

Υδρομετεωρολογία Κατακρημνίσεις

Νίκος Μαμάσης και Δημήτρης Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα 2002

ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ:

Κατακρημνίσεις

★ ΦΥΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

★ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

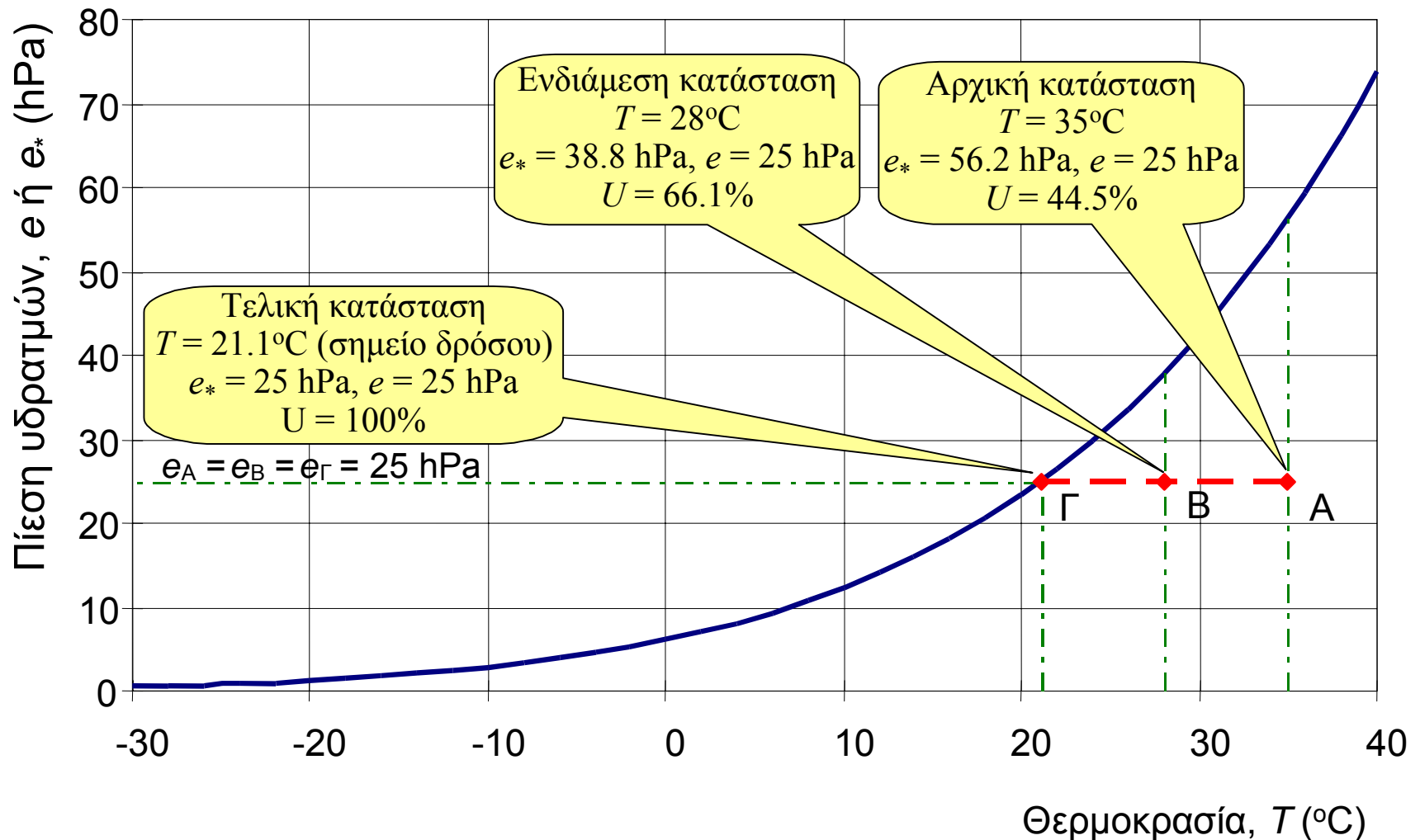
★ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

★ ΤΕΧΝΗΤΗ ΒΡΟΧΗ (σπορά νεφών)

★ ΕΙΔΗ ΝΕΦΩΝ

ΦΥΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΩΝ

ΣΧΕΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΥΔΡΑΤΜΩΝ, ΠΙΕΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ, ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ, ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟΥ ΔΡΟΣΟΥ



ΦΥΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΩΝ

ΓΕΝΕΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΩΝ

- ★ Δημιουργία θερμοδυναμικής κατάστασης κορεσμού των υδρατμών. Σχεδόν πάντα είναι αποτέλεσμα της διόγκωσης και ψύξης του εμπλουτισμένου σε υγρασία αέρα κατά την ανοδική πορεία του. Η ανοδική κίνηση ευνοείται σε συνθήκες *ασταθούς ατμόσφαιρας*, δηλαδή σε συνθήκες απότομης μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα με το υψόμετρο
- ★ Συμπύκνωση των υδρατμών σε λεπτά σταγονίδια ενδεικτικής μέσης διαμέτρου 10 ως 30 μm ή μικρούς κρυστάλλους (ανάλογα με τη θερμοκρασία που επικρατεί). Για να πραγματοποιηθεί απαιτείται η διεργασία της *πυρηνοποίησης*

ΠΥΡΗΝΟΠΟΙΗΣΗ (NUCLEATION PROCESS). Η δράση ειδικών σωματιδίων (πυρήνες) κατά την υγροποίηση των υδρατμών στα νέφη. Η υγροποίηση απαιτεί τη δημιουργία διεπιφάνειας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης και άρα την ύπαρξη υγροσκοπικών πυρήνων. Η διεργασία έχει μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις και πραγματοποιείται δυσκολότερα αν ο πυρήνας αποτελείται από μόρια νερού (ομογενής πυρηνοποίηση). Αντίθετα η διεργασία ευνοείται αν ο πυρήνας έχει διαφορετική προέλευση όπως σκόνη, προϊόντα καύσης, κρύσταλλοι άλατος (ετερογενής πυρηνοποίηση).

- ★ Εντυπωσιακή αύξηση της μάζας των σταγόνων (ή των κρυστάλλων πάγου) σε μεγέθη κατακρημνίσιμα. Η αύξηση μπορεί να είναι 10^6 φορές και πραγματοποιείται μέχρις ότου οι δυνάμεις βαρύτητας της μεμονωμένης σταγόνας υπερνικήσουν την αιώρηση που της δημιουργεί η τυρβώδης διάχυση (διεργασίες *σύμφυσης των σταγονιδίων - ανάπτυξης των παγοκρυστάλλων*)

ΣΥΜΦΥΣΗ ΝΕΦΟΣΤΑΓΟΝΙΔΙΩΝ (COALESCENCE PROCESS). Ο σχηματισμός μιας μόνον υγρής σταγόνας από την ένωση δύο ή περισσότερων σταγόνων που συγκρούονται. Η διεργασία πραγματοποιείται στα *θερμά νέφη*, όπου με τις συγκρούσεις μεταξύ των νεφοσταγονιδίων επιτυγχάνεται ο πολλαπλασιασμός της μάζας τους σε κατακρημνίσιμα μεγέθη.

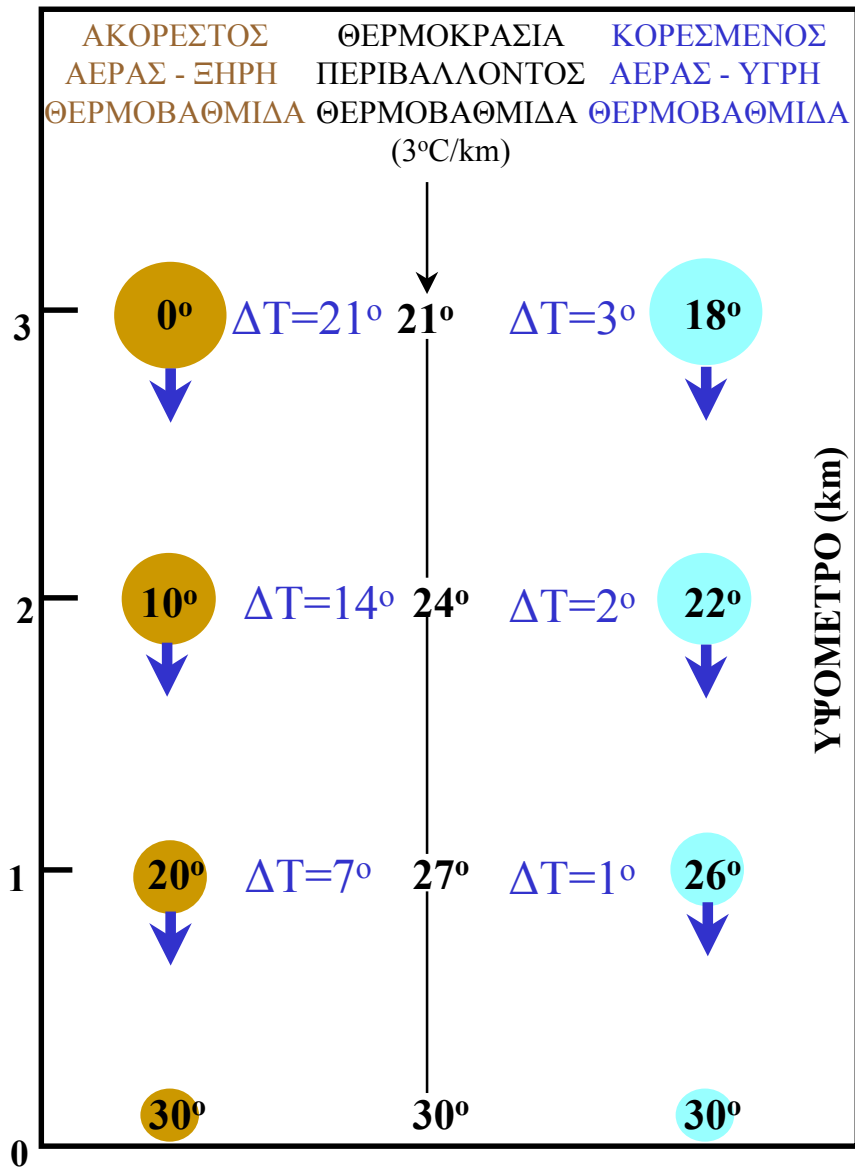
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΓΟΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ (ICE CRYSTAL PROCESS). Η επαύξηση της μάζας των παγοκρυστάλλων με την απορρόφηση των γειτονικών υγρών σταγόνων. Η διεργασία πραγματοποιείται στα *ψυχρά νέφη*, όπου σε θερμοκρασίες μικρότερες του μηδενός συνυπάρχουν παγοκρύσταλλοι με νεφοσταγονίδια. Όταν τα τελευταία παγώνουν πριν ενωθούν με τους παγοκρυστάλλους έχουμε την διεργασία της *πρόσφυσης* (accretion)

- ★ Συνεχής τροφοδότηση με νέους υδρατμούς, ώστε να συντηρηθούν επί αρκετό χρόνο οι διεργασίες των τριών προηγούμενων βημάτων

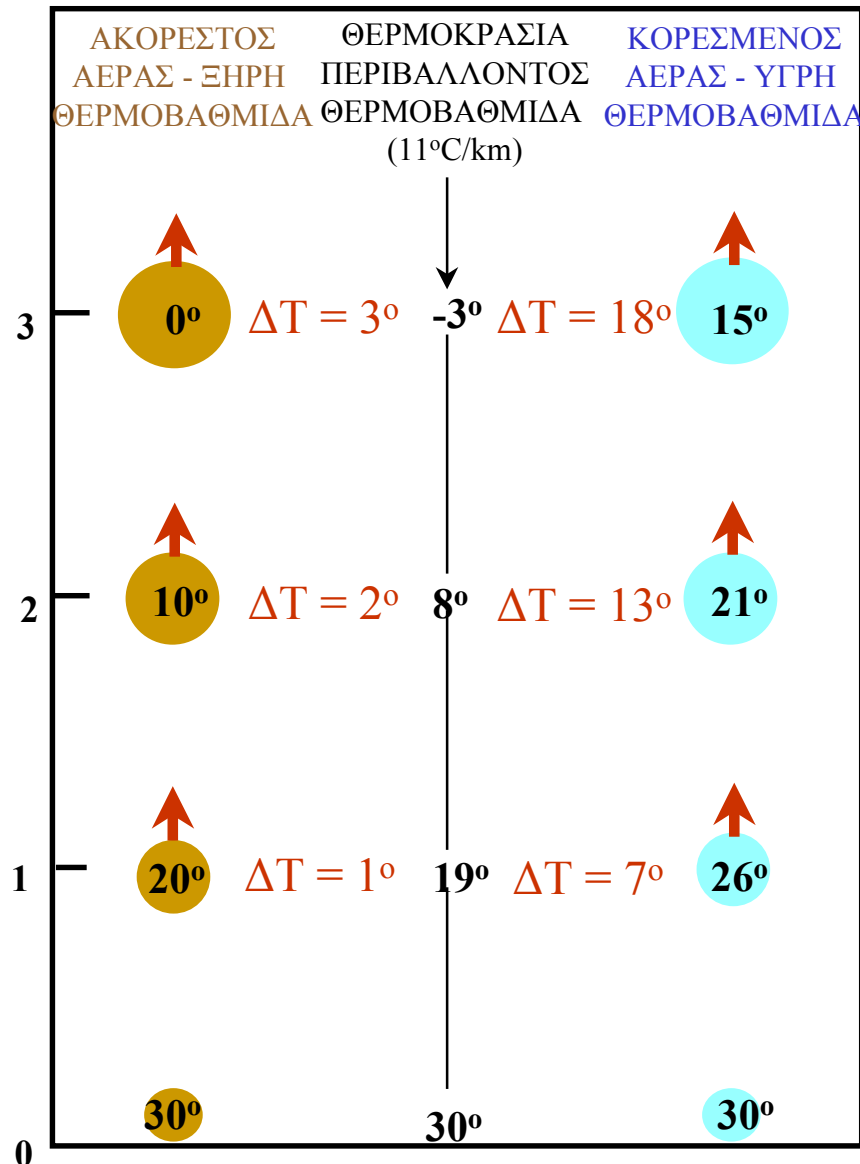
ΦΥΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΩΝ

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

Ευσταθής ατμόσφαιρα



Ασταθής ατμόσφαιρα



ΦΥΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΩΝ

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΙΩΡΗΜΑΤΑ

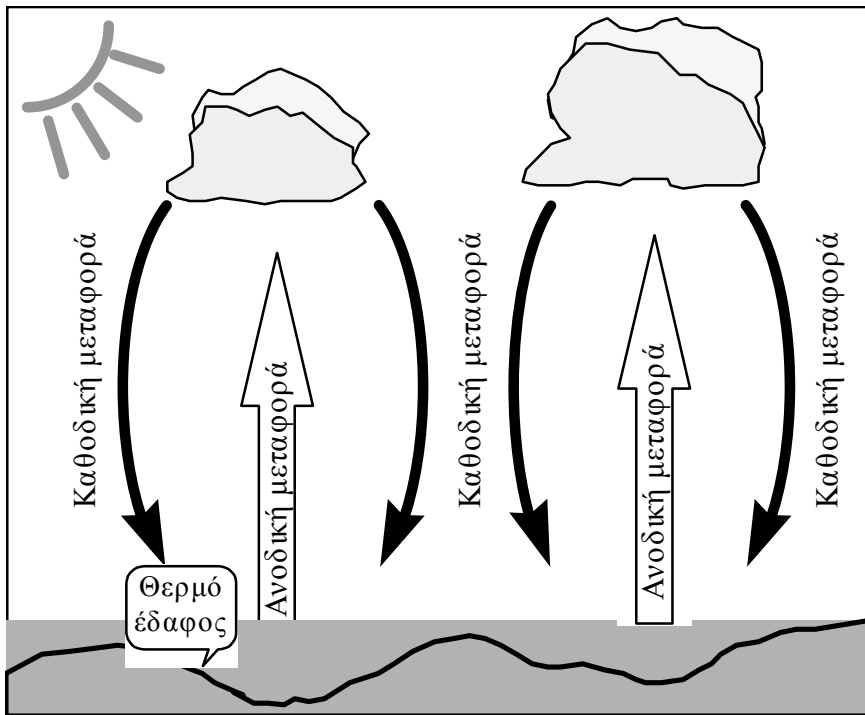
Τα υγρά και στερεά σωματίδια που βρίσκονται σε πολύ μεγάλο αριθμό στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Έχουν πολύ μικρό μέγεθος (ακτίνα 10^{-3} - $10 \mu\text{m}$) και πέφτουν αργά ώστε να θεωρηθούν κατακρήμνιση. Ανάλογα με το μέγεθός τους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: **πυρήνες του Aitken** (ακτίνα $< 0.1 \mu\text{m}$), **μεγάλους πυρήνες** (ακτίνα $0.1-1.0 \mu\text{m}$), και **γιγάντιους πυρήνες** (ακτίνα $> 1 \mu\text{m}$). Κυρίως οι δύο πρώτες κατηγορίες σωματιδίων αποτελούν τους απαραίτητους πυρήνες για να πραγματοποιηθεί η διεργασία της συμπύκνωσης των υδρατμών στα νέφη. Τα σωματίδια αυτά εισέρχονται στην ατμόσφαιρα με φυσικές και τεχνητές καύσεις, από την έκρηξη ηφαιστειών, από μετατροπές αερίων σε σωματίδια, από την εισροή σωματιδίων αλατιού στην ατμόσφαιρα όταν οι φουσαλίδες σπάνε στην επιφάνεια της θάλασσας, και από την άνοδο σκόνης στις ερήμους όταν επικρατούν ισχυροί άνεμοι

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΝΕΦΟΣΤΑΓΟΝΙΔΙΩΝ (Πηγή: Wallace and Hobbs-1977)

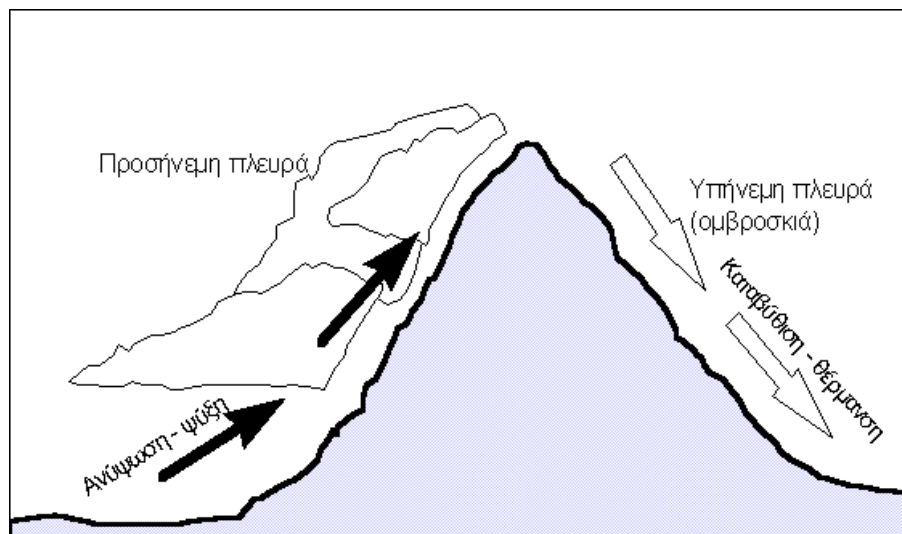
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΚΤΙΝΑ (μm)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (αριθμός/l)	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΤΩΣΗΣ (cm/s)
Πυρήνες συμπύκνωσης	0.1	10^6	0.00001
Τυπικό νεφοσταγονίδιο	10	10^6	1
Μεγάλο νεφοσταγονίδιο	50	10^3	27
Κατακρημνίσσιμο μέγεθος	100		70
Τυπική σταγόνα βροχής	1000	1	650

ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΩΝ

ΜΕΤΑΓΩΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΙΣ

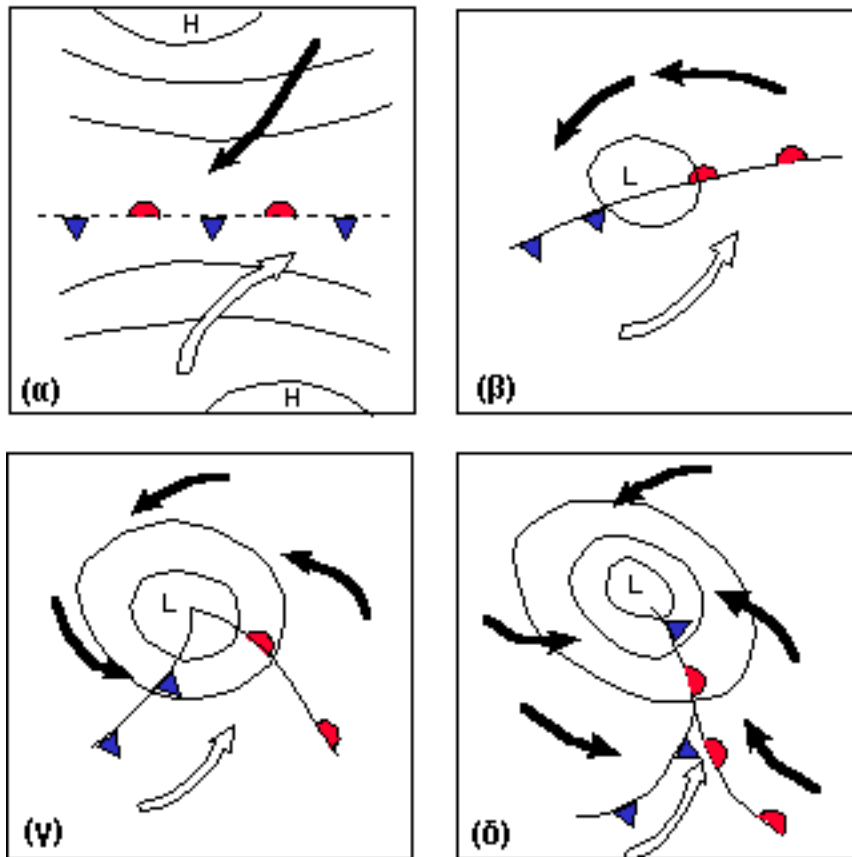


ΟΡΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΙΣ

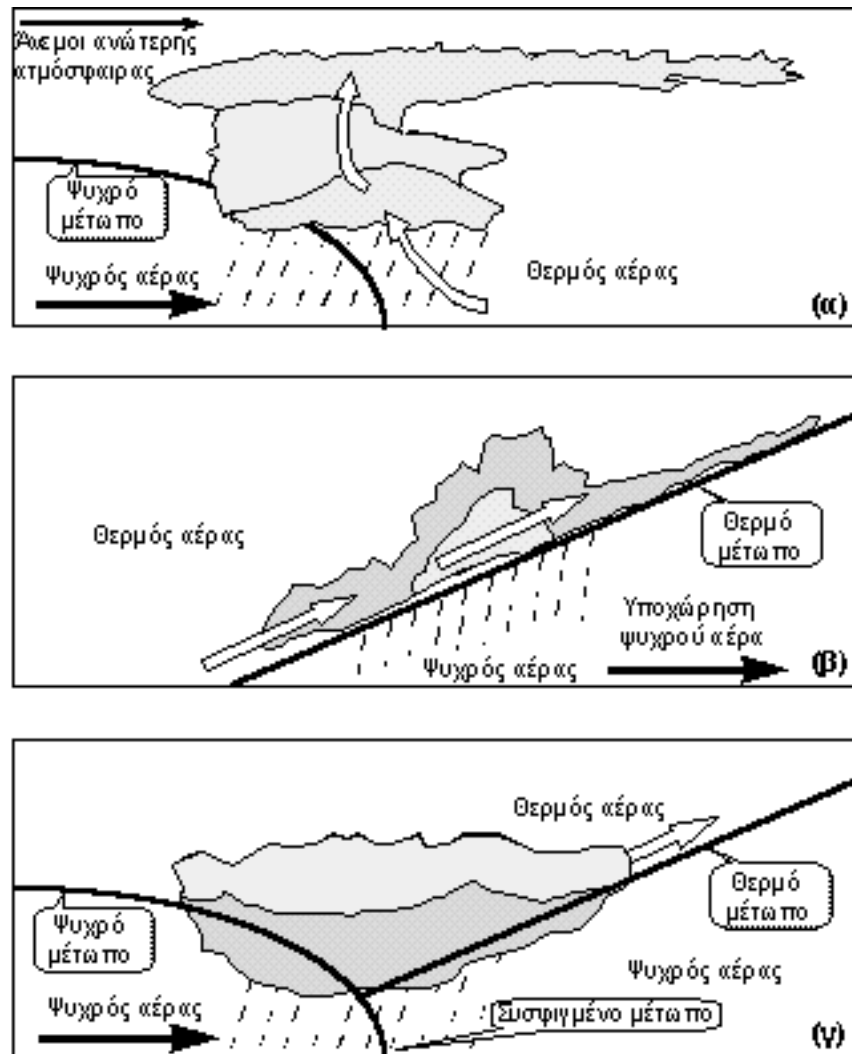


ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΩΝ

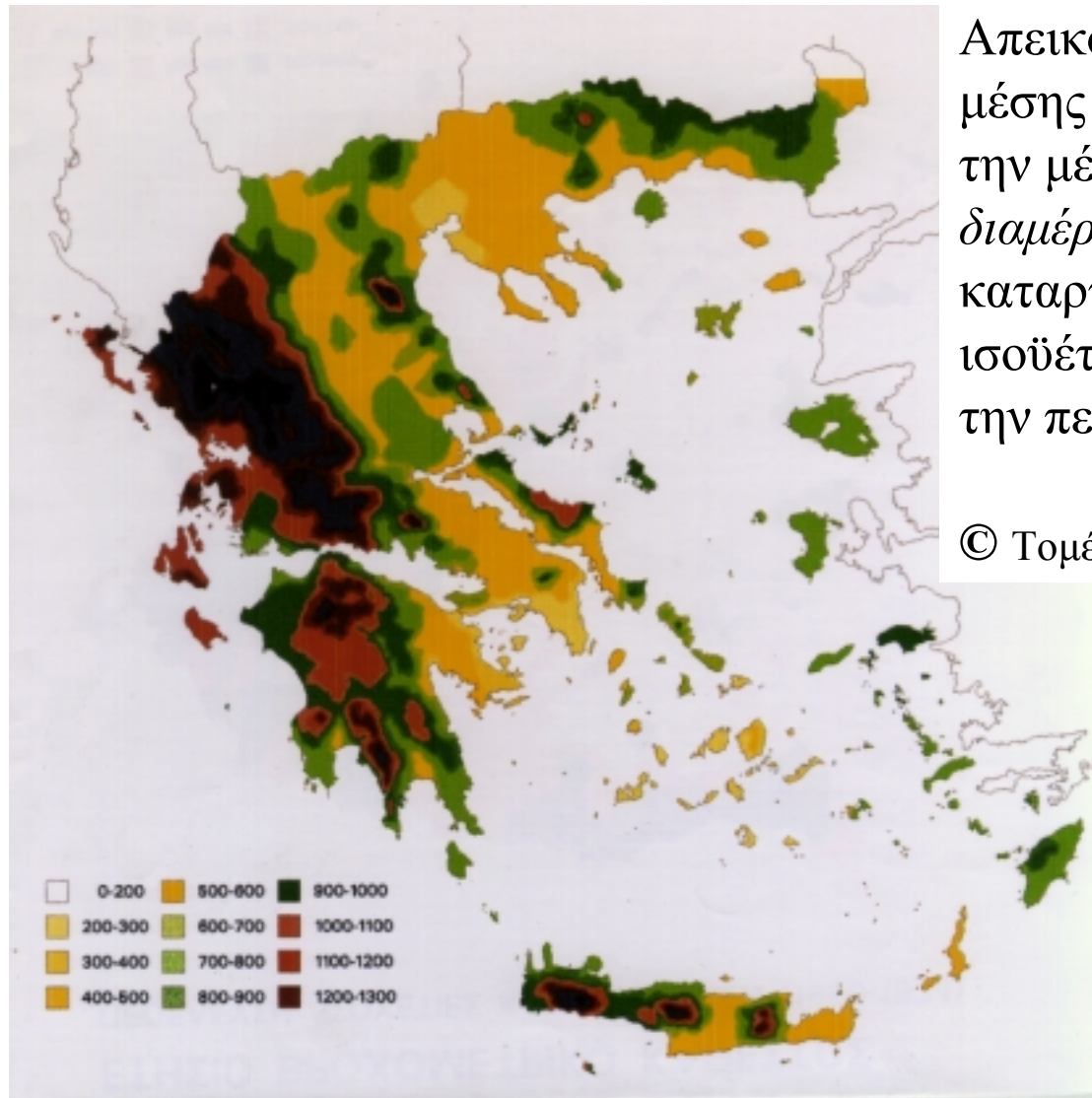
ΣΤΑΔΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΚΛΩΝΑ (ΒΟΡΕΙΟ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΟ)



ΨΥΧΡΟ, ΘΕΡΜΟ ΚΑΙ ΣΥΣΦΙΓΜΕΝΟ ΜΕΤΩΠΟ



ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ



Απεικόνιση της επιφάνειας μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, με την μέθοδο της ψηφιδωτής διαμέρισης. Η επιφάνεια καταρτίστηκε με βάση τις ισοϋέτιες καμπύλες της ΔΕΗ για την περίοδο 1950-74.

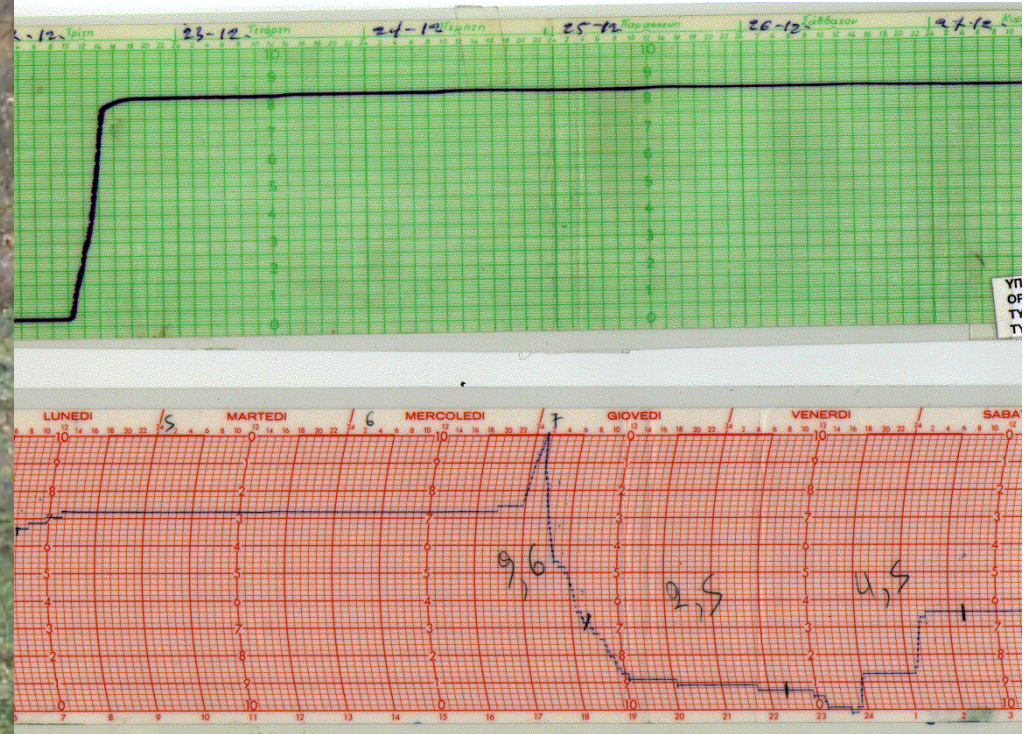
© Τομέας Υδατικών Πόρων

ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ (Συμβατικός τρόπος)

ΒΡΟΧΟΓΡΑΦΟΣ

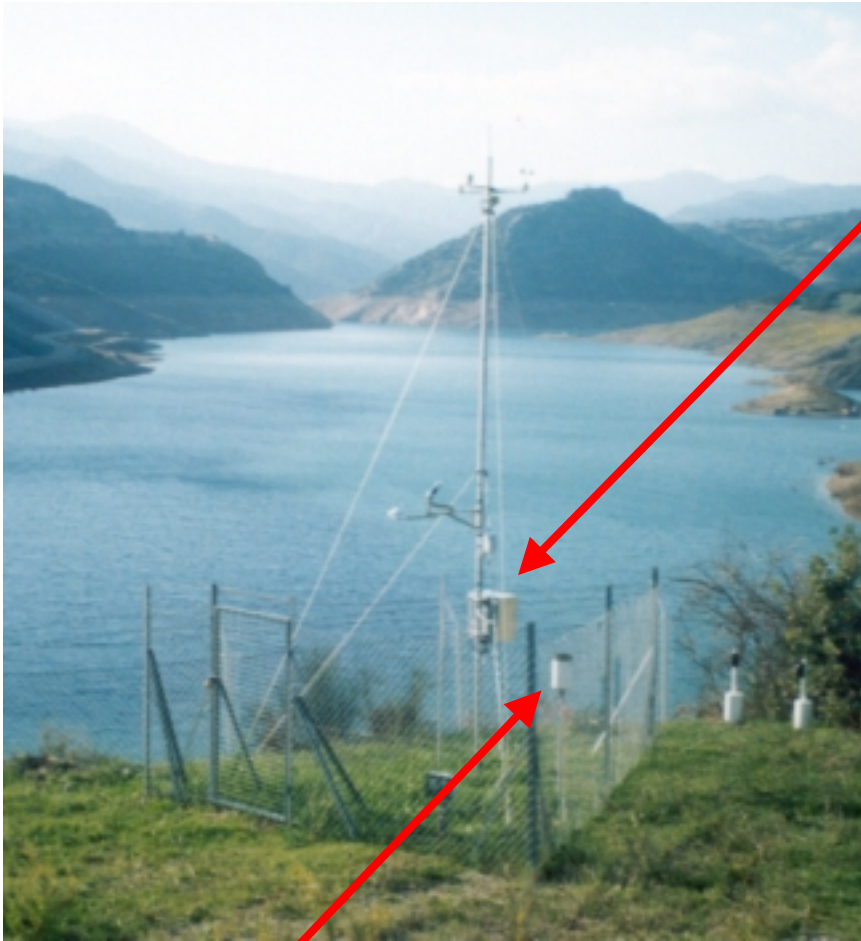


ΤΑΙΝΙΕΣ ΒΡΟΧΟΓΡΑΦΟΥ



ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ (Αυτόματος τρόπος)

ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΚΟΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ



**Αισθητήρας
βροχής**

**Καταχωρητής δεδομένων
(data logger)**

Μεταφορά μετρήσεων σε υπολογιστή
(σε ομαλή λειτουργία μέσω τηλεφωνικής
γραμμής)

Εισαγωγή των
μετρήσεων σε
βάση
δεδομένων.
Έλεγχος,
επεξεργασία
και παραγωγή
χρονοσειρών

Διαδίκτυο

Πρωτογενείς
μετρήσεις σε
πραγματικό χρόνο

Επεξεργασμένες
ιστορικές
χρονοσειρές

ΤΕΧΝΗΤΗ ΒΡΟΧΗ (σπορά νεφών)

- ★ Οι εφαρμογές **τεχνητής βροχής** αποσκοπούν στον τεχνητό εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας σε πυρήνες συμπύκνωσης, οι οποίοι δίνουν το έναυσμα στο σχηματισμό παγοκρυστάλλων και επιταχύνουν έτσι τη συμπύκνωση των υδρατμών.
- ★ **Στα ψυχρά σύννεφα** γίνεται με τη διάχυση ή σπορά, μέσα στο σύννεφο, είτε υπέρψυχρων σωματιδίων (π.χ. ανθρακικοί ανυδρίτες σε θερμοκρασία -80°C) οπότε δημιουργούνται αυτόματα κρυσταλλικοί πυρήνες από την ψύξη των σταγονιδίων που έρχονται σε επαφή μαζί τους, είτε κρυσταλλικών πυρήνων με δομή παραπλήσια των κρυστάλλων πάγου (π.χ. ιωδιούχος άργυρος, AgI).
- ★ **Στα θερμά σύννεφα** χρησιμοποιούνται κυρίως διαχύσεις χλωριούχου νατρίου ή σταγονιδίων νερού.
- ★ **Η υπερσπορά** τεχνητών πυρήνων σε υπέρψυχρα σύννεφα μπορεί να έχει αποτέλεσμα τη μείωση των κατακρημνισμάτων, λόγω της πληθώρας των διαθέσιμων πυρήνων και της συνακόλουθης αποδυνάμωσης της διεργασίας αύξησης της μάζας των σταγονιδίων ή των παγοκρυστάλλων. Η υπερσπορά των νεφών αποτελεί τη βάση των προγραμμάτων αντιχαλαζιακής προστασίας.
- ★ Η διαδικασία σποράς επεμβαίνει μόνο στη διεργασία δημιουργίας σταγονιδίων βροχής. Δεδομένου ότι η πραγματοποίηση υδρολογικά σημαντικών βροχοπτώσεων προϋποθέτει τη συνεχή μεταφορά υδρατμών (κάτι που δεν μπορεί να τροποποιηθεί με ανθρώπινη επέμβαση), γίνεται κατανοητό ότι **η αποτελεσματικότητα της σποράς νεφών στην αύξηση της βροχόπτωσης δεν μπορεί να είναι ιδιαίτερα αξιόλογη.**

ΤΕΧΝΗΤΗ ΒΡΟΧΗ

NEVADA STATE WEATHER MODIFICATION PROGRAM

ΣΤΟΧΟΣ

Αύξηση της χιονόπτωσης σε επιλεγμένες ορεινές περιοχές της Πολιτείας της Νεβάδα, Η.Π.Α έτσι ώστε να αυξηθεί η εαρινή απορροή, και να ενισχυθούν υδρεύσεις, αρδεύσεις και τα αποθέματα φυσικών λιμνών

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Αρχικά ενεργοποιούνται με τηλεχειρισμό γεννήτριες εδάφους, για την απελευθέρωση σωματιδίων AgI, τα οποία δημιουργούν πρόσθετους παγοκρυστάλλους στα νέφη. Ακόμη χρησιμοποιείται ένα αεροσκάφος το οποίο απελευθερώνει AgI ή ξηρό πάγο αν οι κορυφές των νεφών είναι αρκετά θερμές

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ

(α) η νεφοκάλυψη είναι τουλάχιστον 50% στην περιοχή ενδιαφέροντος, (β) τα σύννεφα έχουν σημαντική κατακόρυφη ανάπτυξη και οι βάσεις τους είναι σε χαμηλό υψόμετρο, (γ) κατάλληλες διευθύνσεις ανέμου για μεταφέρουν το υλικό της σποράς, (δ) οι άνεμοι στη στάθμη των 700 hPa να είναι μικρότεροι από 30 m/s έτσι ώστε να διατίθεται ο απαιτούμενος χρόνος για την ανάπτυξη των παγοκρυστάλλων από τη σπορά, (ε) η παρουσία νερού σε υπέρψυχρη μορφή στα σύννεφα, (ζ) η θερμοκρασία στα 3.3 km είναι μικρότερη από -5 °C

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αύξηση των κατακρημνίσεων από 4-10% σε περιοχές έκτασης 300-600 km². Ιδιαίτερα σημαντική η αύξηση στα ξηρά έτη. Το κόστος για ένα κυβικό μέτρο νερού υπολογίζεται σε 1-2 δραχμές

ΤΕΧΝΗΤΗ ΒΡΟΧΗ (σπορά νεφών)



ΕΙΔΗ ΝΕΦΩΝ

ΥΨΗΛΑ ΝΕΦΗ (5-13 km στα μεσαία πλάτη)

Θύσανοι - Cirrus (Ci)

Θυσανοστρώματα - Cirrostratus (Cs)

Θυσανοσωρείτες - Cirrocumulus (Cc)

ΜΕΣΑΙΑ ΝΕΦΗ (2-7 km)

Υψιστρώματα - Altostratus (As)

Υψισωρείτες - Altocumulus (Ac)

ΧΑΜΗΛΑ ΝΕΦΗ (0-2 km)

Στρώματα - Stratus (St)

Στρωματοσωρείτες - Stratocumulus (Sc)

Μελανοστρώματα - Nimbostratus (Ns)

ΝΕΦΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ (0.5-13 km)

Σωρείτες - Cumulus (Cu)

Σωρειτομελανίες - Cumulonimbus (Cb)

ΥΨΗΛΑ ΝΕΦΗ

Θύσανοι - Cirrus (Ci)



ΥΨΗΛΑ ΝΕΦΗ

Θυσανοστρώματα - Cirrostratus (Cs)



ΥΨΗΛΑ ΝΕΦΗ

Θυσανοσωρείτες - Cirrocumulus (Cc)



ΜΕΣΑΙΑ ΝΕΦΗ

Υψιστρώματα - Altostratus (As)



ΜΕΣΑΙΑ ΝΕΦΗ

Υψισωρείτες - Altopcumulus (Ac)



ΧΑΜΗΛΑ ΝΕΦΗ

Στρώματα - Stratus (St)



ΧΑΜΗΛΑ ΝΕΦΗ

Στρωματοσωρείτες - Stratocumulus (Sc)



ΧΑΜΗΛΑ ΝΕΦΗ

Μελανοστρώματα - Nimbostratus (Ns)



ΝΕΦΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Σωρείτες - Cumulus (Cu)



ΝΕΦΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Σωρειτομελανίες - Cumulonimbus (Cb)



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Ahrens, C. D., *Essentials of Meteorology, An Invitation to the Atmosphere*, West Publishing, Minneapolis, 1993.
- Barry, R.G, and R.J. Chorley, *Atmosphere, weather and climate*, Routledge, New York, 1992.
- McIlveen, R., *Fundamentals of Weather and Climate*, Chapman, 1992.
- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, *Atmospheric Science, An Introductory Survey*, Academic Press, San Diego, Ca., 1977.