

ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΞΗ ΧΙΟΝΙΟΥ

Ιωάννης Ναλμπάντης

Περιεχόμενα

- **Εισαγωγή**
- **Μετρικές ιδιότητες**
- **Χιονομετρία**
- **Φυσικές διεργασίες συσσώρευσης - τήξης χιονιού**
- **Κλιματολογικά στοιχεία**
- **Μοντελοποίηση συσσώρευσης - τήξης χιονιού**
- **Εφαρμογές**
- **Βιβλιογραφία**

Σημασία του χιονιού στην υδρολογία (1)

**“ΝΕΙΛΟΥ ΜΕΝ ΑΙΔΕ ΚΑΛΜΠΑΡΘΕΝΟΙ ΡΟΑΙ
ΟΣ ΑΝΤΙ ΔΙΑΣ ΨΑΚΑΔΟΣ ΑΙΓΥΠΤΟΥ ΠΕΔΟΝ
ΛΕΥΚΗΣ ΤΑΚΕΙΣΗΣ ΧΙΟΝΟΣ ΥΓΡΑΙΝΕΙ ΓΥΑΣ”**

Ευριπίδης (412 π.Χ.), *Ελένη*, στίχοι 1-3.

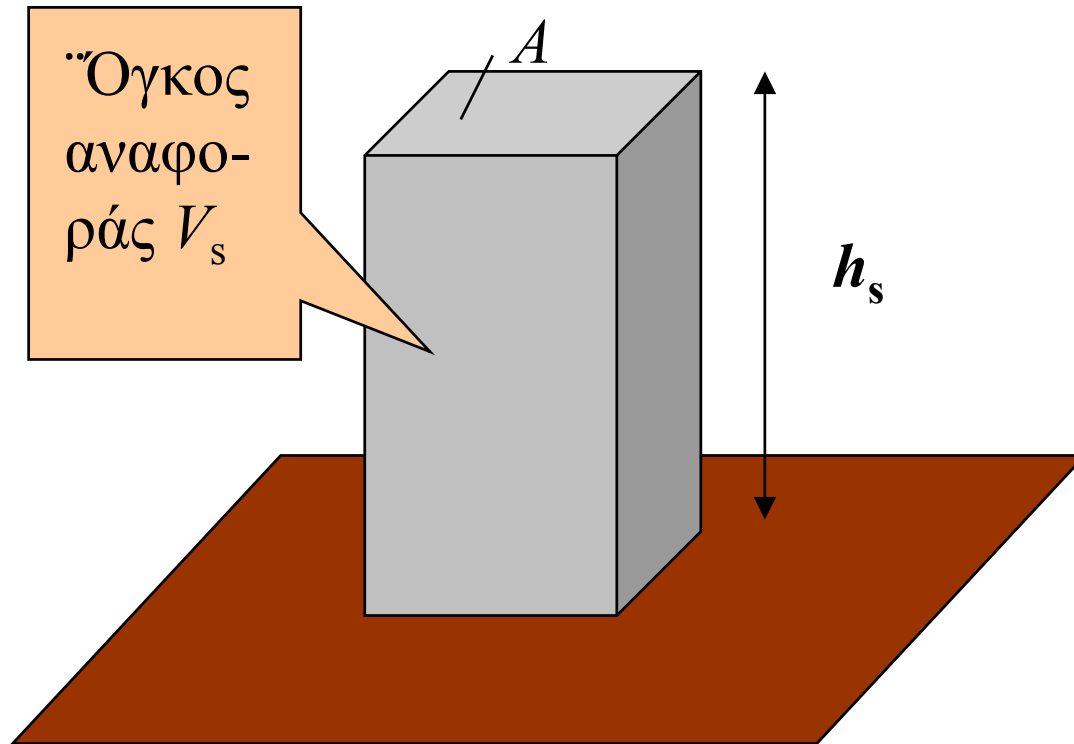
Τήξη χιονιού

- Πηγή επιφανειακού νερού
- Επαναφόρτιση υπόγειων υδροφορέων

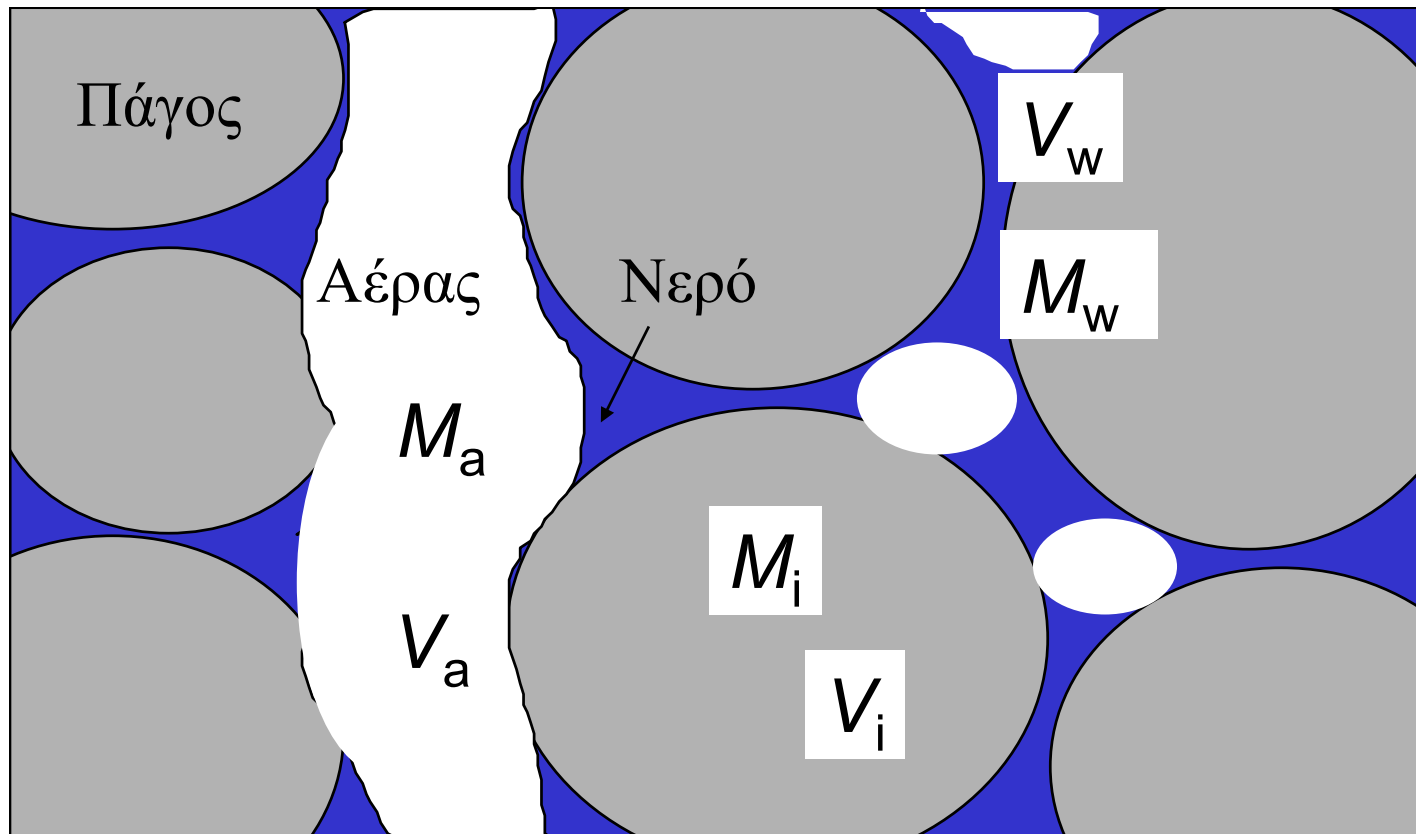
Σημασία του χιονιού στην υδρολογία (2)

- Η προσωρινή αποθήκευση νερού αυξάνει την υστέρηση μεταξύ κατακρήμνισης και απορροής
- Το χιόνι μειώνει τον ρυθμό απορροής και διευκολύνει την επαναφόρτιση των υπόγειων υδροφορέων
- Επιδρά σημαντικά στο κλίμα

Μετρικές ιδιότητες χιονιού ως υλικού



Ιδεατή τομή χιονοκάλυψης



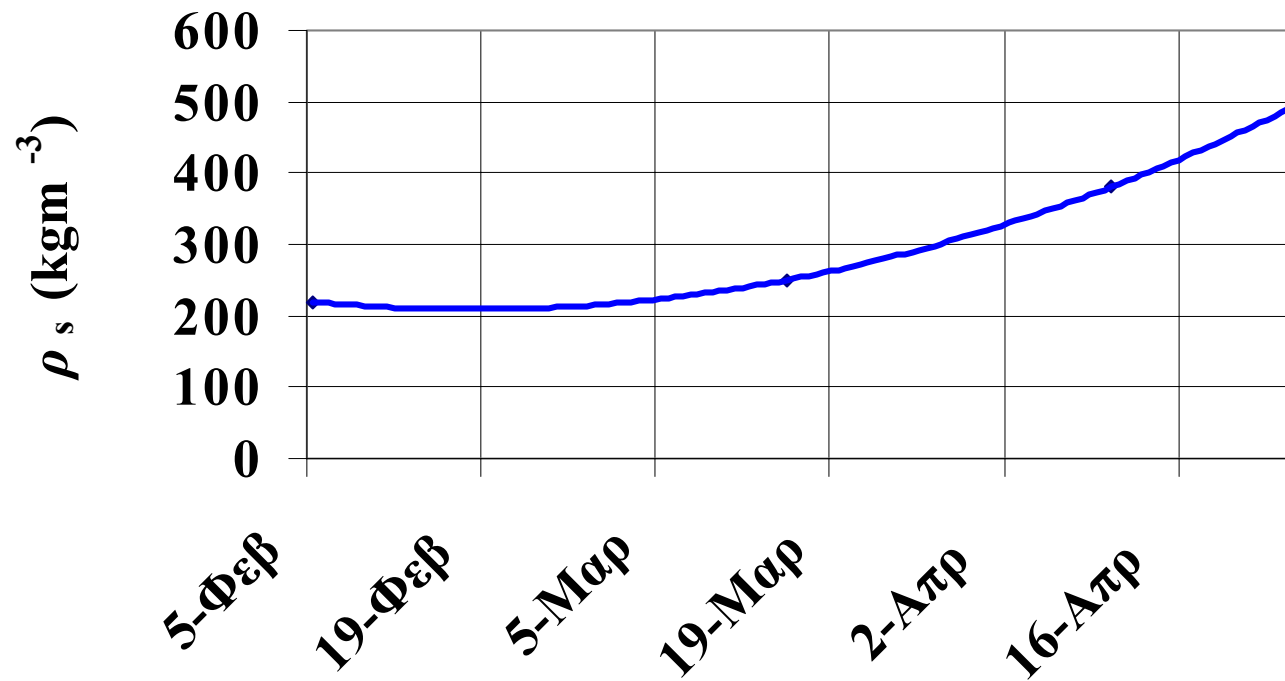
Μετρικές ιδιότητες χιονιού ως υλικού

- Πορώδες: $\phi = (V_a + V_w)/V_s$
- Περιεκτικότητα σε νερό: $\theta = V_w/V_s$
- Πυκνότητα χιονιού $[ML^{-3}]$: $\rho_s = (M_i + M_w)/V_s$
- Ισοδύναμο ύψος νερού $[L]$:
$$h_m = [V_w + V_i(\rho_i/\rho_w)]/A = h_s(\rho_s/\rho_w)$$

όπου $\rho_s/\rho_w =$ σχετική πυκνότητα

 - Μεγέθη: $V =$ όγκος, $M =$ μάζα, $A =$ έκταση,
 $\rho =$ πυκνότητα
 - Δείκτες: $s =$ χιόνι, $i =$ πάγος, $w =$ νερό,
 $a =$ αέρας, $m =$ τήξη

Χρονική μεταβολή της πυκνότητας χιονιού

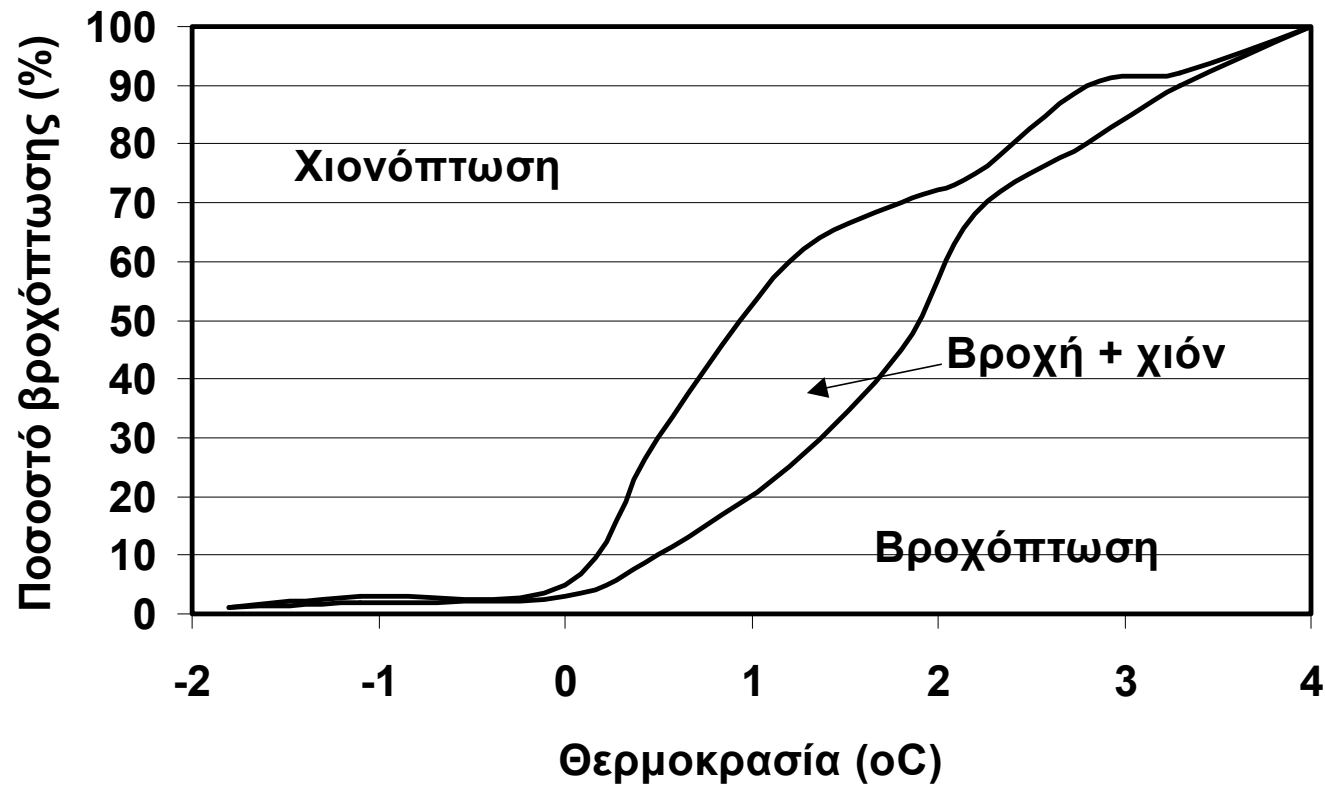


Από περιοχή Manitoba (Dingman, 1994, σ. 162)

Πυκνότητα φρέσκου χιονιού

- **Παράγοντες που επιδρούν αυξητικά**
 - Θερμοκρασία αέρα
 - Ταχύτητα ανέμου
 - Βαθμός υπερκορεσμού του γενεσιουργού νέφους
- **Όρια διακύμανσης: $4 < \rho_s < 340 \text{ kgm}^{-3}$**
- **Συνήθη όρια: $70 < \rho_s < 150 \text{ kgm}^{-3}$**
- **Μέση τιμή για εκτιμήσεις 100 kgm^{-3}**

Συχνότητα εμφάνισης βροχής και χιονιού συναρτήσει της θερμοκρασίας αέρα



Διεργασίες μεταμορφισμού χιονιού (1)

- **Καθίζηση λόγω βαρύτητας**
 - Παράγοντες: βάρος χιονιού, θερμοκρασία, πυκνότητα
 - Αύξηση πυκνότητας 2 - 50 $\text{kgm}^{-3}\text{ημ}^{-1}$
- **Αποικοδομητικός μεταμορφισμός**
 - Δημιουργία πιο σφαιρικών κόκκων
 - Αύξηση πυκνότητας μέχρι και 1% ανά ώρα ως τα 250 kgm^{-3}

Διεργασίες μεταμορφισμού χιονιού (2)

- **Εποικοδομητικός μεταμορφισμός**
 - Σε μικροκλίμακα: απόθεση μορίων νερού μεταξύ κόκκων και δημιουργία “λαιμού“
 - Σε μεγαλύτερη κλίμακα: κλίση θερμοκρασίας, εξάχνωση σε θερμότερες περιοχές, συμπύκνωση σε ψυχρότερες.
 - Ψυχρός αέρας πάνω από λεπτή χιονοκάλυψη: έντονη πτώση θερμοκρασίας προς τα πάνω, έντονη εξάχνωση στη βάση του, δημιουργία πάχνης βάθους (depth hoar) με επίπεδους κρυστάλλους και μικρή αντοχή

Διεργασίες μεταμορφισμού χιονιού (3)

- **Μεταμορφισμός τήξης**
 - Πάγωμα νερού (από τήξη ή βροχόπτωση) σε ψυχρό χιόνι,
 - Δημιουργία στερεού πάγου σε μεγάλες εκτάσεις.
 - Απελευθέρωση θερμότητας, θέρμανση του χιονιού και επιτάχυνση της μεταφοράς υδρατμών
 - Σχηματισμός μεγαλύτερων και στρογγυλεμένων κόκκων (διαμέτρου 1 - 2 mm)
 - Στρωμάτωση στην αρχή της περιόδου τήξης
 - Ομογενοποίηση κατά την τήξη ($\max \rho_s = 350 \text{ kgm}^{-3}$)

Μετρικές ιδιότητες του χιονιού με υδρολογικό ενδιαφέρον

- **Ύψος κατακρήμνισης (precipitation depth) [L]**
- **Ύψος χιονόπτωσης (snowfall depth) [L]**
- **Ύψος χιονοκάλυψης (snow cover depth) [L]**
- **Ύψος τήξης χιονιού (snowmelt depth) [L]**
- **Ύψος απωλειών (ablation) [L]**
- **Ύψος εκροής νερού (water output) [L]**
- **Ισοδύναμο ύψος νερού χιονόπτωσης (snowfall water equivalent) [L]**
- **Ισοδύναμο ύψος νερού χιονοκάλυψης (snow cover water equivalent) [L]**

Μέτρηση κατακρήμνισης



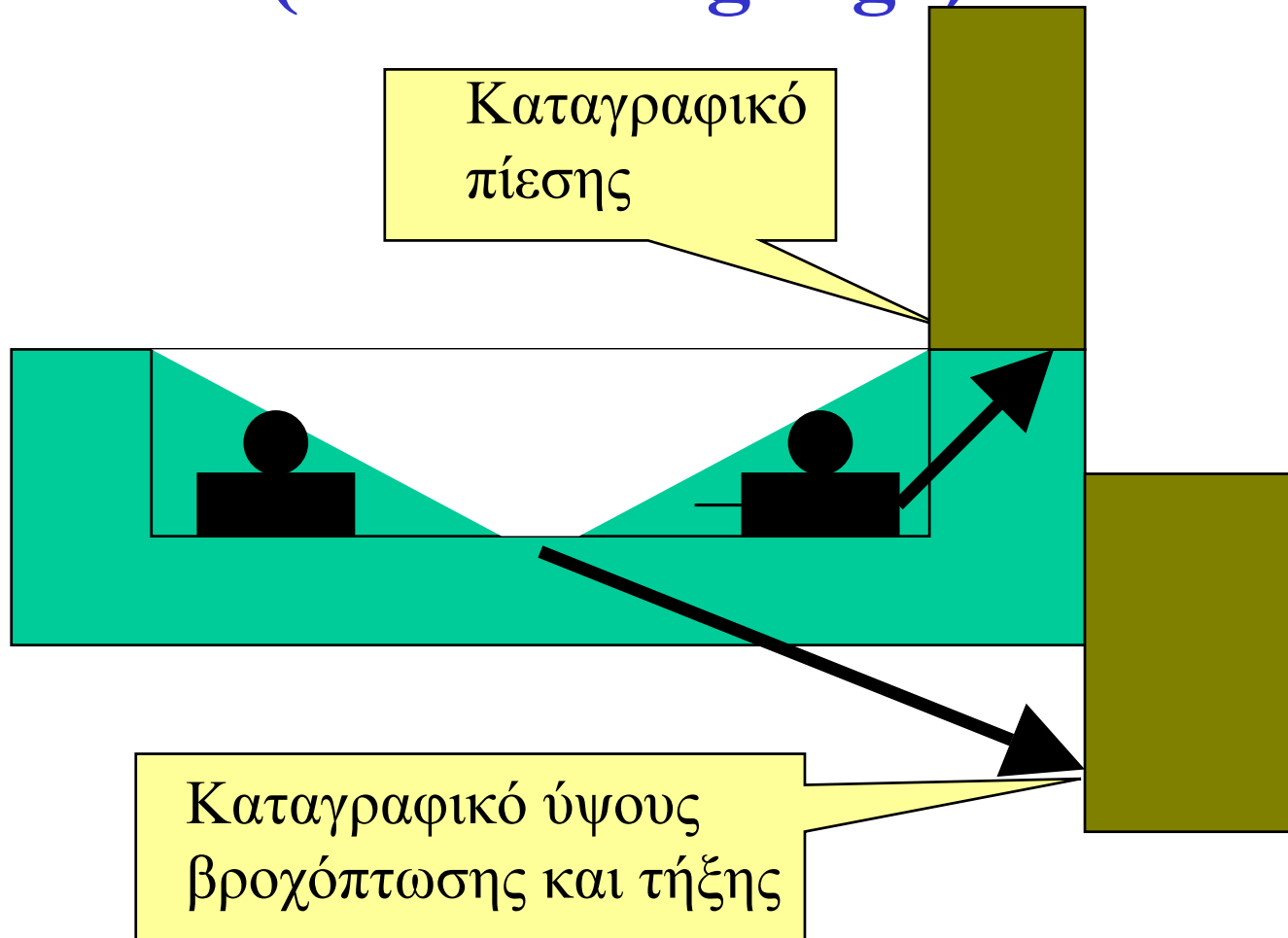
- Σημειακή
- **Σύνηθες βροχόμετρο (ή βροχογράφος)**
- Χιονοβροχόμετρο
- Παγκόσμιος βροχογράφος
- Επιφανειακή
- Ραντάρ καιρού

Σύνηθες
Βροχόμετρο

Χιονοβροχόμετρο



Παγκόσμιος βροχογράφος (Universal gauge)



Μέτρηση κατακρήμνισης με ραντάρ καιρού - Βασικές αρχές

- Πομπός, δέκτης μικροκυμάτων (μήκος κύματος 0.1 ως 10 cm)
- Ισχύς σήματος δέκτη $P = CLZ/r^2$
 - όπου C = σταθερά ραντάρ, L = συντελεστής εξασθένισης σήματος, Z = συντελεστής ανακλαστικότητας ραντάρ, r = απόσταση στόχου
- Σχέση Z - R : $Z = aR^b$ όπου R = κατακρήμνιση
- Προβλήματα: όγκος δεδομένων, μη μονοσήμαντη σχέση Z - R , παρασιτικά σήματα
- Πρόσθετα προβλήματα για τη χιονόπτωση
διαφοροποίηση Z με τη μορφή των νιφάδων

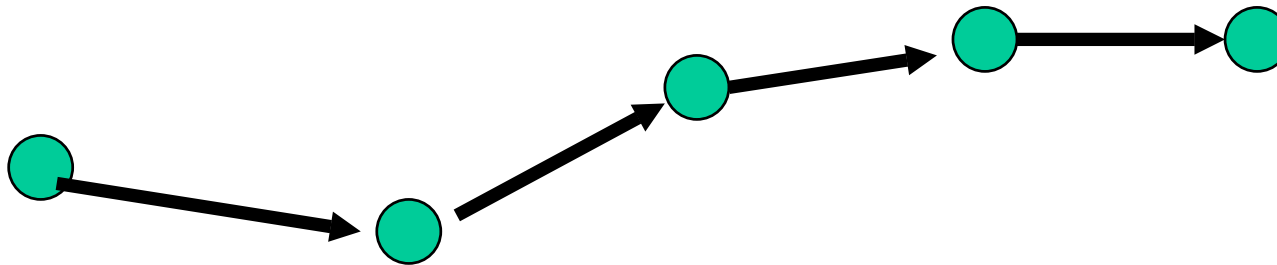
Μέτρηση χιονόπτωσης

- Ύψος χιονόπτωσης
- Σημειακό
- **Χιονοτράπεζα**
(1 m × 1 m), 1 m ύψος
- Ισοδύναμο ύψος νερού (σημειακό)
- **Χιονοτράπεζα (τήξη, ζύγιση)**
- Παγκόσμιος βροχογράφος
- **Μαξιλάρια χιονιού (snow pillows)**
- Επιφανειακό
- **Ραντάρ καιρού**

Μέτρηση μεγεθών χιονοκάλυψης

- Ύψος χιονοκάλυψης (σημειακό)
- **Κινητός πήχης (μπαστούνι χιονιού)**
- **Μόνιμη σταδία**
- Έκταση χιονοκάλυψης
- **Αεροφωτογραφίες**
- **Φωτογραφίες εδάφους**
- **Δορυφορικές εικόνες**
- Ισοδύναμο ύψος νερού (σημειακό)
- **Δειγματολήπτης χιονιού**
- **Διαδρομές χιονομέτρησης (snow courses) 150-250 m, 5 - 6 σημεία**
- **Μαξιλάρια χιονιού (snow pillows)**
- Επιφανειακό
- **Μέτρηση ακτινοβολίας**

Διαδρομές χιονομέτρησης



- 1 Μέτρηση ύψους χιονοκάλυψης με μπαστούνι
- 2 Μέτρηση ισοδύναμου ύψους νερού με δειγματολήπτη (δειγματοληψία, ζύγιση)
- 3 Έλεγχος αποτελεσμάτων - ενδεχόμενη επανάληψη μέτρησης
- 4 Εξαγωγή μέσων όρων μεγεθών χιονοκάλυψης

Μέθοδοι μέτρησης ισοδύναμου ύψους νερού χιονοκάλυψης με βάση την ακτινοβολία

- Με τεχνητή ακτινοβολία
- Πηγή ακτινοβολίας γάμα
→ ανιχνευτής
- Φυσική ακτινοβολία
- Για $h_s < 400$ mm
- Επίγειος ανιχνευτής
- Αερομεταφερόμενος
ανιχνευτής
- Ακτινοβολία μικροκυμάτων
- Τεχνητή ακτινοβολία
– Ραντάρ
- Φυσική ακτινοβολία

Μέτρηση ύψους τήξης, απωλειών και εκροής νερού

- **Ύψος τήξης χιονιού και εκροής νερού**
 - Λυσίμετρο
 - Παγκόσμιος βροχογράφος
 - Μαξιλάρι χιονιού,
- **Ύψος απωλειών λόγω εξάτμισης**
 - Παγκόσμιος βροχογράφος
 - Μαξιλάρι χιονιού
 - Εξατμισίμετρα

Χιονομετρία - Σύνοψη (1)

Όργανο	Ύψος χιονιού	Ισοδύναμο νερού
Τυπικό βροχόμετρο		Κ
Παγκόσμιο βροχόμετρο		Κ, Χπ, Χκ, Τ
Ραντάρ		Κ, Χπ
Σταθμήμετρο	Χκ	
Χιονοτράπεζα	Χπ	
Μπαστούνι χιονιού	Χκ	
Δειγματολήπτης χιονιού	Χκ	Χκ
Μαξιλάρι χιονιού		Χπ, Χκ, Τ
Ραδιοϊσότοπα		Χκ

Χιονομετρία - Σύνοψη (2)

Όργανο	Ύψος χιονιού	Ισοδύναμο νερού
Φυσική ακτινοβολία γάμμα		Χκ
Λυσίμετρο		T
Παθητική μέθοδος μικροκυμάτων		Χκ

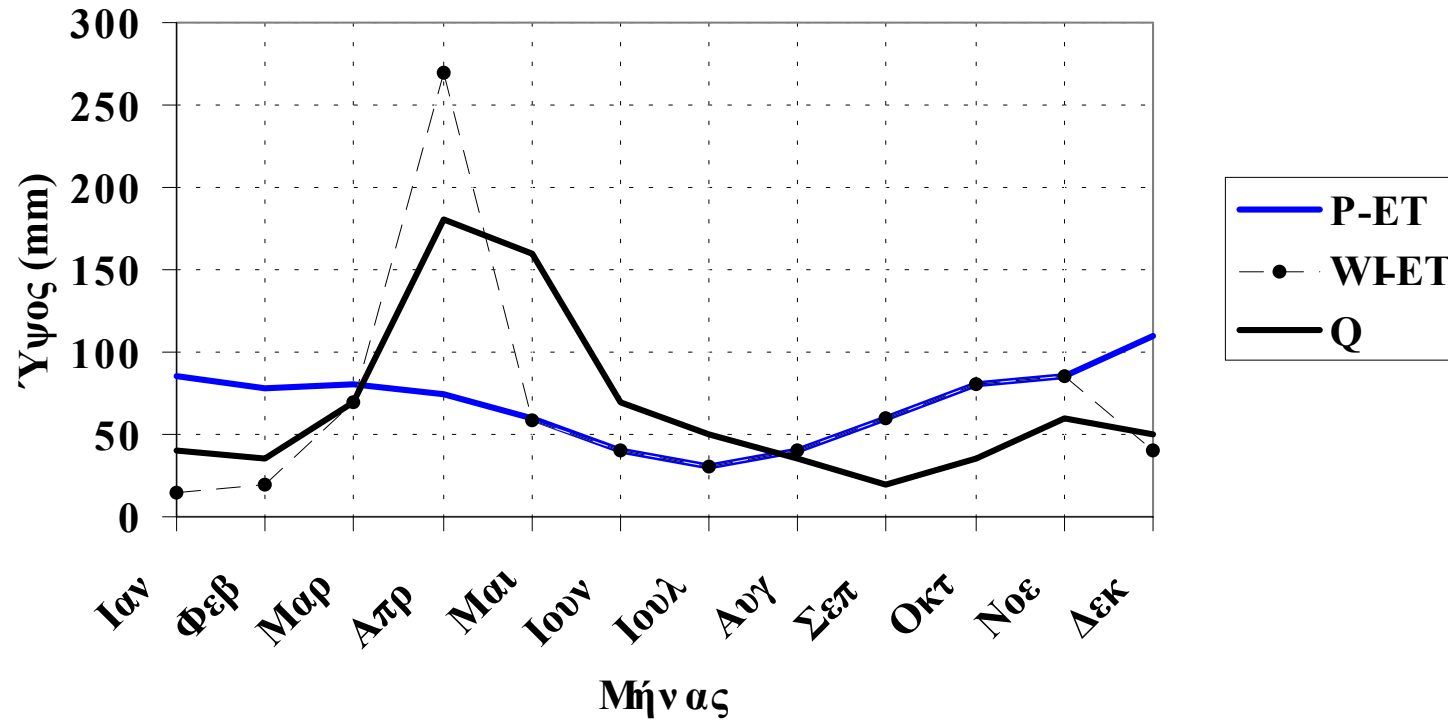
K = κατακρήμνιση

Χπ = χιονόπτωση

T = τήξη χιονιού

Χκ =
χιονοκάλυμμα

Σημασία εκτίμησης ύψους τήξης χιονιού



- P = Κατακρήμιση, ET = εξατμοδιαπνοή
- WI = εκροή από τη χιονοκάλυψη

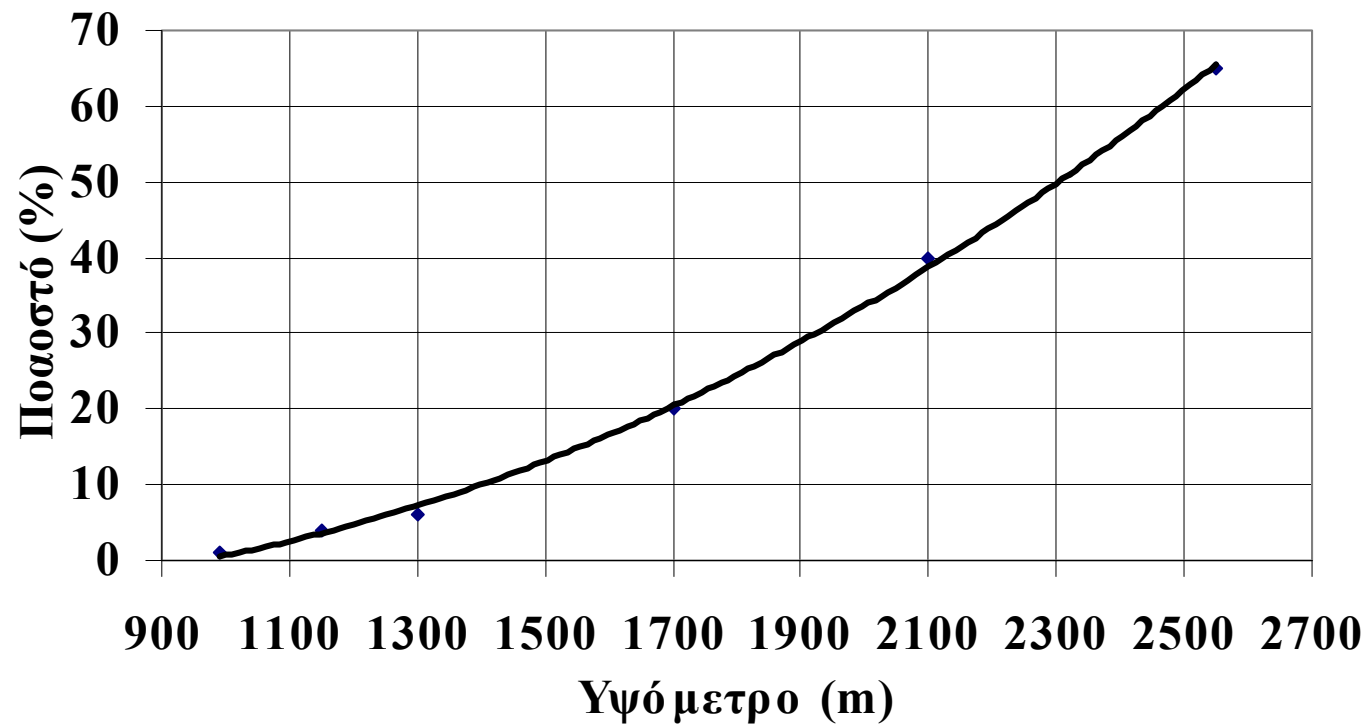
Κλιματολογία χιονιού (1)

- **Σε πλανητική κλίμακα**
 - Το ποσοστό της κατακρήμνισης που πέφτει ως χιόνι αυξάνει με το γεωγραφικό πλάτος και φθάνει το 65% περίπου στην Αλάσκα
 - Στο 42% του Β. Ημισφαιρίου (πάνω από τις 40°) εμφανίζεται τουλάχιστον εποχιακή χιονοκάλυψη
- **Σε κλίμακα περιοχής**
 - Έντονη αύξηση χιονόπτωσης με το υψόμετρο

Κλιματολογία χιονιού (2)

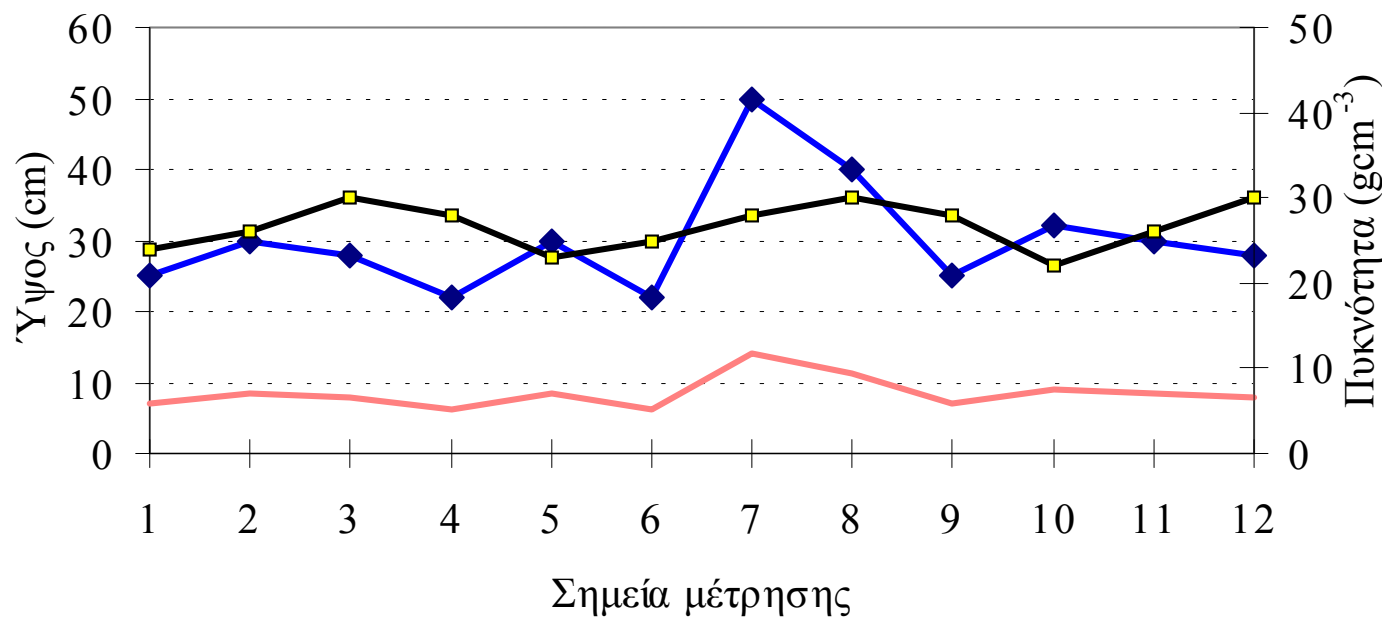
- Παράγοντες χωρικής μεταβλητότητας μεγεθών χιονοκάλυψης σε τοπική κλίμακα
- Παράγοντες σε σχέση με τη χιονόπτωση
 - Ταχύτητα ανέμου
 - Παγίδευση από τη χλωρίδα
 - Αύξηση ύψους χιονοκάλυψης σε μικρά ξέφωτα (μήκους $< 20h_f$ όπου h_f είναι το ύψος των γύρω δένδρων
 - Το αντίθετο για ξέφωτα μήκους $> 20h_f$
- Διεργασίες μεταμορφισμού

Σχέση ποσοστού χιονόπτωσης (στην κατακρήμνιση) και υψομέτρου



Από Ν. Καλιφόρνια (Dingman, 1994, σ.
179)

Διακύμανση εποχιακών μέσων μέγιστων μεγεθών χιονοκάλυψης σε διατομή δάσους



◆ Υψος χιονιού

— Ισοδύναμο νερού

■ Πυκνότητα χιονιού

Οντάριο (Adams, 1976)

*Πυκνότητα
δασο-
κάλυψης*

Μεγάλη -
μέτρια
6, 9, 12

Μικρή 7-8

Γρασίδι

1-5, 10-11

Διεργασίες τήξης χιονιού

- **Περίοδος συσσώρευσης**
 - Αρνητική καθαρή εισροή ενέργειας
 - Πτωτική τάση θερμοκρασίας χιονοκάλυψης
 - Αυξητική τάση ισοδύναμου ύψους νερού
- **Περίοδος τήξης**
 - **Φάση θέρμανσης** (αύξηση θερμοκρασίας χιονοκάλυψης μέχρι 0 °C)
 - **Φάση ωρίμανσης** (κατακράτηση νερού τήξης)
 - **Φάση εκροής νερού**

Φάση θέρμανσης χιονοκάλυψης ή Φάση 1

- Θερμοχωρητικότητα
- $Q_{cc} = -c_i \rho_w h_m (T_s - T_m)$ [EL⁻²]
 - όπου c_i είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του πάγου,
 - ρ_w η πυκνότητα του νερού,
 - h_m το ισοδύναμο ύψος νερού,
 - T_s η μέση θερμοκρασία της χιονοκάλυψης, και
 - $T_m = 0$ °C.

Φάση ωρίμανσης χιονοκάλυψης και εκροής νερού ή Φάσεις 2 και 3

- **Φάση 2**

- Ικανότητα κατακράτησης νερού

- $h_{wret} = \theta_{ret} h_s$ όπου η μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό $\theta_{ret} = -0.0735(\rho_w/\rho_s) + 0.267(\rho_w/\rho_s)^2$

- Τυπική τιμή $\theta_{ret} = 0.03$

- Απαιτούμενη ενέργεια $Q_{m2} = -h_{wret} \rho_w \lambda_f$ [EL⁻²] όπου λ_f είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του πάγου (kJ/kg)

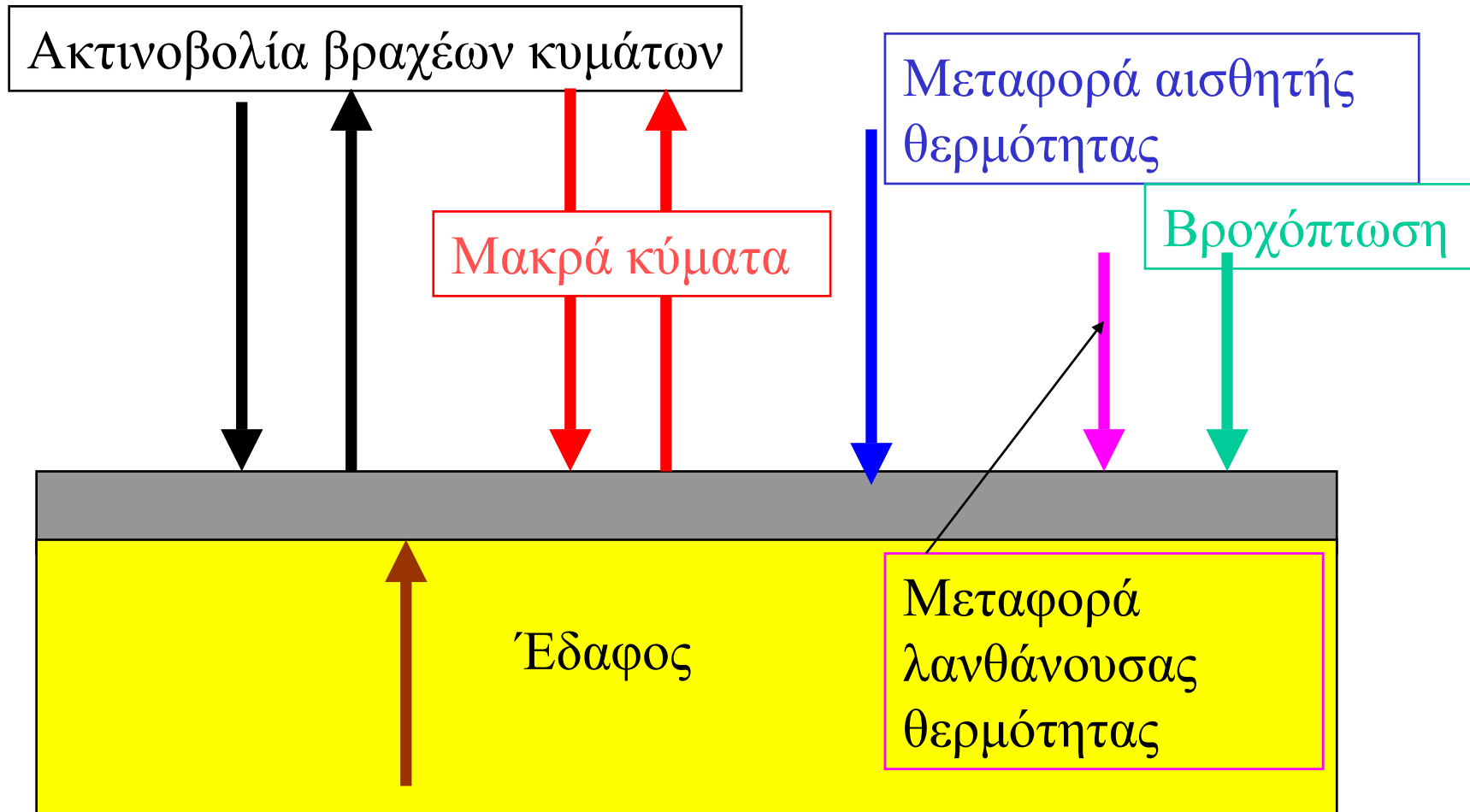
- **Φάση 3**

- Απαιτούμενη ενέργεια $Q_{m3} = (h_m - h_{wret}) \rho_w \lambda_f$ [EL⁻²]

Εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου της χιονοκάλυψης

- **$\Delta Q = S\Delta t$**
 - όπου ΔQ [EL^{-2}] η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας, S ο ρυθμός εισροής καθαρής ενέργειας [$ET^{-1}L^{-2}$], Δt [T] το χρονικό βήμα.
- **Φάση 1: Αύξηση θερμοκρασίας**
 $\Delta T_s = \Delta Q / (c_i \rho_w h_m)$
- **Φάση 2: Αύξηση ύψους νερού σε υγρή μορφή**
 $\Delta h_w = \Delta Q / (\rho_w \lambda_f)$
- **Φάση 3: Μείωση ισοδύναμου ύψους νερού**
 $\Delta h_m = \Delta Q / (\rho_w \lambda_f)$

Ενεργειακό ισοζύγιο χιονοκάλυψης



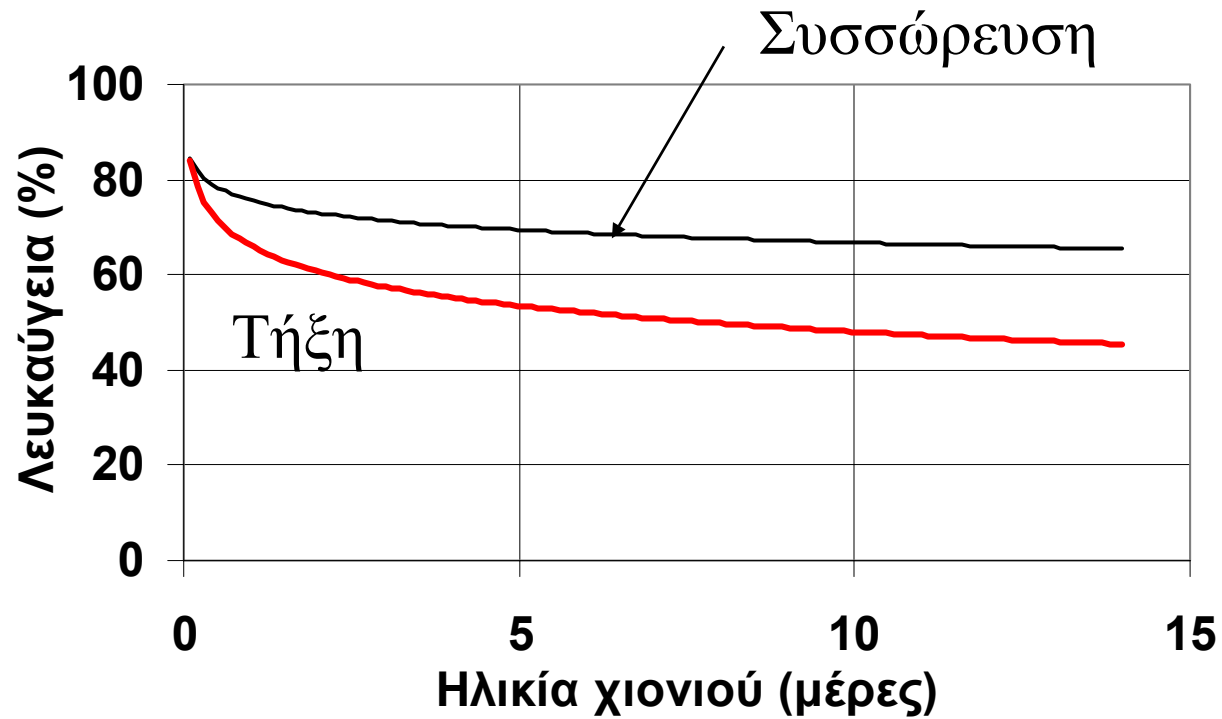
Ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (1)

- Μήκη κύματος $< 4 \mu\text{m}$ κυρίως 0.5 ως 1.0 μm
- Άμεση ηλιακή ακτινοβολία, διάχυτη ακτινοβολία (από αέρια και αερολύματα)
- Καθαρή εισροή ενέργειας $K = K_i(1-a)$ [$\text{ET}^{-1}\text{L}^{-2}$]
 - όπου K_i είναι η προσπίπτουσα ενέργεια και a η λευκαύγεια
- Προσπίπτουσα ενέργεια $K_i = K_{\text{ET}}f_1f_2f_3$
 - K_{ET} η εξωγήινη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, διορθωτικοί συντελεστές f_1 = κλίσης, f_2 = νέφωσης, f_3 = φυτοκάλυψης

Ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (2)

- **Εξωγήινη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια**
 $K_{ET} = K_{ET}(\varphi, J)$
 - όπου φ = γεωγραφικό πλάτος, J = αριθμός ημέρας
- **Διορθωτικοί συντελεστές**
- **Κλίσης $f_1 = f_1(\varphi, \beta, \gamma)$**
 - Μέθοδος ισοδύναμου γεωγραφικού πλάτους
- **Νέφωσης $f_2 = f_2(C)$ όπου C = νέφωση**
 - $f_2 = 0.355 + 0.68(1-C)$ [Croley, 1989]
- **Φυτοκάλυψης $f_3 = f_3(F)$ όπου F = φυτοκάλυψη**
 - $f_3 = \exp(-3.91F)$ για πεύκο [Dunne & Leopold, 1978]

Σχέση λευκαύγειας και ηλικίας χιονιού



U. S. Army Corps pf Engineers (1956)

Ακτινοβολία μακρών κυμάτων

- **Από ατμόσφαιρα (+ φυτοκάλυψη) $L_{at} = \varepsilon_{at}\sigma(T_a)^4$**
 - όπου ε_{at} = ικανότητα εκπομπής, σ = σταθερά Stefan - Boltzman (4.9×10^{-6} kJ/m²/d/°K⁴), T_a = θερμοκρασία αέρα (°K)
- **$\varepsilon_{at} = (1 - F)(0.53 + 0.065(e_a)^{0.5})(1 + 0.40C) + F$**
 - όπου e_a = τάση υδρατμών (hPa)
- **Εκπομπή ενέργειας από χιονοκάλυψη**
 $L_{ss} = \sigma(T_{ss})^4$
 - όπου T_{ss} = θερμοκρασία επιφάνειας χιονοκάλυψης
- **Καθαρή ενέργεια $L = L_{at} - L_{ss}$**

Μεταφορά αισθητής θερμότητας

- **Μεταφορά μάζας υδρατμών από χιονοκάλυψη σε ατμόσφαιρα → μεταφορά αισθητής θερμότητας**
- **Γενικός νόμος του Fick $G = D(dC/dz)$ (με εφαρμογή σε μάζα ή ορμή)**
 - όπου G = ρυθμός διάχυσης, D = συντελεστής διάχυσης, C = συγκέντρωση, z η κατακόρυφη τεταγμένη
- **Εφαρμογή του νόμου του Fick στο μέγεθος $c_a \rho_a T$**
 - όπου c_a είναι η ειδική θερμότητα του αέρα, ρ_a η πυκνότητα αέρα, και T η θερμοκρασία των υδρατμών

Μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας

- **Μεταφορά μάζας υδρατμών από τη χιονοκάλυψη στην ατμόσφαιρα (εξάτμιση, συμπύκνωση, πήξη) → μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας**
- **Εφαρμογή του νόμου του Fick στο μέγεθος ρ_v**
 - όπου ρ_v η πυκνότητα των υδρατμών
- **Περιπτώσεις**
 - Εξάτμιση (πάγος → νερό → υδρατμός)
 - Συμπύκνωση
 - Σε ψυχρό χιόνι (υδρατμός → νερό → πάγος)
 - Σε χιόνι που λιώνει (υδρατμός → νερό)

Όροι μεταφοράς - τελικές σχέσεις

- Ρυθμός μεταφοράς αισθητής θερμότητας H και λανθάνουσας θερμότητας Λ

$$H = \frac{c_a \rho_a k^2}{\left(\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)\right)^2} u (T_a - T_{ss}), \quad \Lambda = \frac{\varepsilon \lambda \rho_a k^2}{p \left(\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)\right)^2} u (e_a - e_{ss})$$

- z_m , υψόμετρο μέτρησης, z_0 = ύψος τραχύτητας, u = ταχύτητα ανέμου, T_a , e_a = θερμοκρασία, τάση υδρατμών αέρα, T_{ss} , e_{ss} = θερμοκρασία, τάση υδρατμών επιφάνειας χιονοκάλυψης, p = ατμοσφαιρική πίεση, $k = 0.4$, $\varepsilon = 0.622$, λ = λανθάνουσα θερμότητα, $e_a = e_a^* U$, όπου e_a^* = τάση κορεσμού υδρατμών, U = σχετική υγρασία

Άλλοι όροι του ενεργειακού ισοζυγίου - Καθαρή ενέργεια

- Μεταφορά θερμότητας από βροχόπτωση R
- Μεταφορά θερμότητας με αγωγή από το έδαφος G
- Καθαρή ενέργεια $S = K + L + H + \Lambda + R + G$
 - Για μεθόδους μέτρησης ακτινοβολίας βλ. WMO (1983)

Φυσικές ιδιότητες

- Ειδική θερμότητα αέρα $c_a = 1.013 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$
- Ειδική θερμότητα πάγου $c_i = 2.106 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$
- Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης $\lambda_v = 2501 \text{ kJ/kg}$
- Λανθάνουσα θερμότητα τήξης $\lambda_f = 334 \text{ kJ/kg}$
- Πυκνότητα νερού $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Ατμοσφαιρική πίεση $p = 1013(1 - 2.218 \times 10^{-5}Z)^{5.256}$
- Πυκνότητα αέρα $\rho_a = 0.3486p/(T_a + 275) \text{ kg/m}^3$
 - όπου p σε hPa, $Z =$ υψόμετρο σε m και T_a σε $^\circ\text{C}$.
- Μοριακό βάρος νερού/ξηρού αέρα $\varepsilon = 0.622$
- Τάση κορεσμού υδρατμών (hPa)
 $e_a^* = 6.11 \exp[(17.27T_a)/(T_a + 237.3)]$

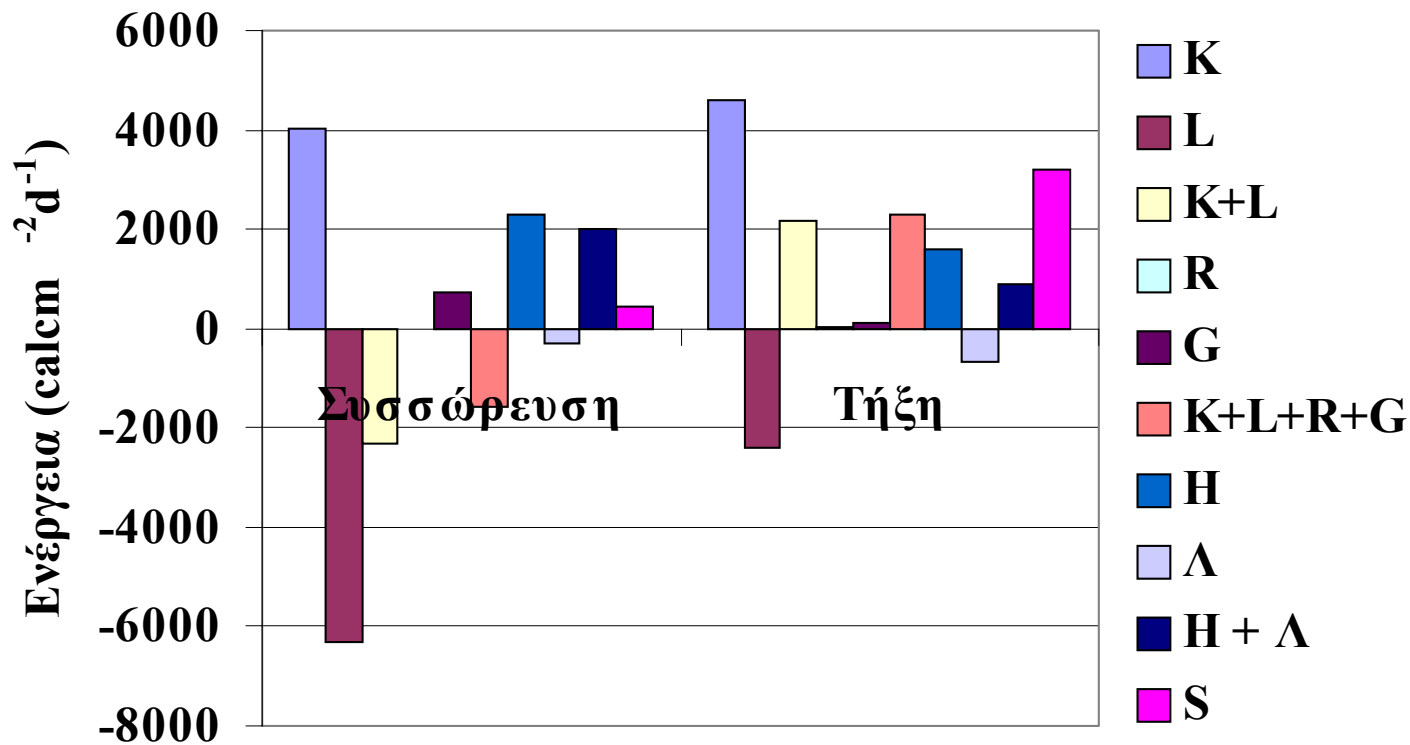
Αστρονομικά μεγέθη (1)

- Αριθμός ημέρας J
- Ηλιακή απόκλιση (rad)
 $\delta = 0.4093\cos[(2\pi J/265) - 2.98]$
- Εκκεντρότητα ηλίου (αδιάστατη)
 $d_r = 1 + 0.033\cos[2\pi J/265]$
- Ισοδύναμο γεωγραφικό πλάτος (rad)
 $\varphi' = \arcsin(\sin\beta\cos\gamma\cos\varphi + \cos\beta\sin\varphi)$
 - όπου φ = πλάτος, β = κλίση, γ = αζιμούθιο (rad)
- Διόρθωση γεωγραφικού μήκους (rad) $\Delta\Omega = \arctan[(\sin\beta\sin\gamma)/(\cos\beta\cos\varphi - \sin\beta\sin\varphi\cos\gamma)]$

Αστρονομικά μεγέθη (2)

- Γωνία ώρας δύσης του ηλίου (rad)
 $\omega_s = \arccos(-\tan\varphi'\tan\delta - \Delta\Omega)$
- Διάρκεια ημέρας $N = 24(\omega_s/\pi)$ (h)
- Ηλιακή σταθερά $I_s = 4921 \text{ kJ/m}^2/\text{h}$
- Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια ($\text{kJ/m}^2/\text{d}$)
 $K'_{ET} = (12/\pi)I_s d_r [2\omega_s \sin\varphi' \sin\delta + \cos\varphi' \cos\delta [\sin(\omega_s + \Delta\Omega) - \sin(-\omega_s + \Delta\Omega)]]$
- Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια ($\text{kJ/m}^2/\text{d}$) K_{ET} ίδια σχέση με $\beta = 0$.
- Διορθωτικός συντελεστής κλίσης $f_1 = K'_{ET}/K_{ET}$

Ποσοτική σύγκριση συνιστωσών ενεργειακού ισοζυγίου



- Πειραματικός σταθμός Danville, VT (Dingman, 1994, σ. 195), έτος 1968-69

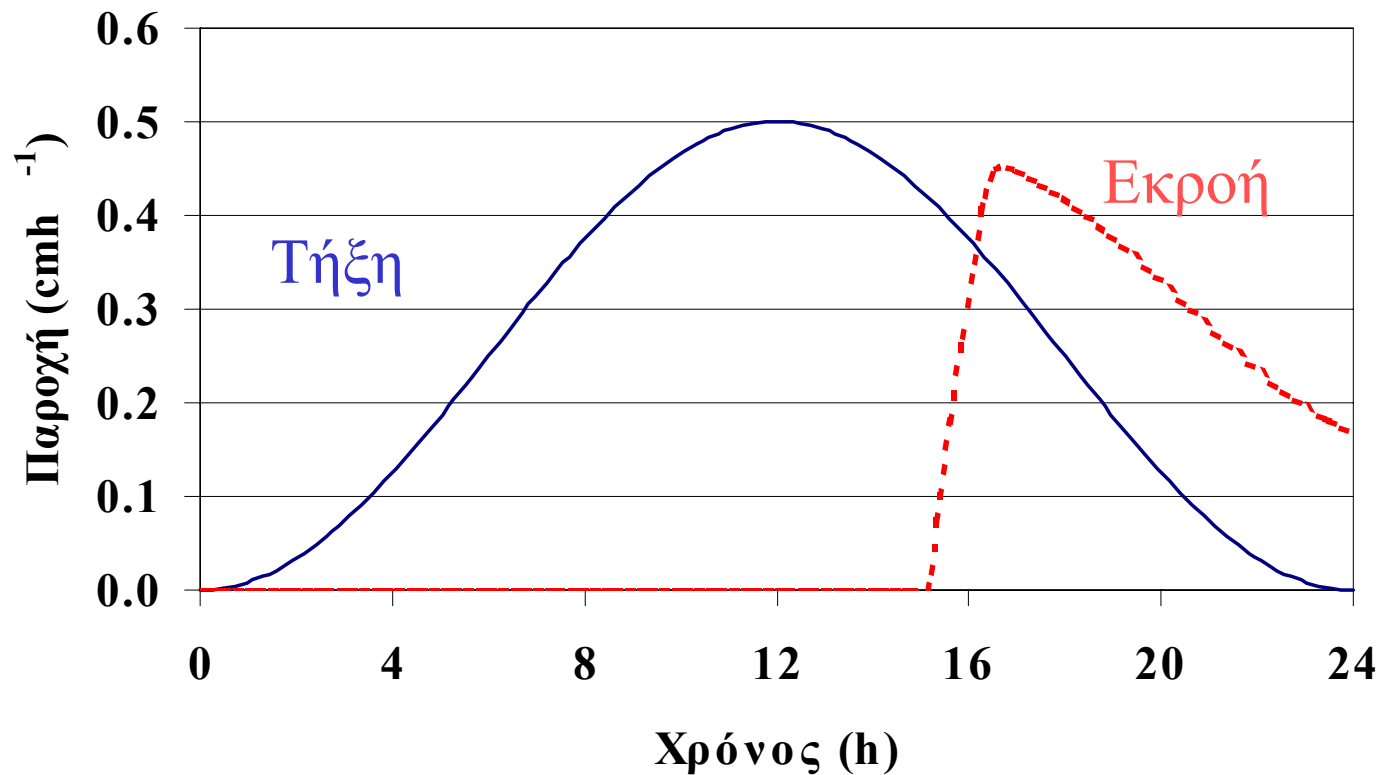
Κίνηση του νερού τήξης δια μέσου της χιονοκάλυψης (1)

- Ροή σε ακόρεστο πορώδες μέσο (χιονοκάλυψη)
- Δυνάμεις βαρύτητας και επιφανειακής τάσης (αμελητέα)
- Νόμος Darcy (άξονας z) $V = K_h[\theta]$
 - όπου V = παροχή ανά μονάδα επιφάνειας [LT^{-1}]
 K_h = υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}], θ = περιεκτικότητα σε νερό

Κίνηση του νερού τήξης δια μέσου της χιονοκάλυψης (2)

- **Ενεργό πορώδες $\varphi_{\text{eff}} = \varphi - \varphi_{\text{ret}}$**
 - όπου φ_{ret} αντιστοιχεί στο θ_{ret}
- **Ειδική διαπερατότητα $[L^2]$**
 $K_l = 0.077d_t^2 \exp(-7.8\rho_s/\rho_w)$
 - όπου d_t χαρακτηριστική διάμετρος κόκκων (1.0 - 2.0 mm)
- **Ταχύτητα διάδοσης u_M συγκεκριμένης παροχής τήξης M**
 $u_M = (3/\varphi_{\text{ef}})(\rho_s g K_l / \mu)^{0.33} M^{0.67}$
 - όπου $\mu =$ ιξώδες του νερού

Κίνηση του νερού τήξης δια μέσου της χιονοκάλυψης (3)



Στάδια ανάπτυξης μοντέλων

- Συλλογή, αρχειοθέτηση και αξιολόγηση δεδομένων
- Αναγνωριστικό στάδιο: κατάστρωση του προβλήματος, καθορισμός μεταβλητών ενδιαφέροντος, στόχων και κριτηρίων αξιολόγησης.
- Κύριο στάδιο ανάπτυξης του μοντέλου: μαθηματική περιγραφή, κατάστρωση αλγορίθμων, υλοποίηση σε Η/Υ.
- Επαλήθευση του μοντέλου
- Επιχειρησιακή εφαρμογή

Κατάταξη μοντέλων συσσώρευσης και τήξης χιονιού

- **Με βάση το βαθμό αναπαράστασης των φυσικών διεργασιών**
- **Μοντέλα με βάση τη φυσική (Physics based)**
 - Αρχές διατήρησης μάζας, ενέργειας και ορμής
- **Εμπειρικά μοντέλα**
 - Μέθοδος θερμοκρασιακών δεικτών (temperature index methods)
- **Με βάση τη χωρική αναπαράσταση των φαινομένων**
- **Μοντέλα σε σημειακή βάση (at-a-point models)**
- **Μοντέλα λεκάνης απορροής (watershed models)**
 - Αδρομερή (lumped)
 - Κατανεμημένα (distributed)

Δεδομένα μοντέλων σε σημειακή βάση

- Μοντέλα με βάση τη φυσική
- Γεωγραφικά & χρήσης γης
- Υδρομετεωρολογικά
- Κατακρήμνιση
- Θερμοκρασία αέρα
- Σχετική υγρασία αέρα
- Νέφωση ή ηλιοφάνεια
- Ταχύτητα ανέμου
- Ακτινοβολία
- Χιονοκάλυψης
- Θερμοκρασία
- Εμπειρικά μοντέλα
- Υδρομετεωρολογικά
- Κατακρήμνιση
- Θερμοκρασία αέρα
 - Ενδεχομένως
- Γεωγραφικά & χρήσης γης

Μοντέλα θερμοκρασιακών δεικτών

- Εκτίμηση της τήξης M με βάση τη σχέση $M = B(T_a - T_m)$ για $T_a > 0$, $M = 0$ για $T_a < 0$
 - όπου T_a = θερμοκρασία αέρα (°C) και T_m (°C) = θερμοκρασία τήξης του πάγου (0 °C)
 - B = παράγων τήξης (παράγων βαθμοημερών) [LΘ⁻¹T⁻¹)
- Τυπική τιμή του B (σταθερή) 3.0 - 4.0 mm
- Χωρικά μεταβλητή τιμή $B = 4.0(1-a)f_1f_3$ (mm)
 - όπου a = λευκαύγεια, f_1, f_3 = όπως στην ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (Male and Gray, 1981)

Μοντέλα λεκάνης απορροής

- Μοντέλα: (α) με βάση τη φυσική, (β) εμπειρικά
- Πρόσθετες δυσκολίες σε σχέση με τα μοντέλα σε σημειακή βάση
 - Επιμερισμός της κατακρήμνισης σε χιονόπτωση και βροχόπτωση
 - Θεώρηση της χωρικής κατανομής γεωγραφικών χαρακτηριστικών με υδρολογικό ενδιαφέρον (υψόμετρο, κλίση, προσανατολισμός εδαφικής επιφάνειας, χρήση γης)
 - Χωροχρονική κατανομή της χιονοκάλυψης
 - Μοντελοποίηση της κίνησης του νερού στη λεκάνη

Βιβλιογραφία

- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 2, ΕΜΠ, Αθήνα, 1997.
- Dingman, S. L., *Physical hydrology*, Prentice - Hall, New Jersey, 1994.
- Maidment, D. R. (editor), *Handbook of hydrology*, McGraw Hill, New York, 1992.
- Shaw, E., *Hydrology in practice*, Chapman & Hall, London, 1983.
- Anderson, M. G., and T. P. Burt (editors), *Hydrological forecasting*, John Wiley & sons, Chichester, 1985.

Αναφορές (1)

- **Adams, W. P., Areal differentiation of snow cover in east central Ontario, *WRR*, 12, 1226-1234, 1976.**
- **Croley, T. E., Verifiable evaporation modeling on the Laurentian Great Lakes, *WRR*, 25, 781-792, 1989**
- **Dunne, T., and L. B. Leopold, *Water in Environmental planning*, San Francisco, CA, W. H. Freeman and Co, 1978.**

Αναφορές (2)

- **Male, D. H., and D. M. Gray, Snowcover ablation and runoff, in D. M. Gray and D. H Male (eds) *Handbook of snow*, New York , Pergamon Press, 1981.**
- **U. S. Army Corps pf Engineers, Snow Hydrology, Washington DC, Department of Commerce, Office of Technical Services, *PB 151660*, 1956.**
- **World Meteorological Organisation, *Guide to meteorological instruments and methods of observation*, WMO, No 8, Geneva, 1983.**