



Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Ενότητα 8: Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.

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



Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα



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

- Λύση Ekman.
- Αδιαβατικό / Διαβατικό οριακό στρώμα.
- Στατική και δυναμική ευστάθεια στο ΑΟΣ.
- Ημερήσια διακύμανση του ΑΟΣ.



Σκοποί ενότητας

- Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα.
- Αδιαβατικό ΟΣ: κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.
- Μήκος Monin-Obukhov.
- Εξαναγκασμένη και ελεύθερη συναγωγή.
- Εκτίμηση του ύψους ανάμειξης του ΑΟΣ.

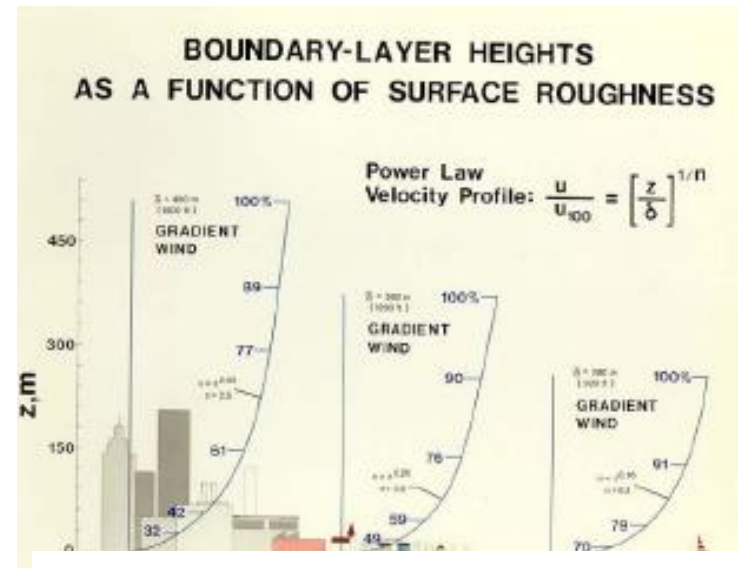


Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ)

Το κατώτερο τμήμα της τροπόσφαιρας που επηρεάζεται άμεσα από την παρουσία της γήινης επιφάνειας και στο οποίο η μορφολογία του εδάφους επιδρά με χρονική κλίμακα το πολύ μιας ώρας.

Χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις του ΑΟΣ που εξαρτώνται από:

- Διάδοση θερμότητας (θέρμανση εδάφους - ηλιοφάνεια).
- Μορφολογία και ανάγλυφο εδάφους (μεταβολές λόγω τραχύτητας εδάφους και διαφορές στη χρήση γης).
- Μετεωρολογικές συνθήκες (ύπαρξη μετώπων, θαλάσσια-απόγειος αύρα).



Πάχος του ΑΟΣ ως συνάρτηση της τραχύτητας του εδάφους.

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 16/07/2015.

<http://mae.engr.ucdavis.edu/~wind/facilities/images/roughnessthumb.jpg>



Λύση Ekman

Η λύση βασίζεται στις εξισώσεις κίνησης με την προϋπόθεση υδροστατικής ισορροπίας.

Οριζόντια, μόνιμη και ομοιογενής ροή. $\bar{w} = 0$ $\frac{D\{u, v\}}{Dt} = 0$ $\frac{D\{u, v\}}{Dx} = 0$

Οι οριζόντιες παράγωγοι της πίεσης εκφράζονται με τις συνιστώσες του γεωστροφικού ανέμου.

$$-f v = -f v_G + \frac{d}{dz} \left[\nu \frac{\partial u}{\partial z} - \bar{w}'u' \right]$$

$$+f u = +f u_G + \frac{d}{dz} \left[\nu \frac{\partial v}{\partial z} - \bar{w}'v' \right]$$

Οι όροι τριβής εκφράζονται με το διάνυσμα της οριζόντιας διατμητικής τάσης.

$$\begin{pmatrix} +T \\ \tau \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix}$$

$$-f (v - v_G) = - \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{\rho} \tau_{xz} \right] \quad \text{①}$$

$$+f (u - u_G) = - \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{\rho} \tau_{yz} \right] \quad \text{②}$$



Λύση Ekman: Παραδοχές

Παραδοχές

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho} \tau_{xz}^T &= -K_m \frac{du}{dz} \\ \frac{1}{\rho} \tau_{yz}^T &= -K_m \frac{dv}{dz} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Οριζόντιες} \\ \text{διατμητικές} \\ \text{τάσεις} \\ \text{ως συνάρτηση} \\ \text{της ταχύτητας} \end{array}$$

$$K_m = \text{const}$$

Τυρβώδες ιξώδες

Οριακές συνθήκες

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_{z=0} = 0$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_{z \rightarrow \infty} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} \quad G = |\vec{v}_G|$$

$$u = G (1 - e^{-az} \cos az) \quad v = G e^{-az} \sin az$$

$$a^2 = \frac{f}{2K_m}$$

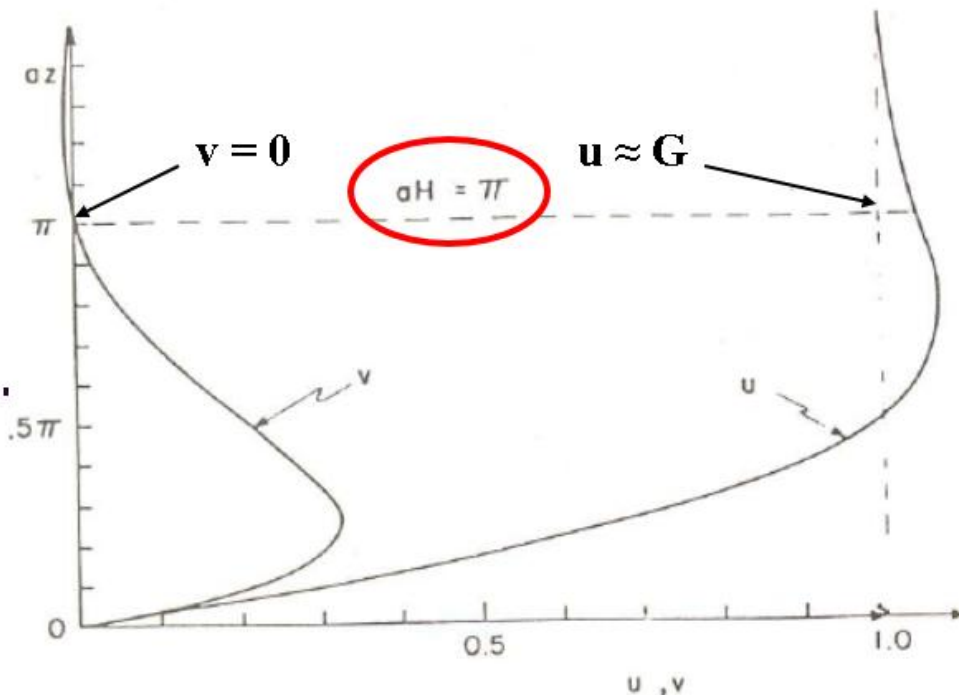
Παράμετρος Coriolis

Λύση Ekman για την κατανομή των οριζόντιων συνιστωσών του ανέμου στο οριακό στρώμα ως προς το ύψος z



Λύση Ekman: Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας ανέμου

Σε μεγάλα ύψη οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου u , v προσεγγίζουν τις τιμές G και 0 αντίστοιχα.



Η συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου v μηδενίζεται στο ύψος $\alpha z = \pi$, δηλ. όταν:

$$H = \pi \sqrt{\frac{2K_m}{f}}$$

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurpx>, 16/07/2015.



Αδιαβατικό ΟΣ: κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου (1/4)

1. Λείο έδαφος, αδιάφορη ισορροπία.

Εφαρμόζουμε τη θεωρία ομοιότητας και χρησιμοποιούμε την ταχύτητα τριβής u_* ως κατάλληλη κλίμακα ταχύτητας.

Η ταχύτητα του ανέμου θα είναι συνάρτηση του ύψους z , της παραμέτρου Coriolis f και του τυρβώδους ιξώδους K_m .

$$u(z) = \mathcal{G}(u_*, z, f, \nu)$$

$$\frac{u}{u_*} = \mathcal{G}\left(\frac{z f}{u_*}, \frac{z u_*}{\nu}\right) \left\{ \begin{array}{l} z_+ = \frac{z}{h_*} \\ h_* = \nu/u_* \end{array} \right.$$

$$\zeta \equiv \frac{z}{h} \quad h = u_*/f$$

$h \approx 10^3$ m, επομένως το ζ κυριαρχεί στο **ανώτερο** μέρος του ΑΟΣ.

$h_* \approx 10^{-4}$ m, επομένως το z_+ κυριαρχεί στο **κατώτερο** μέρος του ΑΟΣ.

$$\frac{h}{h_*} = \frac{u_* h}{\nu}$$

Αριθμός Reynolds $\approx 10^7$ m



Αδιαβατικό ΟΣ: κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου (2/4)

Παραγωγίζουμε ως προς το ύψος z

$$z_+ \gg 1 \Rightarrow \frac{u}{u_*} \approx \zeta(\zeta) \rightarrow \frac{d}{dz} \left[\frac{u}{u_*} \right] = \frac{d\zeta(\zeta)}{d\zeta} = \frac{dz}{dz} \frac{d\zeta(\zeta)}{d\zeta} = \frac{1}{h} \frac{d\zeta(\zeta)}{d\zeta}$$

$$\zeta \ll 1 \Rightarrow \frac{u}{u_*} \approx f(z_+) \rightarrow \frac{d}{dz} \left[\frac{u}{u_*} \right] = \frac{df(z_+)}{dz} = \frac{dz_+}{dz} \frac{df(z_+)}{dz_+} = \frac{1}{h_*} \frac{df(z_+)}{dz_+}$$

Στο μεταίχμιο μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου μέρους του ΑΟΣ:

Λογαριθμικός νόμος για την κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας: κατώτερο μέρος του αδιαβατικού ΑΟΣ.

$$\zeta \frac{d\zeta(\zeta)}{d\zeta} \equiv z_+ \frac{df(z_+)}{dz_+} = \frac{1}{\kappa}$$

Μετά από ολοκλήρωση

Σταθερά von Karman

$$u_+ \equiv \frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln z_+ + C$$



Αδιαβατικό ΟΣ: κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου (3/4)

2. Τραχύ έδαφος, αδιάφορη ισορροπία.

Το ΑΟΣ σχηματίζεται σαν συνέπεια της αλληλεπίδρασης της ατμόσφαιρας με την υποκείμενη επιφάνεια και το ύψος του καθορίζεται από τις καιρικές συνθήκες και την τραχύτητα του εδάφους, μέτρο της οποίας είναι η γεωμετρική τραχύτητα.

Γεωμετρική τραχύτητα

$$h_r \equiv \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{si}^2 \right]^{0,5}$$

Εκφράζει τη μέση τιμή του ύψους των εμποδίων.

Αποκλίσεις ύψους από την επιφάνεια.

Αριθμός Reynolds τραχύτητας

$$R_h \equiv \frac{u_* h_r}{\nu} = \frac{h_r}{h_*}$$



Αδιαβατικό ΟΣ: κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου (4/4)

$$u_+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{h_r} + C_r(R_h)$$

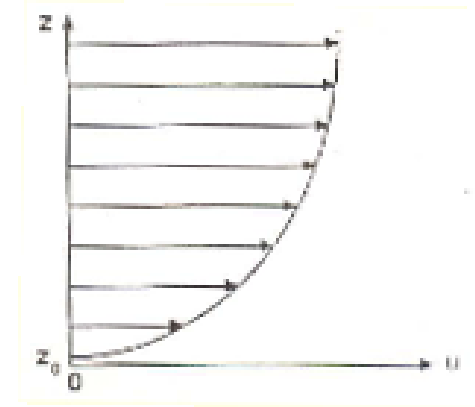
1. $R_h \leq 1$

$$C_r = 5,5 + \frac{1}{\kappa} \ln R_h$$

2. $R_h > 70$ ($C_r = 8.5$)

$$u_+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$$

Αεροδυναμική τραχύτητα, όπου ενσωματώνεται ο σταθερός όρος R_h



Μέσα στα στοιχεία τραχύτητας δηλ. για $z \leq h_r$, ο λογαριθμικός νόμος δεν ισχύει αφού η περιγραφή της ροής είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Ισχύει για $z > z_0$ και για $z > h_r$

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurpx>, 16/07/2015.



Κατακόρυφη κατανομή του K_m στο στρώμα επιφάνειας

- Χρησιμοποιούμε τη λύση Ekman αλλά με κλίμακα ταχυτήτων την ταχύτητα τριβής και κλίμακα μήκους την αεροδυναμική τραχύτητα.
- Στρώμα επιφάνειας: το κατώτερο μέρος του ΑΟΣ, όπου η διατμητική τάση παραμένει σταθερή, και το **τυρβώδες ιξώδες** μεταβάλλεται με το ύψος.

$$K_m = \kappa u_* z$$

- Η διεύθυνση του ανέμου είναι παράλληλη προς την διατμητική τάση και δε μεταβάλλεται με το ύψος. Το μέτρο της ταχύτητας ανέμου δίνεται από το λογαριθμικό νόμο που ισχύει μέχρι ≈ 100 m.



Κατακόρυφη κατανομή του K_m στο ΑΟΣ

- **Στρώμα Ekman:** βρίσκεται πάνω από το στρώμα επιφάνειας και χαρακτηρίζεται από βαθμιαία **μείωση** της διατμητικής τάσης και στροφή της διεύθυνσης του ανέμου με το ύψος.
- Η κατακόρυφη κατανομή του K_m περιγράφεται με τη βοήθεια του **δρόμου μείξης** ή με τη χρήση **εμπειρικών τύπων**.
- Ο **δρόμος μείξης** αντιπροσωπεύει τη μέση διαδρομή μιας δίνης, δηλ. την απόσταση που διανύει κατά μέσο όρο μια δίνη, πριν αλλοιωθεί ολοκληρωτικά.
- Στο **στρώμα επιφάνειας** ο δρόμος μείξης αυξάνει γραμμικά με το ύψος:

$$l = \kappa z$$

- Στο **ΑΟΣ**

$$\left\{ \begin{array}{l} l = \frac{\kappa z}{1 + \frac{\kappa z}{l_0}} \\ l_0 = 0,0063 \frac{u^*}{\Gamma} \end{array} \right. \quad K_m = l^2 \left[\left(\frac{du}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \right]^{1/2}$$



Διαβατικό οριακό στρώμα

Στη συνηθέστερη περίπτωση, η θερμοβαθμίδα στο ΑΟΣ δεν είναι αδιαβατική, οπότε υπεισέρχονται πρόσθετες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τον βαθμό **ευστάθειας** της ατμόσφαιρας.

Η μεταφορά ενέργειας στην ατμόσφαιρα εκφράζεται στις εξισώσεις κίνησης με την προσθήκη του όρου άνωσης. Έτσι μετά από διαμελισμό κατά Reynolds και χρονική ολοκλήρωση εμφανίζεται στο **ισοζύγιο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας** ένας πρόσθετος όρος παραγωγής **τύρβης** συνυφασμένος με την **άνωση**:

$$g \frac{\overline{w'\theta'}}{\Theta_0}$$

Η επίδραση του βαθμού ευστάθειας στο συνολικό ισοζύγιο ενέργειας στο έδαφος εκφράζεται με τον όρο της **τυρβώδους πυκνότητας αισθητής θερμορροής**.

$$Q_a = \rho c_p \overline{w'\theta'}$$

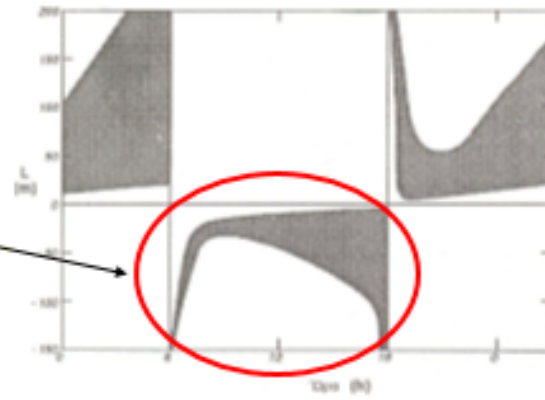
Εάν > 0 , η παραγωγή τύρβης λόγω θερμικής άνωσης είναι σημαντική και επικρατεί αστάθεια, αν < 0 ευστάθεια.



Μήκος Monin-Obukhov L

- Το μήκος Monin-Obukhov **L** χαρακτηρίζει το βαθμό ευστάθειας του επιφανειακού στρώματος της ατμόσφαιρας.
- Υπολογίζεται αφού εξισωθούν οι δύο όροι παραγωγής τύρβης από το ισοζύγιο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (δηλ. η παραγωγή λόγω άνωσης και λόγω διατμητικών τάσεων).
- Το μήκος Monin-Obukhov είναι αρνητικό στην περίπτωση της αστάθειας, δηλ. κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν συνήθως έχουμε μεταφορά θερμότητας από το έδαφος στην ατμόσφαιρα.

$$L = - \frac{u_*^3}{\frac{g}{\Theta_0} \overline{w'\theta'}}$$



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 16/07/2015.



Αριθμός Richardson

Αριθμός Richardson βαθμίδας

Αριθμός Richardson ροής

Θερμική παραγωγή τύρβης

$$R_i = \frac{\frac{g}{\Theta_0} \frac{d\Theta}{dz}}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dz}\right)^2}$$

$$R_f = \frac{\left(\frac{g}{\Theta_0}\right) \overline{w'\theta'}}{\overline{u'w'} \frac{du}{dz} + \overline{v'w'} \frac{dv}{dz}}$$

Κατακόρυφη συνιστώσα

Οριζόντια συνιστώσα

Κατάλληλο κριτήριο για να διεκρινιστεί το κατά πόσο η ροή στην ατμόσφαιρα είναι τυρβώδης ή όχι. Είναι δείκτης της σχετικής σημασίας της ανωστικής προς τη μηχανική τύρβη.

Παραγωγή τύρβης από διατμητικές τάσεις

Λόγος του ρυθμού εξαφάνισης/παραγωγής τύρβης λόγω άνωσης προς τον ρυθμό παραγωγής τύρβης λόγω έντονης βαθμίδας ανέμου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί όμως μόνο για τη μετάβαση από τυρβώδη σε στρωτή ροή και όχι για το αντίθετο, αντίθετα με τον αριθμό Richardson βαθμίδας.



Διαβατικό ΟΣ: κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου

Στρώμα επιφάνειας

Ευστάθεια

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} + \gamma_m \frac{z}{L} \right]$$

Αστάθεια

σταθερά

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right]$$

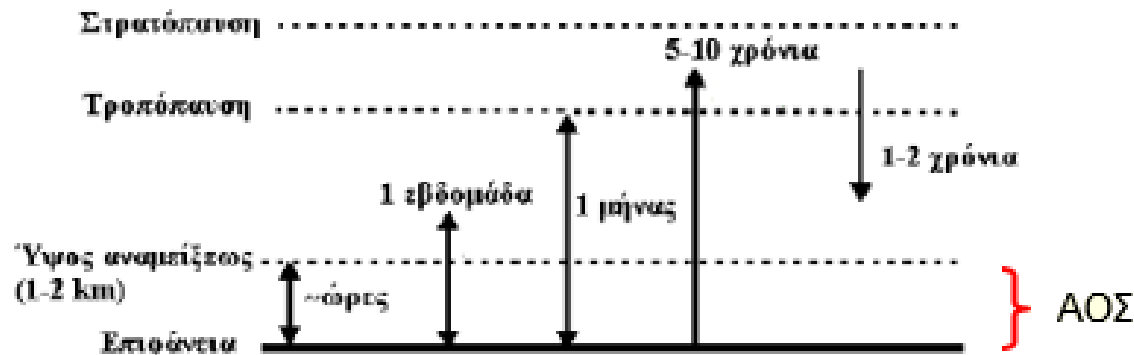
συνάρτηση

Μήκος Monin-Obukhov



Χαρακτηριστικά του ΑΟΣ (1/2)

χρονικές κλίμακες για την κατακόρυφη μεταφορά των ρύπων



Το ΑΟΣ είναι συνέχεια **τυρβώδες**, πολύ καλά **αναμειγμένο** και **ανταποκρίνεται γρήγορα** στις αλλαγές που συμβαίνουν στην γήινη επιφάνεια και στις χωρικές ανομοιομορφίες. Η επίδραση της επιφανειακής τριβής και της θέρμανσης διαδίδεται ταχύτατα σε όλο το ΑΟΣ μέσω του μηχανισμού της τυρβώδους μεταφοράς ή της ανάμειξης (όπως μεταφέρονται και ορμή, θερμότητα και μάζα).

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurpx>, 16/07/2015.



Χαρακτηριστικά του ΑΟΣ (2/2)

Αιτία δημιουργίας: Τριβή που εξασκεί το έδαφος στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

- Πάχος που μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας 500-2000 m.
- Απόκριση σε μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας σε $t < 1h$.
- Συσσώρευση ρύπων.

Επιφανειακό στρώμα: Πάχος 10 % του οριακού στρώματος, μεγάλη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος.

Στρώμα ανάμειξης: Ανοδικές και καθοδικές κινήσεις που ευνοούν τη μείξη των ρύπων λόγω τυρβώδους διάχυσης.

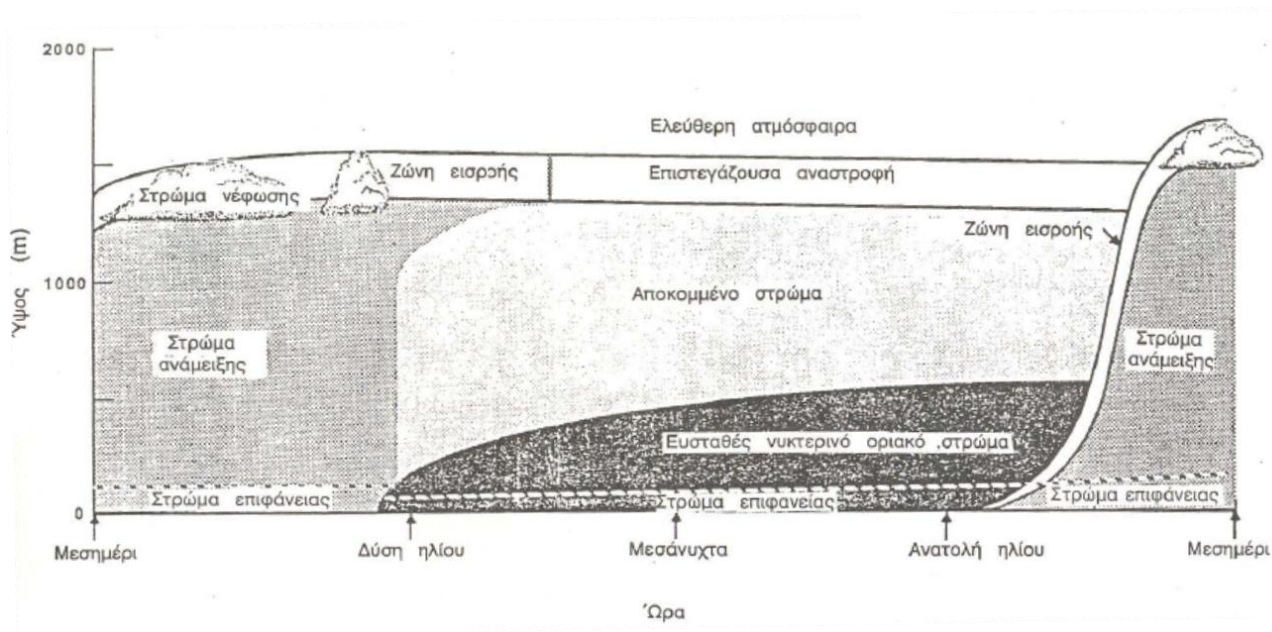
Ύψος ανάμειξης: Επίδραση τριβής στην ταχύτητα του ανέμου και στη μείξη των ουσιών ως κάποιο ύψος (μεταβλητό).

Κορυφή στρώματος ανάμειξης: Συνήθως ύπαρξη θερμοκρασιακής αναστροφής.



Διακριτές περιοχές ΑΟΣ

1. Στρώμα ανάμειξης.
2. Αποκομμένο στρώμα.
3. Ευσταθές νυκτερινό οριακό στρώμα.



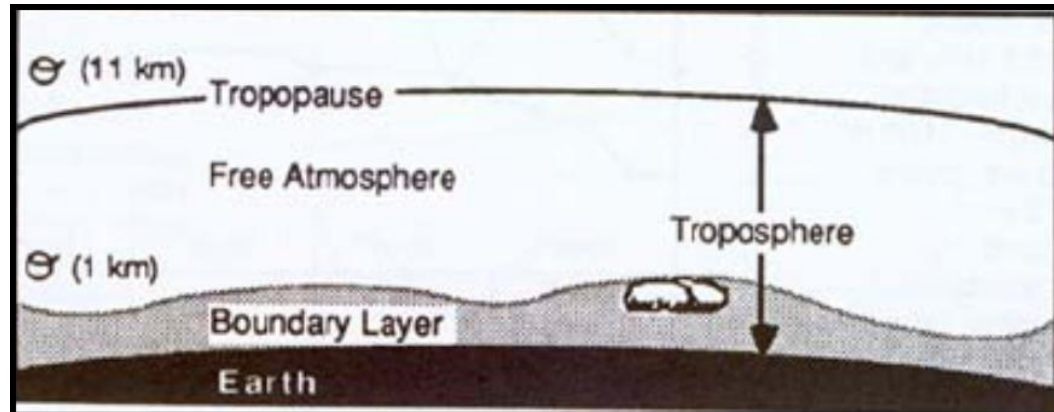
Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 16/07/2015.



Πάχος του ΑΟΣ

Παράγοντες που επιδρούν στο πάχος του ΑΟΣ:

- Ηλιοφάνεια και ώρα της ημέρας (θέρμανση εδάφους).



- Ανάγλυφο-μορφολογία του εδάφους: Πάνω από ξηρά και θάλασσα γενικά το ΑΟΣ είναι **λεπτότερο** στις περιοχές υψηλών πιέσεων απ' ότι στις περιοχές χαμηλών πιέσεων.

- Ύπαρξη αέριων μαζών που κινούνται οριζόντια (μέτωπα, θαλάσσια αύρα).

Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayurpx>, 16/07/2015.

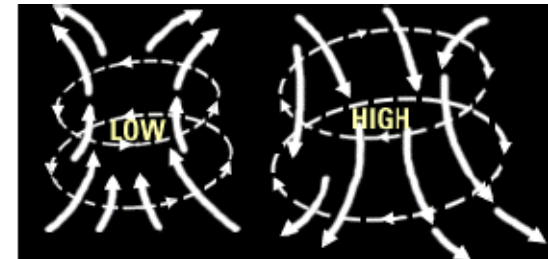


Πάχος του ΑΟΣ

Το ΑΟΣ είναι πιο ρηχό στην περίπτωση πεδίου υψηλών βαρομετρικών πιέσεων από ότι στην περίπτωση που επικρατεί χαμηλό βαρομετρικό.

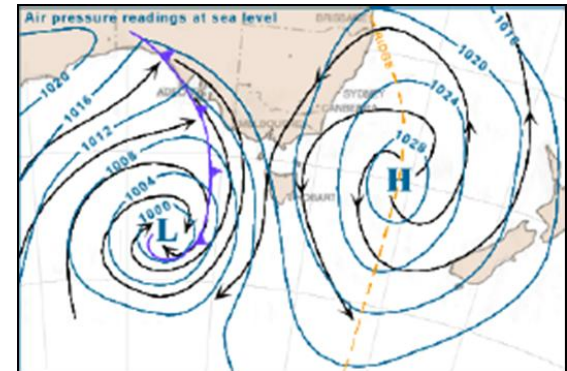
Σύστημα υψηλής πίεσης

- κατακόρυφα καθοδική κίνηση.
- οριζόντια απόκλιση.



Σύστημα χαμηλής πίεσης

- κατακόρυφα ανοδική κίνηση \Rightarrow μεταφορά αερίων μαζών μακριά από το έδαφος σε μεγάλο υψόμετρο.
- οριζόντια σύγκλιση.



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 16/07/2015.



Στρώμα ανάμειξης

- Το **στρώμα ανάμειξης** (mixed layer) χαρακτηρίζεται από την **τυρβώδη φύση** του και την **έντονη μεικτικότητα** (οι κύριες μεταβλητές λόγω της μεγάλης έντασης της τύρβης, π.χ. θερμοκρασία, υγρασία, συγκέντρωση ρύπων, είναι σε μεγάλο βαθμό σταθερές).
- Είναι γνωστό επίσης σαν «ΑΟΣ κατακόρυφων κινήσεων» (convective boundary layer) ή ασταθές ΑΟΣ.
- Οι τυρβώδεις κινήσεις μπορούν να προέλθουν από μηχανικές διεργασίες (**δυναμική αστάθεια**) ή από ανοδικές κινήσεις λόγω διαφοράς πυκνότητας (**στατική αστάθεια**).
- Προϋπόθεση για την εμφάνιση δυναμικής αστάθειας είναι η στατική αστάθεια, δηλ. **αρνητική** τιμή του αριθμού Richardson.
- Μερικές φορές η μία διεργασία υπερισχύει.



Εξαναγκασμένη και ελεύθερη συναγωγή

- Όταν υπερिशύουν οι διεργασίες ανοδικών κινήσεων λόγω θέρμανσης του εδάφους (επομένως και διαφοράς πυκνότητας), η κατακόρυφη ανάμειξη οφείλεται κυρίως σε **ελεύθερη συναγωγή**.
 - Παρατηρείται πάνω από την ξηρά τις ηλιόλουστες ημέρες με ασθενείς ανέμους.
- Όταν υπερिशύουν οι μηχανικές διεργασίες, δηλ. η παραγωγή τύρβης παράγεται αποκλειστικά λόγω διάτμησης, τότε φαινόμενα μεταφοράς στο ΑΟΣ έχουν τον χαρακτήρα της **εξαναγκασμένης συναγωγής**.
 - Παρατηρείται στις νεφοσκεπείς ημέρες με εντονότερους ανέμους.



Ημερήσια διακύμανση του ΑΟΣ (1/3)

Στη διάρκεια μιας καθαρής από σύννεφα ημέρας, μετά την ανατολή του ηλίου, λόγω θέρμανσης της επιφάνειας της γης από τον ήλιο και της συνεπαγόμενης «θερμικής ανάμειξης» στο ΑΟΣ:

- το πάχος του ΑΟΣ αυξάνει σταθερά όσο προχωρά η ημέρα και
- λαμβάνει μια μέγιστη τυπική τιμή της τάξης του 1,5 km (εύρος 1–2 km) αργά μετά το μεσημέρι.

Αντίθετα το βράδυ και κατά τη διάρκεια της νύχτας η εκπομπή ακτινοβολίας από τη γήινη επιφάνεια και η σταδιακή ψύξη της έχουν σαν αποτέλεσμα:

- την εξασθένηση της τυρβώδους ανάμειξης και
- τη συρρίκνωση του πάχους του ΑΟΣ έως μια τυπική τιμή της τάξης των 150 m (εύρος 50 – 300 m).



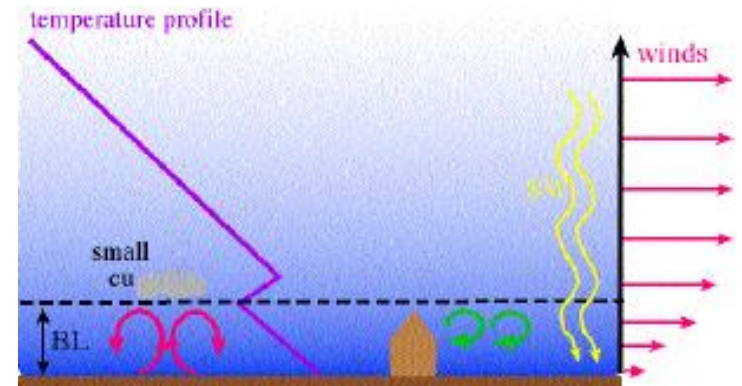
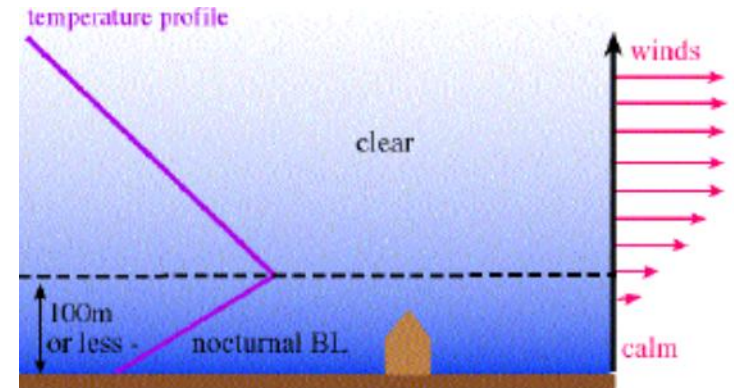
Ημερήσια διακύμανση του ΑΟΣ (2/3)

6AM:

- Νυχτερινό οριακό στρώμα (ΟΣ) πάνω από το έδαφος λόγω θερμοκρασιακής αναστροφής.
- Δεν υπάρχει θερμικά παραγόμενη τύρβη.
- Μικρή μηχανικά παραγόμενη τύρβη λόγω ασθενών επιφανειακών ανέμων.
- Ασθενείς επιφανειακοί άνεμοι που αυξάνουν σε ένταση πάνω από το νυχτερινό ΟΣ.

11AM:

- Η θέρμανση της επιφάνειας οδηγεί στο σχηματισμό «θερμών στροβίλων»:
 - Ασθενής έως μέτριας έντασης τύρβη λόγω θέρμανσης.
 - Δημιουργία νέφωσης (cumulus).
 - Κατακόρυφη ανάπτυξη του ΟΣ.
- Λόγω θέρμανσης του εδάφους και μηχανικής τύρβης ο επιφανειακός άνεμος αυξάνεται.



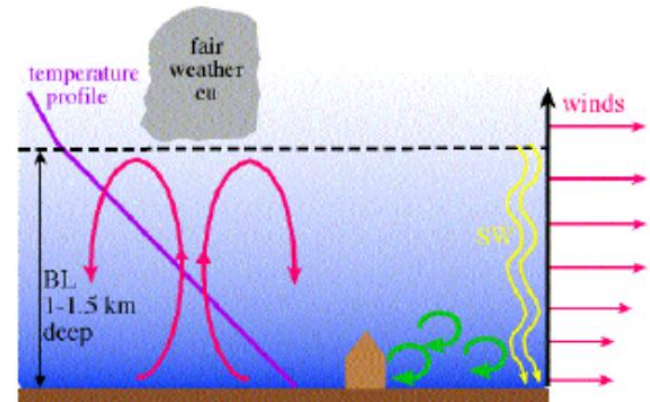
Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 16/07/2015.



Ημερήσια διακύμανση του ΑΟΣ (3/3)

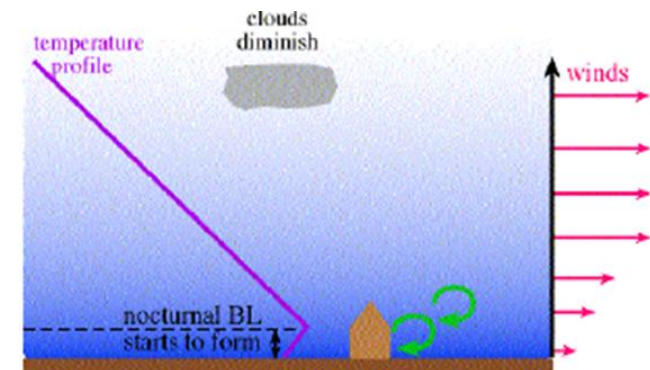
3 PM:

- Μεγιστοποίηση της θέρμανσης του εδάφους.
- Μέγιστη ένταση θερμικά παραγόμενης τύρβης και δημιουργία νέφωσης (cumulus).
- «Θερμοί στρόβιλοι» => ισχυροί επιφανειακοί άνεμοι => μεγαλύτερη σε ένταση μηχανική τύρβη.
- Το οριακό στρώμα έχει πάχος 1-2 km.
- Λόγω της θερμικά και μηχανικά παραγόμενης τυρβώδους ροής το ΑΟΣ είναι ομοιογενές.



6 PM:

- Η θέρμανση της επιφάνειας μειώνεται:
 - Η επιφανειακή θερμοκρασία μειώνεται.
 - Η θερμικά παραγόμενη τύρβη περιορίζεται καθώς και η αντίστοιχη νέφωση.
 - Αρχίζει η ανάπτυξη νυχτερινού ΟΣ.
- Οι άνεμοι στην επιφάνεια μειώνονται.
- Η μηχανικά παραγόμενη τύρβη εξασθενεί με το χρόνο.



Πηγή: <http://eclass.auth.gr/modules/document/document.php?course=MENG352&openDir=/4ac62a0ayupx>, 16/07/2015.



Εκτίμηση του ύψους ανάμειξης του ΑΟΣ (1/2)

Υποθέτουμε ότι κατά την ανατολή του ήλιου επικρατεί ευσταθής θερμοβαθμίδα με $\gamma < \gamma_0$, $\gamma = \text{const.}$

$$T(z,0) = T_A - \gamma z \quad (1)$$

Μετά από χρονική στιγμή t θεωρούμε ότι η θερμοκρασία μεταβάλλεται με το ύψος από μια αρχική θερμοκρασία $T_0(t)$ στο έδαφος με την ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα:

$$T(z,t) = T_0(t) - \gamma_0 z \quad (2)$$

για $0 < z \leq H(t)$, όπου $H(t)$ είναι το ύψος ανάμειξης τη χρονική στιγμή t :

$$(1), (2) \Rightarrow T(z,t) - T(z,0) = T_0(t) - T_A - (\gamma_0 - \gamma) z \quad (3)$$

$$\text{Για } z = H(t): T_0(t) - \gamma_0 H(t) = T_A - \gamma H(t) \Rightarrow T_0(t) - T_A = (\gamma_0 - \gamma) H(t) \quad (4)$$

$$(3), (4) \Rightarrow T(z,t) - T(z,0) = (\gamma_0 - \gamma) H(t) - (\gamma_0 - \gamma) z \Rightarrow T(z,t) - T(z,0) = (\gamma_0 - \gamma) [H(t) - z] \quad (5)$$



Εκτίμηση του ύψους ανάμειξης του ΑΟΣ (1/2)

Η παρεχόμενη θερμική ενέργεια (αισθητή θερμορροή) που αποδίδει το έδαφος στην ατμόσφαιρα είναι:

$$Q_a = Q_{a, \max} \sin(\pi t / T_d) \quad (6)$$

Διάρκεια ηλιοφάνειας

Από το ισοζύγιο ενέργειας προκύπτει:

$$\rho c_p \int_0^H T(z, t) dz - T(z, 0) dz = \int_0^t Q_a dt = E$$

$$(5) \Rightarrow \rho c_p (\gamma_0 - \gamma) [H(t)]^2/2 = Q_{a, \max} (2T_d/\pi) \sin^2(\pi t / 2T_d)$$

ύψος
ανάμειξης

$$H(t) = H_{\max} \sin \frac{\pi t}{2 T_d}$$

$$H_{\max} = \left[\frac{4 Q_{a, \max} T_d}{\pi \rho c_p (\gamma_0 - \gamma)} \right]^{1/2}$$



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=ME NG352&openDir=/4ac62a0ayurx>, 16/07/2015.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Μουσιόπουλος Νικόλαος. «Ατμοσφαιρική Ρύπανση. Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα». 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



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



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.

