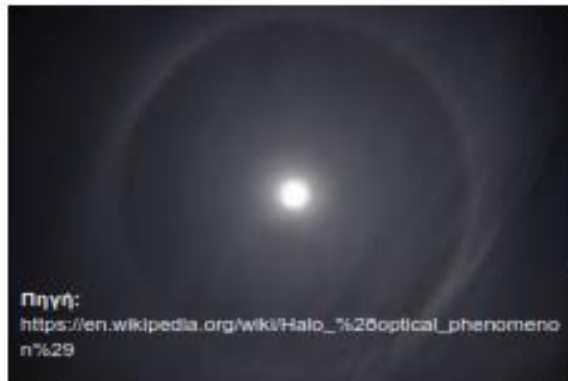
■ Ύψος βάσης τους:

5 – 13 km (μέσα πλάτη)

6 – 18 km (τροπικές περιοχές)

3 – 8 km (πολικές περιοχές)

**Φαινόμενο της Άλως**



### 3. Cirrocumulus (Cc) Θυσανοσωρείτες

▪ Υψηλά, σφαιρικά νέφη αποτελούμενα από παγοκρυστάλλους και μοιάζουν με τούφες από βαμβάκι χωρίς σκιές. Εμφανίζονται πολυάριθμα σε ομάδες ή σειρές σε κυματοειδείς σχηματισμούς

▪ Ύψος βάσης τους:

5 – 13 km (μέσα πλάτη)

6 – 18 km (τροπικές περιοχές)

3 – 8 km (πολικές περιοχές)



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cirrocumulus\\_stratiformis\\_-\\_Clouds\\_-\\_Kolkata\\_2013-11-16\\_0625.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cirrocumulus_stratiformis_-_Clouds_-_Kolkata_2013-11-16_0625.JPG)



# Νέφη - Μεσαία Νέφη

## 1. **Altostratus (As)** Υψισωρείτες

- Μεσαία νέφη αποτελούμενα κυρίως από υδροσταγόνες και παγοκρυστάλλους (όταν οι θερμοκρασία είναι αρκετά χαμηλή). Μοιάζουν με σφαίρες ή τούφες από βαμβάκι λευκού ή υποφαιού χρώματος και είναι μεγαλύτερα από αυτά των Cirrostratus
- Εμφανίζονται με τη μορφή λεπτού στρώματος στο οποίο είναι διατεταγμένα σε ομάδες ή σειρές ή ρολά.
- Ύψος βάσης τους:  
2 – 7 km (μέσα πλάτη)  
2 – 8 km (τροπικές περιοχές)  
2 – 4 km (πολικές περιοχές)



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Altostratus\\_clouds.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Altostratus_clouds.jpg)



Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Altostratus\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Altostratus_cloud)

## 2. Altostratus (As) Υψιστρώματα

■ Μεσαία νέφη φαιού χρώματος, αποτελούμενα από υδροσταγόνες και παγοκρυστάλλους. Εμφανίζονται με τη μορφή φαιού πέπλου που καλύπτει μέρος ή ολόκληρο τον ουρανό. Ανάλογα με το πόσο πυκνό είναι ο ήλιος διακρίνεται αμυδρά. Είναι βροχοφόρα νέφη και δίνουν παρατεταμένη βροχή ή χιόνι. Προηγούνται καταιγίδων

■ Ύψος βάσης τους:

2 – 7 km (μέσα πλάτη)

2 – 8 km (τροπικές περιοχές)

2 – 4 km (πολικές περιοχές)



Πηγή: <http://www.metoffice.gov.uk/learning/clouds/mid-level-clouds>



Πηγή: <http://science-edu.larc.nasa.gov/SCOOOL/linlips.html>



Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Altostratus\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Altostratus_cloud)



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clouds\\_CM2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clouds_CM2.jpg)



# Νέφη - Χαμηλά Νέφη

## 1. Stratus (St) Στρώματα

■ Χαμηλά νέφη γκριζου (φαιού) χρώματος που καλύπτουν ολόκληρο τον ουρανό. Η βάση τους παρουσιάζεται αρκετά ομοιόμορφη και χαμηλή, ενώ συχνά αποκρύπτουν τις κορυφές χαμηλών λόγων. Αποτελούνται από νεφοσταγονίδια και πολλές φορές δίνουν ασθενή βροχή και ψεκάδες. Εμφανίζονται κυρίως το χειμώνα

■ Ύψος βάσης τους:  
0 – 2 km



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stratus\\_cloud.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stratus_cloud.jpg)



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stratus\\_cloud.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stratus_cloud.jpg)

■ Η ομίχλη αποτελεί περίπτωση στρωματομορφου νέφους (Stratus) η βάση του οποίου βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους



Πηγή: <http://spaceplace.nasa.gov/review/cloud-scramble/low-clouds.html>



Πηγή: <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/clouds/types.htm>



## 2. Stratocumulus (Sc) Στρωματοσωρείτες

- Αποτελούν ένα εκτεταμένο στρώμα νεφών σφαιρικής ή κυλινδρικής μορφής γκρίζου (φαιού) ή υπόλευκου χρώματος. Οι νεφικοί αυτοί σχηματισμοί εμφανίζουν και σκοτεινά τμήματα
- Το στρώμα αυτό άλλοτε είναι πυκνό και άλλοτε επιτρέπει να φαίνεται τμήμα του ουρανού
- Αποτελούνται από υδροσταγονίδια και παγοκρυστάλλους
- Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν τα νέφη αυτά μπορούν να δώσουν βροχόπτωση ή χιονόπτωση ασθενούς έντασης



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stratocumulus\\_stratiformis\\_irregular.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stratocumulus_stratiformis_irregular.jpg)

### 3. Nimbostratus (Ns) Μελανοστρώματα

- Συνίσταται από πυκνό, παχύ και εκτεταμένο στρώμα νεφών με σκοτεινό γκριζοχρώμα, χωρίς χαρακτηριστικό σχήμα, αλλά με ρακώδη άκρα, από τα οποία πέφτει συνεχής βροχή, χιόνι, ή χιονόλυτος
- Αποτελούνται από βροχοσταγόνες, παγοκρυστάλλους και νιφάδες χιονιού
- Είναι τα πιο βροχοφόρα νέφη και η βροχή που δίνουν έχει μικρή ένταση αλλά μεγάλη διάρκεια



Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nimbostratus\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Nimbostratus_cloud)



# Νέφη - Νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης

## 1. Cumulus (Cu) Σωρείτες

- Πυκνά νέφη με κατακόρυφη ανάπτυξη. Η κορυφή τους είναι τρουλοειδής και εμφανίζει εξογκώσεις, ενώ η βάση τους είναι οριζόντια. Μοιάζουν με σωρούς βάμβακος μεμονωμένα ή σε ομάδες και ανάλογα της θέσης από την οποία παρατηρούνται τα νέφη αυτά εμφανίζουν σκοτεινό κέντρο και λευκές άκρες. Τα τμήματα τους που φωτίζονται από τον ήλιο είναι έντονα λευκά
- Το ύψος της βάσης των σωρειτών ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο του τόπου, την εποχή και την ώρα της ημέρας. Στην Ελλάδα το σύνηθες ύψος της βάσης τους είναι τα 1000 m
- Η δημιουργία τους συνδέεται με αίθριο καιρό & ανοδικές κινήσεις
- αποτελούνται από υδροσταγονίδια
- Αν η κατακόρυφη ανάπτυξη τους είναι μεγάλη μπορεί να δώσουν βροχή



Πηγή:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Cumulus\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Cumulus_cloud)

## 1. Cumulonimbus (Cb) Σωρειτομελανίες

▪ Είναι από τα πιο σημαντικά και πιο επικίνδυνα νέφη, αποτελούνται από ογκώδεις μελανές μάζες νεφών που μοιάζουν με βουνά, πύργους ή άκμονες. Κατά κανόνα στην κορυφή των σωρειτομελανιών εμφανίζεται στρώμα ή πέπλος ινώδους μορφής. Η βάση τους είναι σκοτεινή, ενώ η κορυφή που αποτελείται από ψευδοθυσάνους εκτείνεται μέχρι την τροπόπαυση. Ο σωρειτομελανίας αποτελεί εξέλιξη και ανάπτυξη του σωρείτη. Η περαιτέρω ανάπτυξη του σωρειτομελανία, όταν συνοδεύεται από βροντές και αστραπές καταλήγει σε καταιγίδα. Το χαρακτηριστικότερο γνώρισμα του νέφους είναι στην αρχή οι ραγδαίες βροχές και στη συνέχεια καταλήγουν στο φαινόμενο της καταιγίδας με αστραπές και το χαλάζι

- Περιέχει υδροσταγόνες και στο ανώτερο τμήμα του παγοκρυστάλλους
- Η βάση του είναι οριζόντια σε μικρά ύψη από το έδαφος
- Μέσα στο νέφος λαμβάνουν χώρα έντονες ανοδικές και καθοδικές κινήσεις
- Περιέχουν σημαντικά ηλεκτρικά φορτία με αποτέλεσμα και ηλεκτρικές εκκενώσεις



Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cumulonimbus\\_calvus](https://en.wikipedia.org/wiki/Cumulonimbus_calvus)



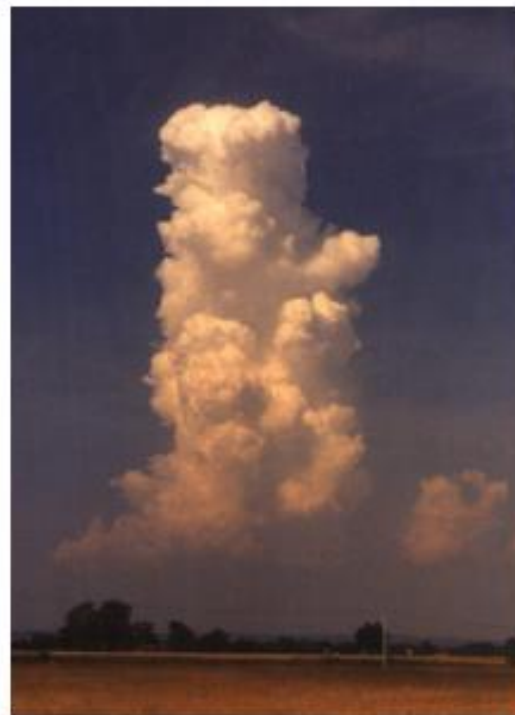
Πηγή: <http://spaceplace.nasa.gov/review/cloud-scramble/mid-clouds.html>



## Cumulus Congestus



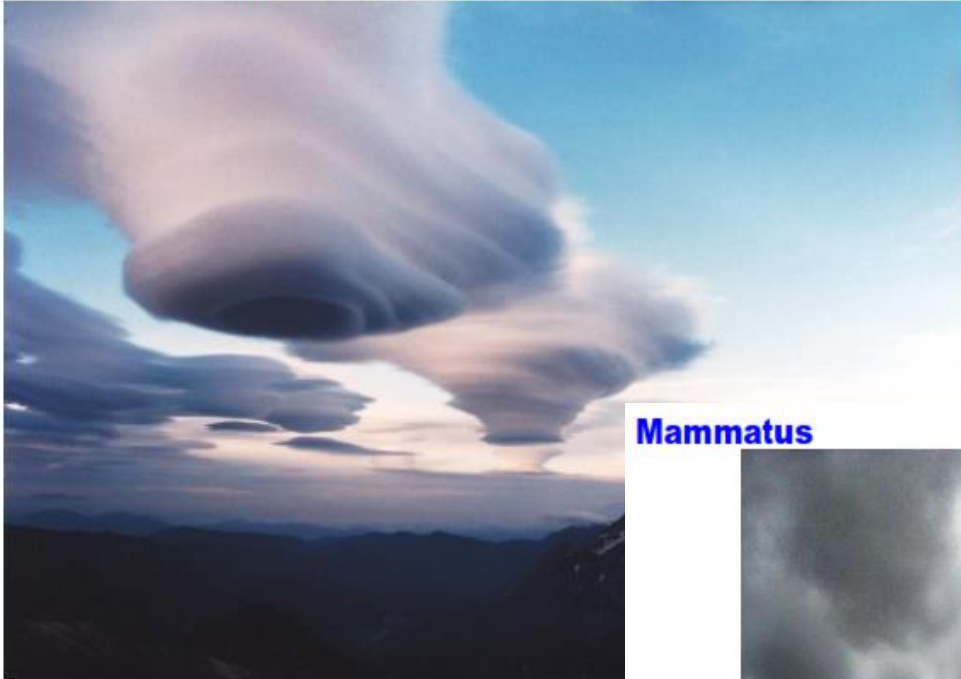
Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cumulus\\_congestus\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Cumulus_congestus_cloud)



Πηγή: with the courtesy of Aime Druilhet

## Lenticularis ή φακοειδή

- Σχηματίζονται καθώς οι αέριες μάζες περνούν πάνω από βουνά. Σχηματίζονται πλησίον των κορυφών των βουνών. Μοιάζουν με φακό ή UFOs !



Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lenticular\\_cloud](https://en.wikipedia.org/wiki/Lenticular_cloud)

## Mammatus



Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mammatus\\_Clouds,\\_10.31.05\\_Meridian\\_Idaho.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mammatus_Clouds,_10.31.05_Meridian_Idaho.jpg)



## Contrails

- Λεπτά επιμήκη τεχνητά νέφη που σχηματίζονται συνήθως πίσω από αεροσκάφη
- Σχηματίζονται είτε από συμπύκνωση των ατμών & υδρατμών που εκπέμπονται από τις εξατμίσεις των αεροσκαφών είτε από μεταβολές της πίεσης στις δίνες αέρα που σχηματίζονται από τα αεροσκάφη
- Αποτελούνται από υδρασταγόνες και παγοκρυστάλλους
- Μοιάζουν με νέφη cirrus



Πηγή: <http://science-edu.larc.nasa.gov/SCOOL/contrail.html>

# Νέφωση - Χρονικές Μεταβολές

▪ **Ημερήσια μεταβολή:** είναι πολύπλοκη και διαφέρει από τόπο σε τόπο

○ **Εύκρατες περιοχές:** παρουσιάζει απλή κύμανση

• **θέρος:** λόγω σημαντικής θέρμανσης της επιφάνειας είναι έντονη η ανωμεταφορά => τα νέφη είναι κυρίως κατακόρυφης ανάπτυξης με μέγιστο τις πρώτες απογευματινές ώρες

• **χειμώνα:** επικρατούν άλλες καιρικές καταστάσεις (π.χ. διέλευση διαταραχών – υφέσεις, μέτωπα) => τα νέφη είναι κυρίως στρωματόμορφα με μέγιστο τις πρωινές ώρες

○ **Υποτροπικές περιοχές:** παρουσιάζει διπλή κύμανση με μέγιστο στις 6:00 & 18:00 τοπική ώρα

○ **Μεγάλα γεωγραφικά πλάτη:** δεν υπάρχει σαφές πρότυπο λόγω της επίδρασης μη περιοδικών καιρικών μεταβολών

▪ **Εποχική μεταβολή:** εξαρτάται από τα κλιματικά χαρακτηριστικά και τη γεωγραφία ενός τόπου και την εποχή του έτους

○ **Εύκρατες & ορισμένες τροπικές περιοχές:** το μέγιστο της νέφωσης σημειώνεται το χειμώνα και το ελάχιστο το θέρος

○ **Ηπειρωτικές περιοχές που το χειμώνα βρίσκονται υπό την επίδραση αντικυκλωνικών συνθηκών (π.χ. Σιβηρία, Καναδάς):** η νέφωση παρουσιάζει μέγιστο το θέρος και ελάχιστο το χειμώνα

○ **Μουσσωνικά κλίματα:** το μέγιστο της νέφωσης σημειώνεται την εποχή των Μουσώνων (θέρος) και το ελάχιστο το χειμώνα

○ **Περιοχές κοντά στον Ισημερινό:** η νέφωση εμφανίζει διπλή κύμανση με μέγιστο κατά τις Ισημερίες και ελάχιστο στα ηλιοστάσια

## Νέφωση - Ελλαδικό χώρο

- **Ετήσια πορεία:** παρουσιάζει απλή κύμανση με μέγιστο τους μήνες Δεκέμβριο – Ιανουάριο και ελάχιστο τους μήνες Ιούλιο - Αύγουστο
- **Γεωγραφική κατανομή:** παρουσιάζει **μέγιστη** τιμή στις βορειοδυτικές και βόρειες περιοχές της χώρας και πάνω από τους ορεινούς όγκους, ενώ είναι **ελάχιστη** πάνω από τα νότια παράλια της Κρήτης και τα Δωδεκάνησα

Η τάση υδρατμών ( $e$ ) μπορεί να υπολογιστεί από την θερμοκρασία ( $T$ ) και την σχετική υγρασία ( $RH$ ) από την σχέση:

$$e = \left( \frac{RH}{100} \right) * 6.105 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.7}\right)$$

Όπου,  $T$  η θερμοκρασία του αέρα ( $^{\circ}C$ ) και  $RH$  η σχετική υγρασία (%).

$e$  η τάση υδρατμών του αέρα (hPa).

Η τάση υδρατμών  $e$  μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση:

$$e = 6.112 \left( \frac{RH}{100} \right) * 10^{\frac{7.5T}{237.7+T}}$$

Η σχέση υπολογισμού του δείκτη ( $H$ ) είναι η ακόλουθη:

$$H = T + \frac{5}{9} * (e - 10)$$