



Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Ενότητα 4: Θερμοδυναμική της Ατμόσφαιρας

Μουσιόπουλος Νικόλαος
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



Θερμοδυναμική της Ατμόσφαιρας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

- Καταστατική εξίσωση – Υδροστατική ισορροπία.
- Στατική ευστάθεια της ατμόσφαιρας.
- Διαγράμματα καταστατικών μεταβολών.



Σκοποί ενότητας

- Θερμοδυναμική της ατμόσφαιρας.
- Κατάσταση ισορροπίας.
- Παγίδευση των ρύπων.
- Κριτήρια ευστάθειας ξηρού αέρα.
- Αναλογία υγρασίας κορεσμού.
- Φαινόμενο Foehn.



Θερμοδυναμική της ατμόσφαιρας

Η διασπορά ρύπων στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από τη **θερμοδυναμική** (θερμοκρασιακές διαφορές) και τη **ρευστομηχανική** (ατμοσφαιρικά ρεύματα) κατάσταση της ατμόσφαιρας.

Η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα εξαρτάται από τις **συνθήκες ισορροπίας** στην Ατμόσφαιρα, δηλαδή την κατακόρυφη κατανομή της **θερμοκρασίας** και **υγρασίας**.



Βασικοί νόμοι

1ος Θερμοδυναμικός Νόμος:

$$dU = dQ + dW \longrightarrow dQ = C_V dT + Pd_V$$

Καταστατική εξίσωση ατμοσφαιρικού αέρα:

$$P = \rho RT$$

Υδροστατική ισορροπία (για ακίνητο ρευστό στην ατμόσφαιρα):

$$dP = -\rho g dz$$



Κατάσταση ισορροπίας μάζας αέρα

Ζεστός/υγρός αέρας: μικρότερη πυκνότητα (**πιο ελαφρύς**) από τον ψυχρό/ξηρό αέρα.

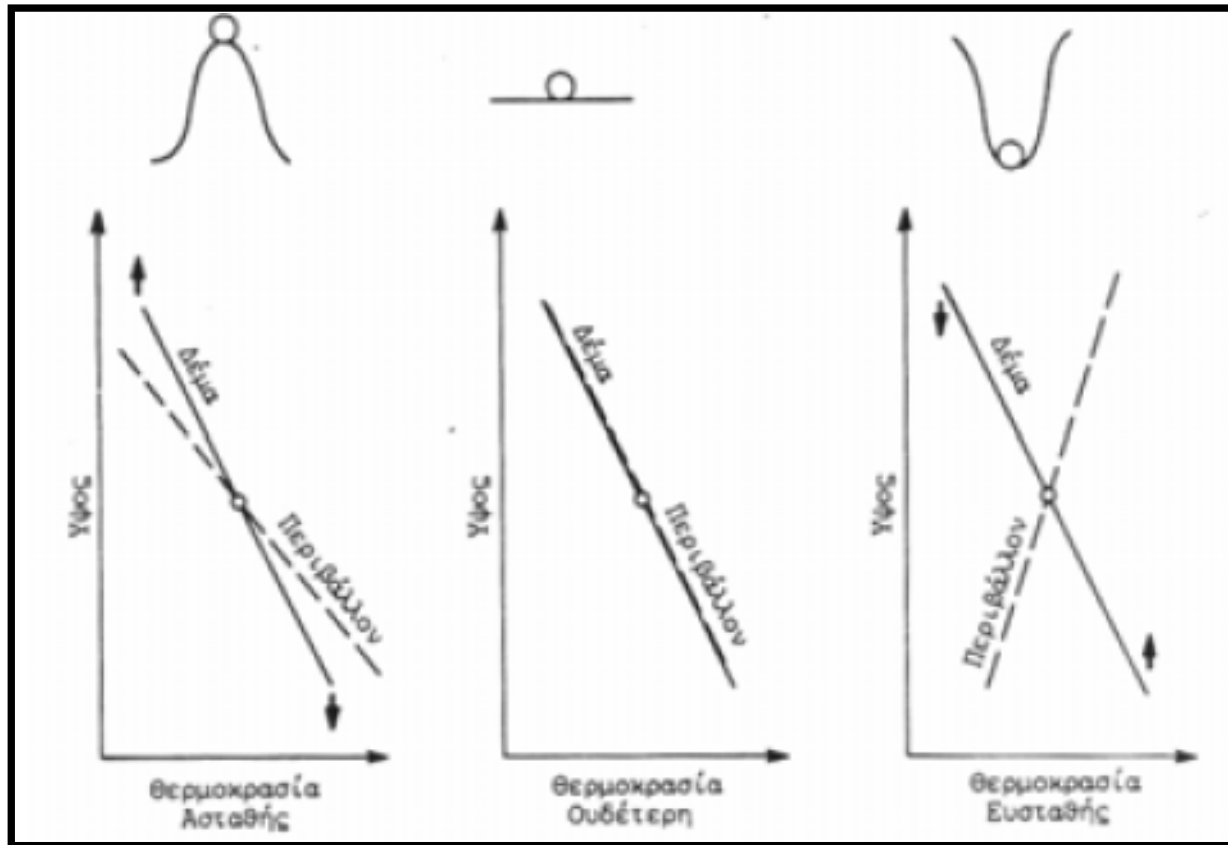


Μάζα αέρα πιο ζεστή/υγρή από τον περιβάλλοντα αέρα **ασταθής**, ανέρχεται μέχρι να φθάσει σε κατάσταση ισορροπίας.

Οι καταστατικές μεταβολές αερίων μαζών στην ατμόσφαιρα (λόγω μετακίνησης σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης) θεωρούνται **αδιαβατικές** μεταβολές!



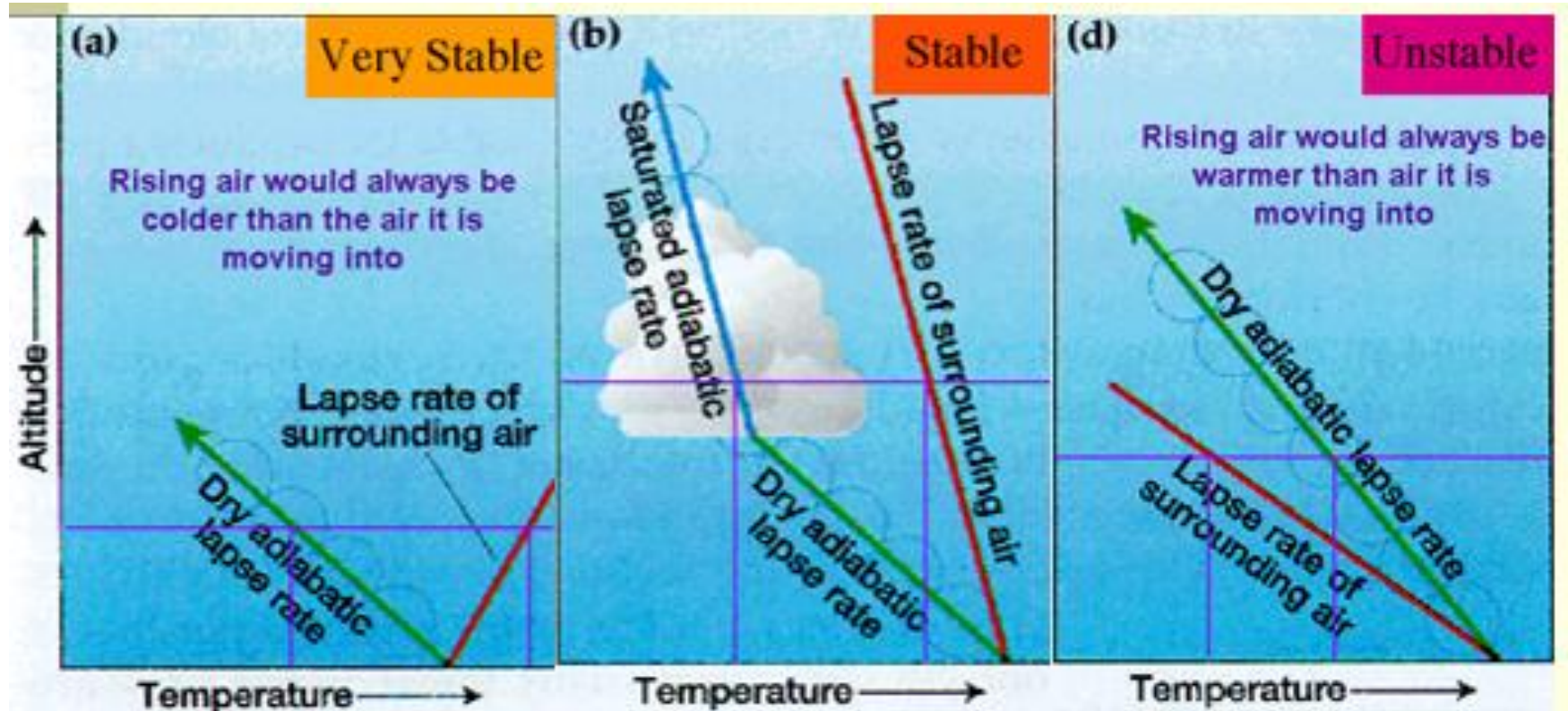
Κατάσταση ισορροπίας: σχέση θερμοκρασίας ως προς το ύψος



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurpx>, 06/07/2015.



Καταστάσεις ισορροπίας

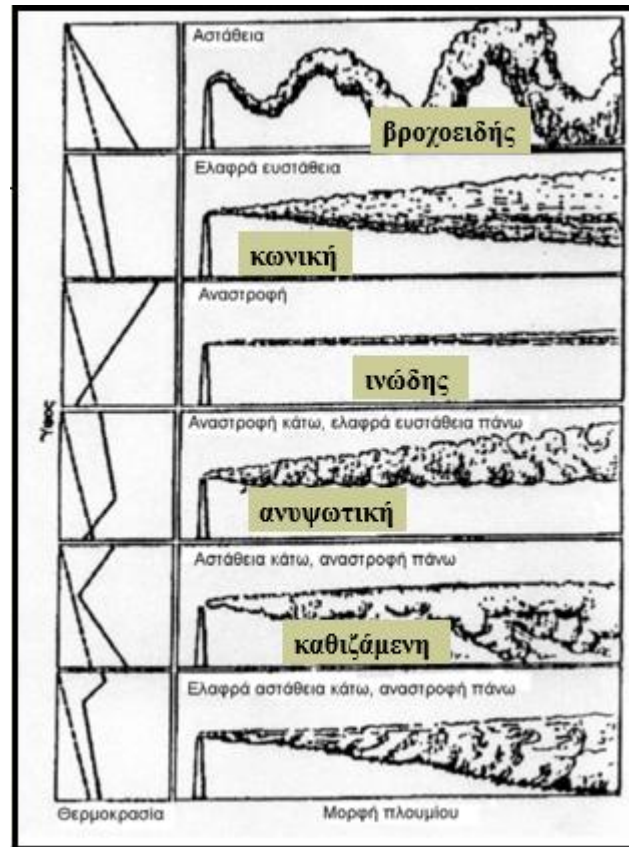


Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 06/07/2015.



Η κατάσταση ισορροπίας επηρεάζει την:

1. Διασπορά και ανάμιξη ρύπων.
2. Παρουσία και ένταση αναταρακτικών κινήσεων, δηλ. τυρβώδους ροής.



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 06/07/2015.

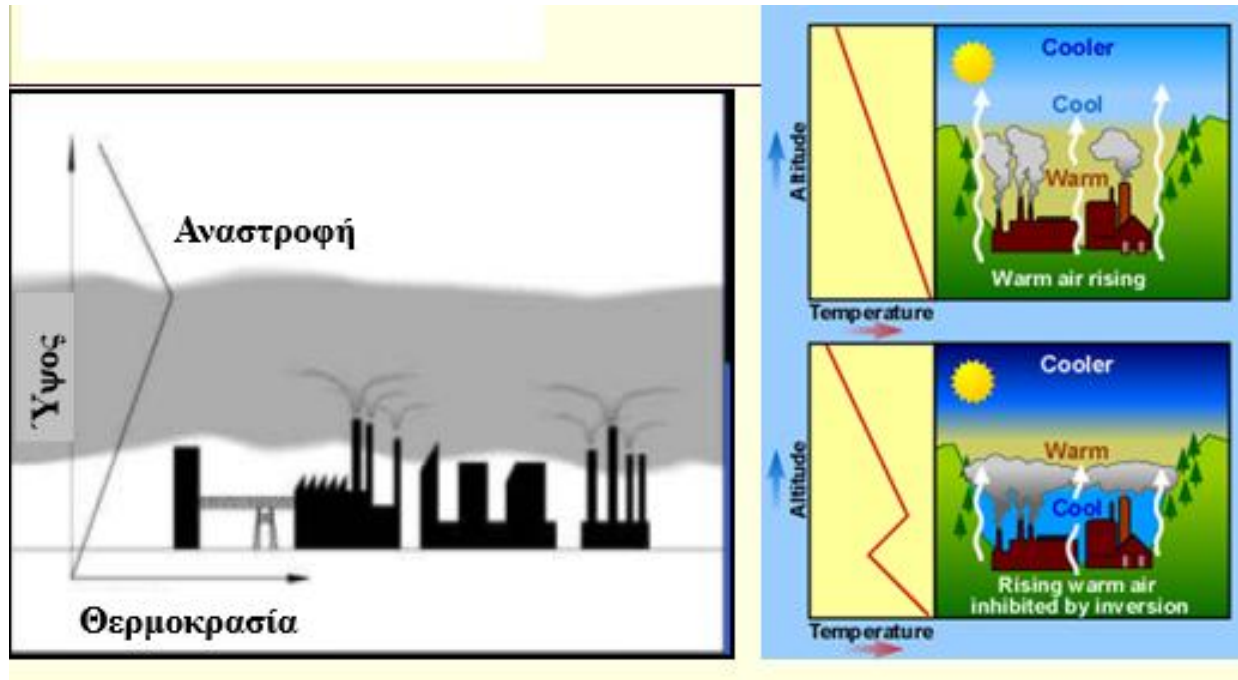


Επίδραση αναστροφών στη ρύπανση



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 06/07/2015.

Παγίδευση των ρύπων μέσα στο στρώμα της αναστροφής



Θερμοκρασιακή αναστροφή: αναστροφή της κλίσης της θερμοβαθμίδας. Στο στρώμα αναστροφής η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αυξάνει με την απόσταση από το έδαφος -> δεν ευνοούνται ανοδικές κινήσεις.

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 06/07/2015.



Μεταβολή θερμοκρασίας ως προς το ύψος

- **Θερμοβαθμίδα**: σταθερή μεταβολή της θερμοκρασίας ως προς το ύψος.
- Κατά τη διάρκεια του 24ωρου, η πραγματική ατμόσφαιρα θα έχει θερμοβαθμίδα που θα μεταβάλλεται τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και με το ύψος μέσα στην τροπόσφαιρα.
- Η τιμή της πραγματικής θερμοβαθμίδας γ σε σύγκριση με την αδιαβατική θερμοβαθμίδα γ_0 έχει ουσιαστική επίδραση στο ρυθμό διασποράς των ρύπων στο περιβάλλον.

$$\gamma \equiv -\frac{dT}{dz}$$



Ξηροαδιαβατική θερμοβαθμίδα

- Η αδιαβατική θερμοβαθμίδα για την περίπτωση του ξηρού (ακόρεστου) ατμοσφαιρικού αέρα είναι η ξηροαδιαβατική θερμοβαθμίδα και αποτελεί ένα από τα κριτήρια ευστάθειας της ατμόσφαιρας.
- Όταν η θερμοβαθμίδα είναι μικρότερη από την ξηροαδιαβατική θερμοβαθμίδα επικρατεί ευστάθεια.

$$\left[\frac{d\rho}{dz} \right]_{\pi} > \left[\frac{d\rho}{dz} \right]_{\alpha}$$

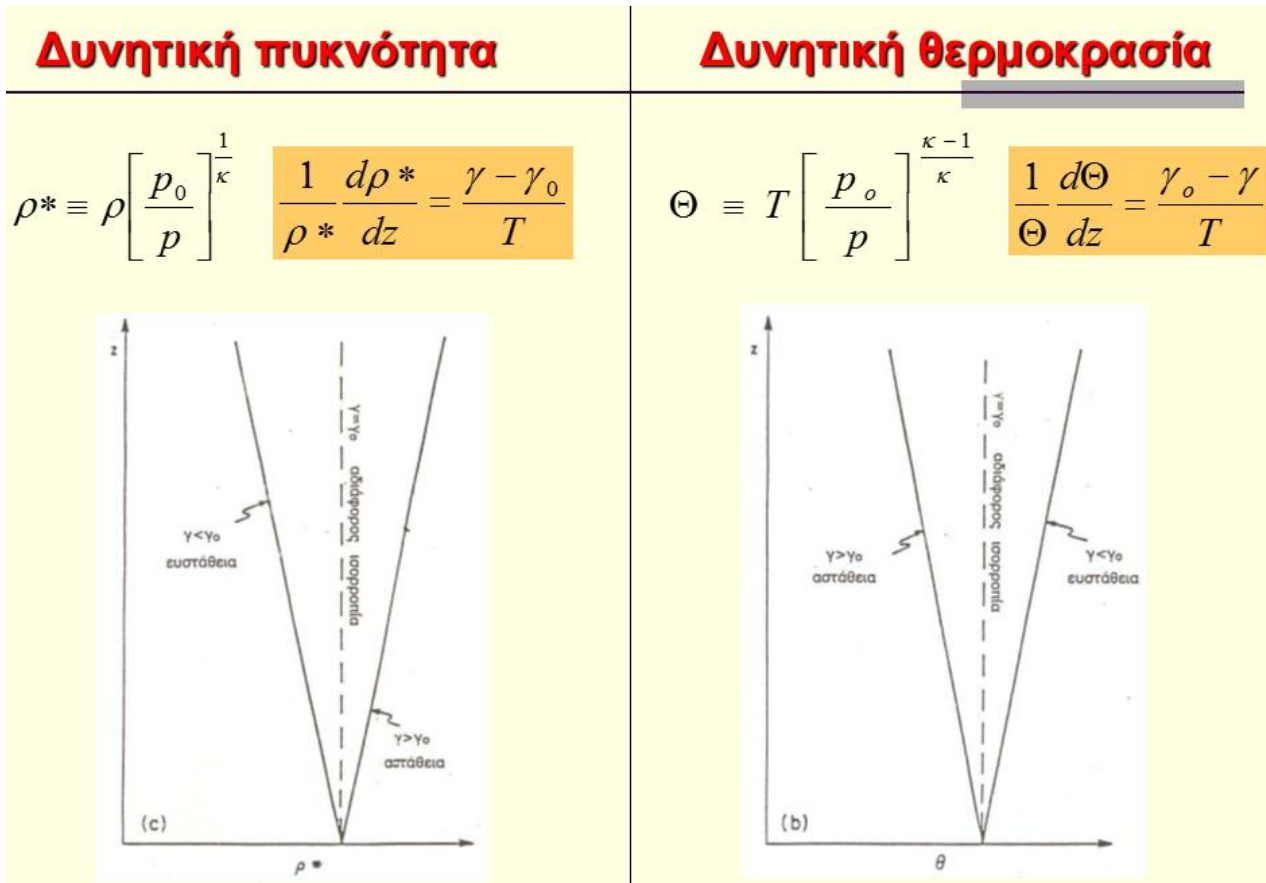
$\gamma < \gamma_0$ **στατική ευστάθεια.**

$\gamma > \gamma_0$ **στατική αστάθεια.**

$\gamma = \gamma_0$ **αδιάφορος ισορροπία.**



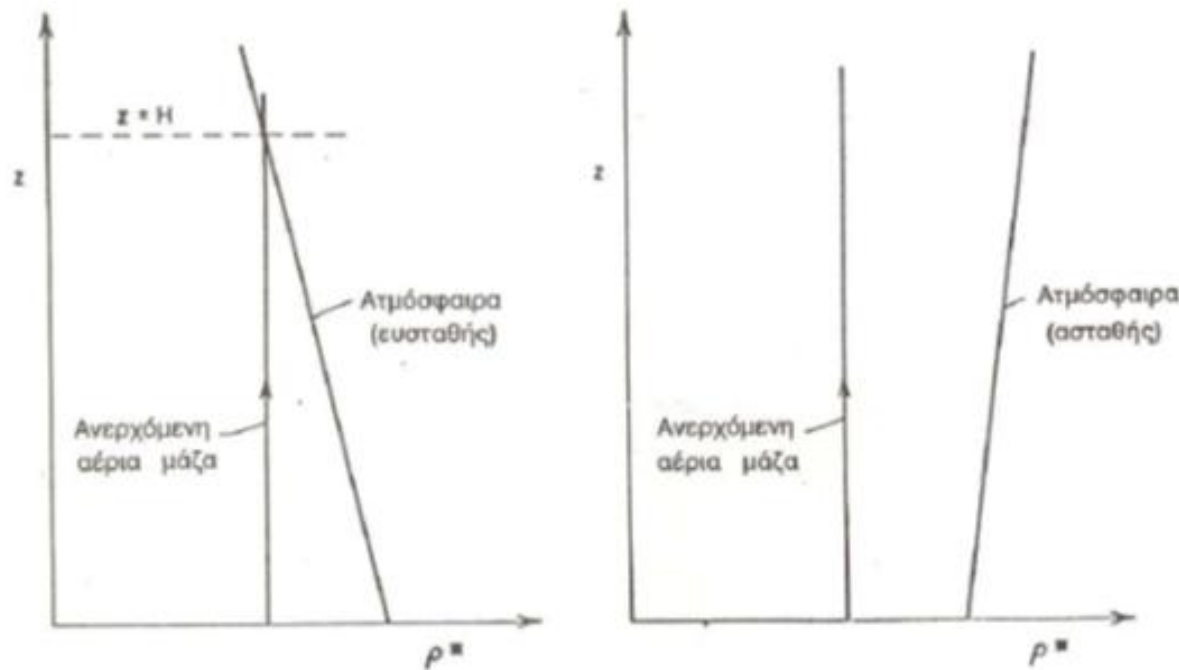
Άλλα κριτήρια ευστάθειας ξηρού αέρα



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 06/07/2015.



Εξιδανίκευση της ανωστικής κίνησης ενός πλουμίου



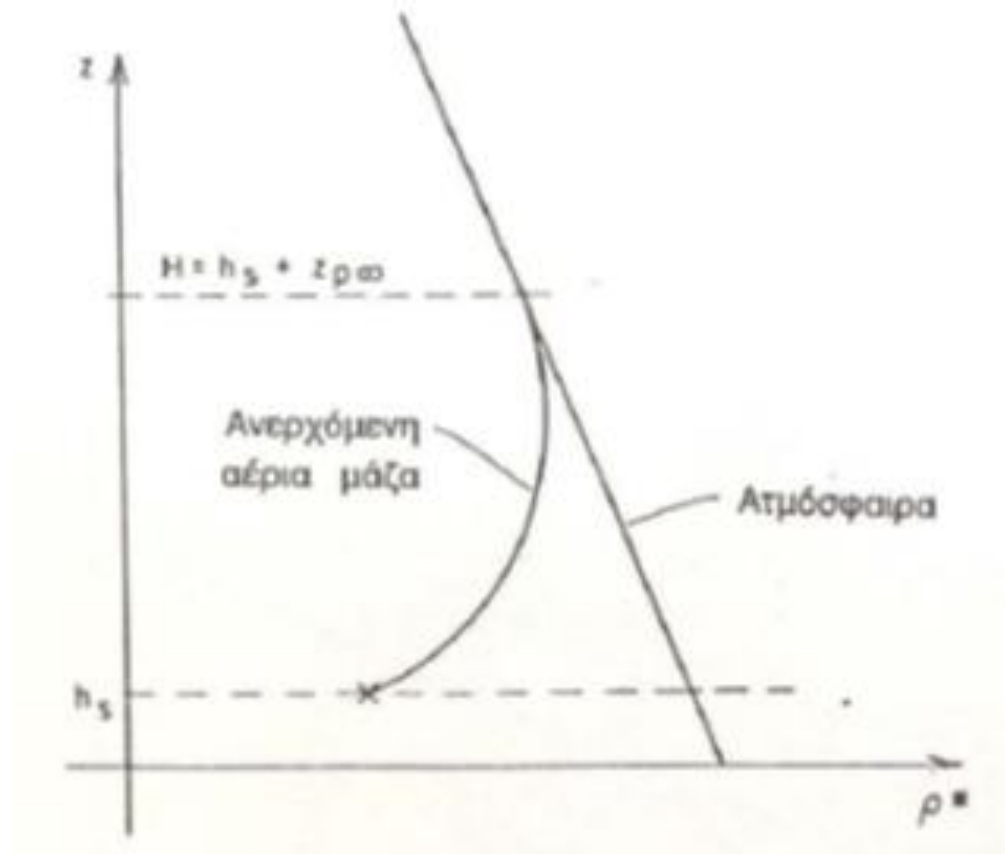
Κατά τη διάρκεια της κίνησης αυτής η δυνητική πυκνότητα του πλουμίου παραμένει σταθερή, αν αγνοηθούν φαινόμενα ανάμιξης. Ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν η ατμόσφαιρα είναι στατιστικά ευσταθής.

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurpx>, 06/07/2015.



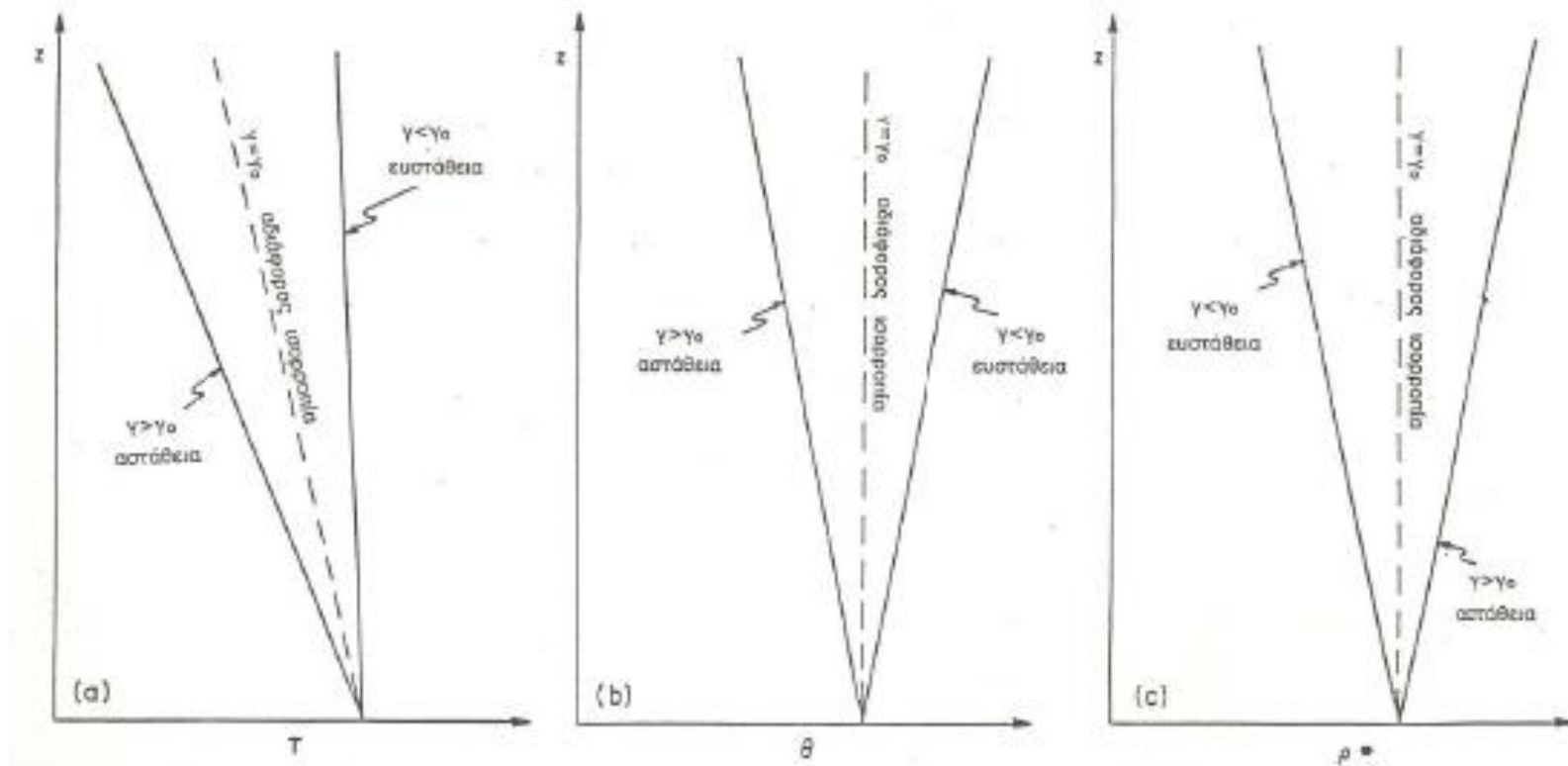
Δυνητική πυκνότητα ως συνάρτηση του ύψους

Φαινόμενα ανάμιξης έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της δυνητικής πυκνότητας του πλουμίου με το ύψος.



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 06/07/2015.

Κριτήρια ευστάθειας ξηρού αέρα



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 06/07/2015.

Υγροαδιαβατική θερμοβαθμίδα

- Κριτήριο ευστάθειας του υγρού αέρα είναι η **ισοδύναμη δυνητική θερμοκρασία** σε αντιστοιχία με τη δυνητική θερμοκρασία σε ξηρό αέρα.
- Υγροαδιαβατική θερμοβαθμίδα $<$ Ξηροαδιαβατική θερμοβαθμίδα.
- Η διαφορά τους εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία.
- Το κριτήριο ευστάθειας είναι **αυστηρότερο** στην περίπτωση του ξηρού αέρα (ο υγρός αέρας είναι ελαφρύτερος), έτσι η επίτευξη της κατάστασης κορεσμού σε μία ανερχόμενη μάζα αέρα μπορεί να επιτείνει τις ανωστικές δυνάμεις που επιδρούν σ' αυτήν.



Έκφραση της υγρασίας στην ατμόσφαιρα

Το ποσοστό της υγρασίας δίνεται από την **αναλογία υγρασίας**,

$$x \equiv \frac{m_Y}{m_A} = \frac{c_Y}{\rho_A}$$

c_Y : μάζα υδρατμού ανά μονάδα όγκου, δηλ. συγκέντρωση υδρατμού.

ή της **σχετικής υγρασίας**.

$$\phi = \frac{P_Y}{P_S}$$

P_Y : τάση υδρατμού, P_S : τάση κορεσμού.



Αναλογία υγρασίας κορεσμού

Από καταστατική εξίσωση (Υδρατμός: τέλειο αέριο):

$$\frac{P_Y}{P_A} = x \frac{R_Y}{R_A} \quad \text{και αν:} \quad P = P_A + P_Y$$

τότε η **αναλογία υγρασίας** μπορεί να δοθεί από τον τύπο:

$$x = \frac{R_A}{R_Y} \frac{P_Y}{P - P_Y} \equiv \varepsilon \frac{P_Y}{P - P_Y}$$

Επειδή στην πράξη $P_Y \ll P$ $x \approx \varepsilon \frac{P_Y}{P}$

$$\phi \approx \frac{x}{x_s(T, P)}$$

χ_s : **αναλογία υγρασίας κορεσμού.**



Καταστατική εξίσωση υγρού αέρα

Για τον υπολογισμό της συνολικής πίεσης και αφού $x \ll 1$:

$$P = \rho_A R_A T \left[1 + \frac{x}{\varepsilon} \right] \approx \rho R_A T \left[1 + \frac{x}{\varepsilon} \right] \left(-x \right) \Rightarrow P \approx \rho R_A T \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) x \right]$$

Καταστατική εξίσωση **υγρού αέρα**: $P = \rho R_A T_v$

Εικονική θερμοκρασία: $T_v = T \left(+ 0,61x \right)$

$$\frac{1}{\varepsilon} - 1 = 0,61$$

Για δεδομένη πίεση και θερμοκρασία, ο αέρας με υγρασία είναι **ελαφρύτερος** του αέρα χωρίς υγρασία!



Συχνότητα Brunt-Vaisalla

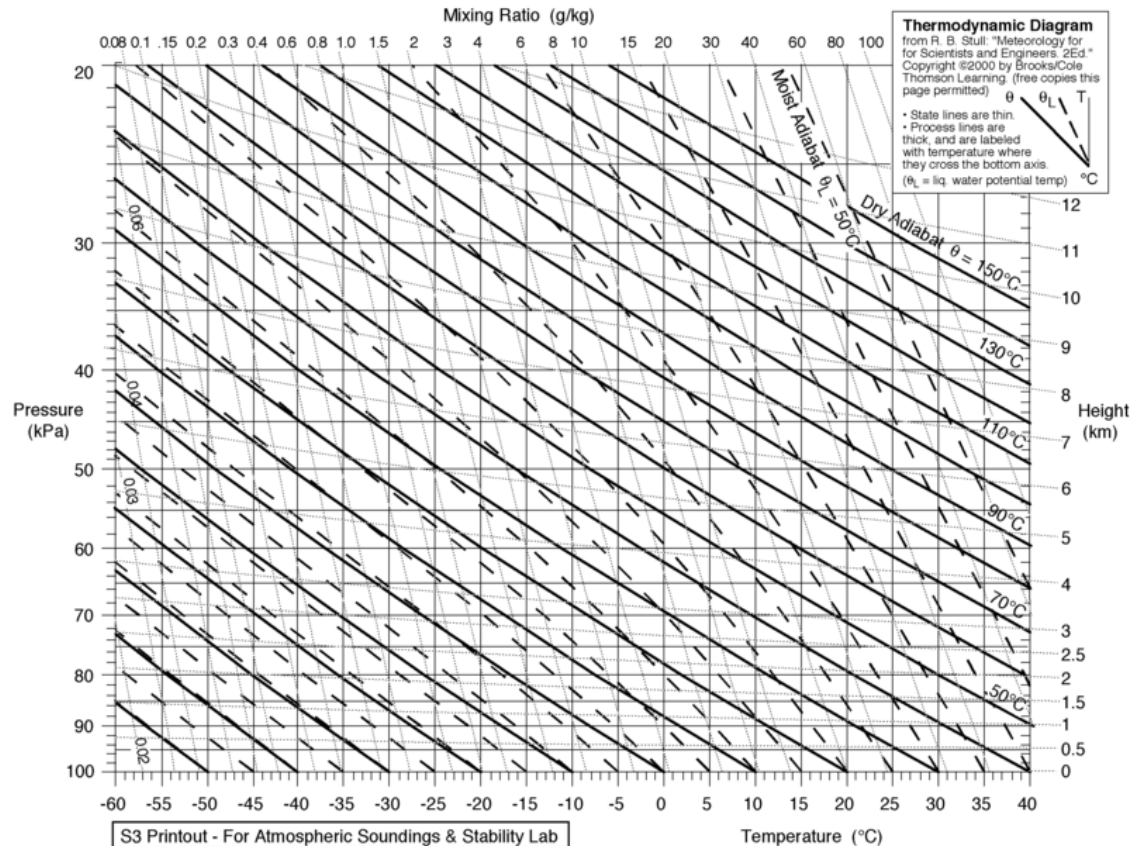
Μπορούμε να προσεγγίσουμε την κατακόρυφη κίνηση ενός πακέτου αέρα γύρω από τη θέση ισορροπίας του σε μία ευσταθή ατμόσφαιρα με την κίνηση της ταλάντωσης ενός ελατηρίου.

Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα της ταλάντωσης του πακέτου αέρα ονομάζεται συχνότητα **Brunt-Vaisalla**:

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho^*} \frac{d\rho^*}{dz}} = \sqrt{\frac{g}{T} (\kappa_0 - \gamma)}$$



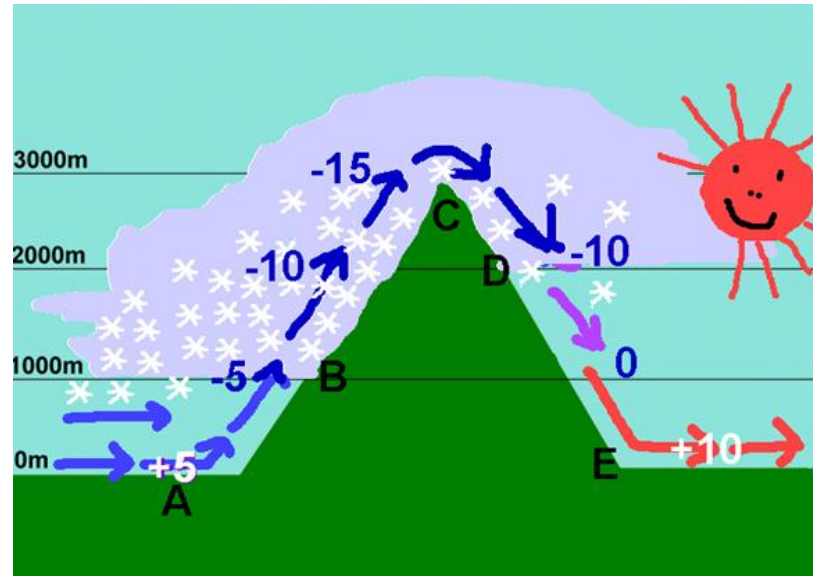
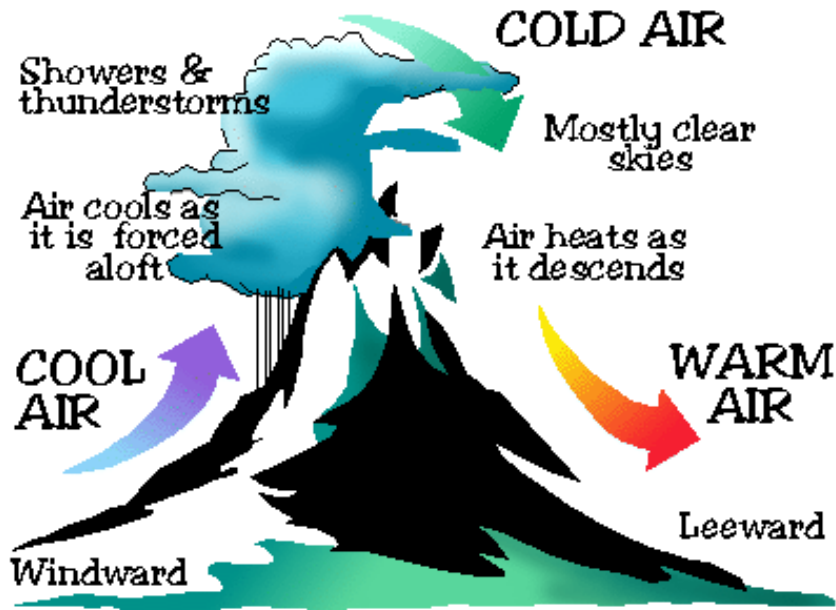
Παράσταση καταστατικών μεταβολών σε διαγράμματα - Εμάγραμμα



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayux>,
05/07/2015.



Φαινόμενο Foehn



Ξηροί και θερμοί καθοδικοί άνεμοι στις πλαγιές βουνών που θερμαίνουν και ξηραίνουν τις παρακείμενες περιοχές.

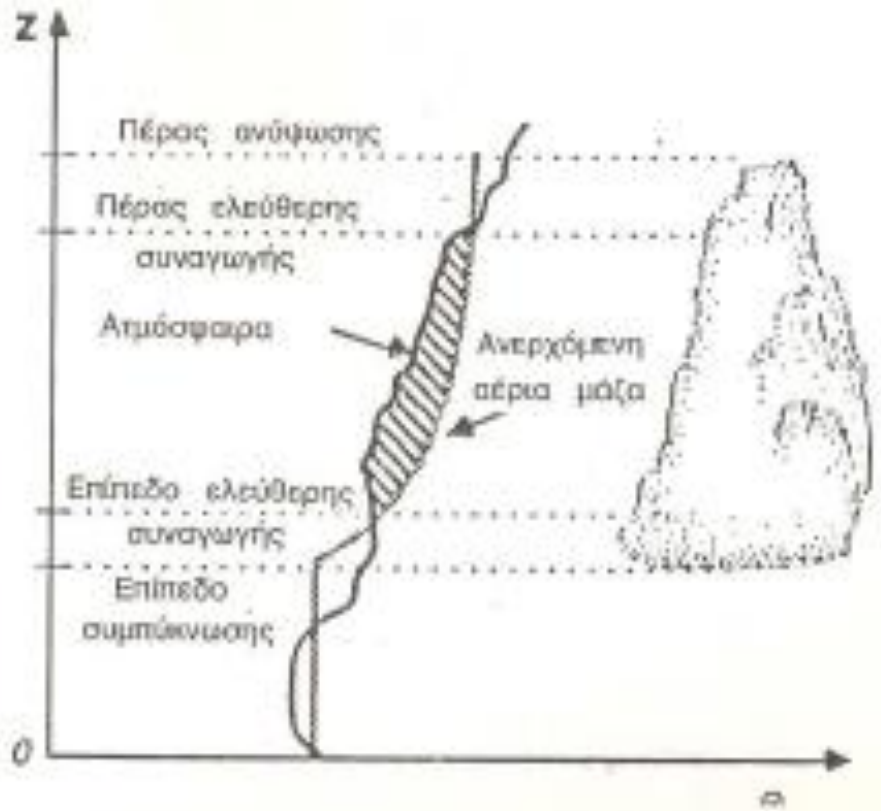
Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurx,05/07/2015>.

<http://sageography.myschoolstuff.co.za/wp-content/uploads/sites/2/2012/11/1foehn3.gif>

<http://www.stuffintheair.com/images/Foehn.gif>



Ενέργεια αστάθειας



Πηγή ενέργειας είναι η θερμική άνωση, επομένως διακρίνουμε διαστήματα επιτάχυνσης ($T_p > T_a$) και επιβράδυνσης ($T_p < T_a$).

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 05/07/2015.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

- Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:
 - Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες:
 - <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0aγυρx>, 05/07/2015.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Μουσιόπουλος Νικόλαος. «Ατμοσφαιρική Ρύπανση. Θερμοδυναμική της Ατμόσφαιρας». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS407/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: <Περκουλίδης Γιώργος>
Θεσσαλονίκη, <Εαρινό Εξάμηνο 2014-2015>



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

