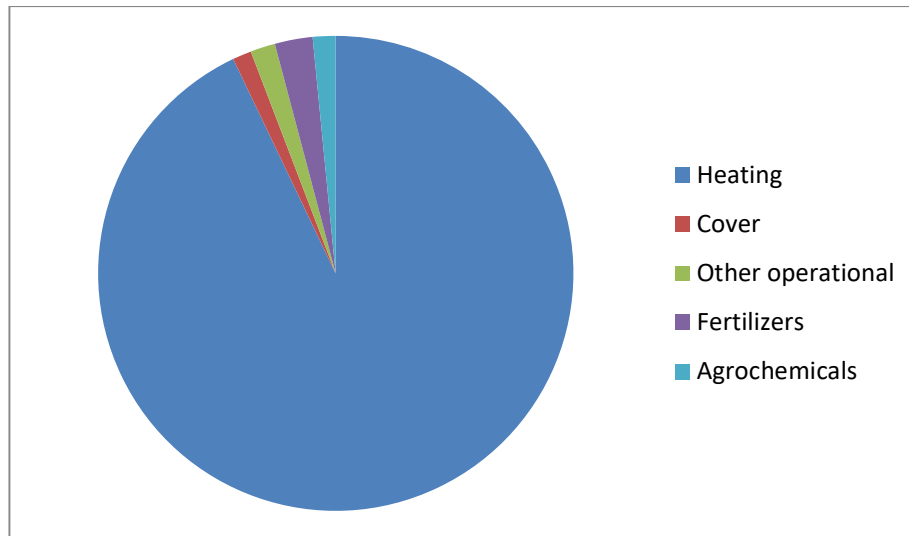


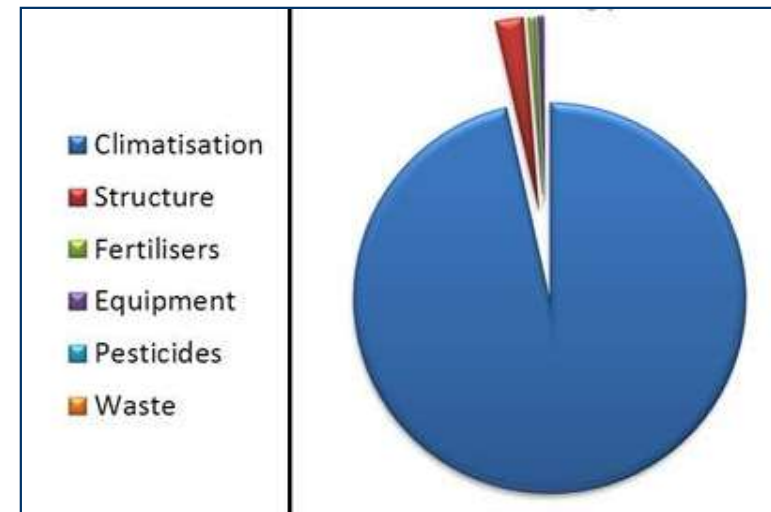
Θερμότητα



Κατανομή κατανάλωσης ενέργειας στο θερμοκήπιο



ΕΛΛΑΔΑ



ΟΛΛΑΝΔΙΑ

Η θέρμανση είναι βασική κατανάλωση ενέργειας στο θερμοκήπιο

Ενδεικτικές μέσες καταναλώσεις ενέργειας σε θερμοκήπια στην Ελλάδα

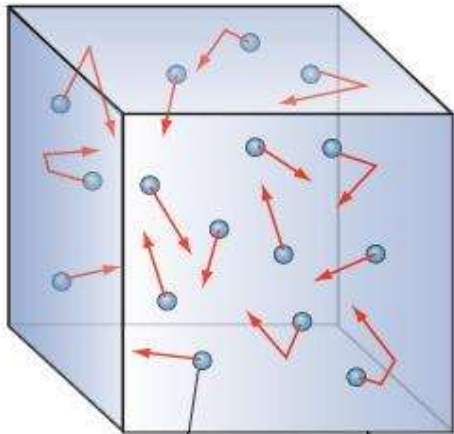
Τυπική κατανάλωση ενέργειας σε θερμοκήπιο με πλαστικό κάλυμμα όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό έχει ρυθμιστεί στους 18°C

Τοποθεσία	Κατανάλωση ενέργειας (MJ m ⁻²)
Ηράκλειο	600
Αττική	780
Θεσσαλονίκη	1220

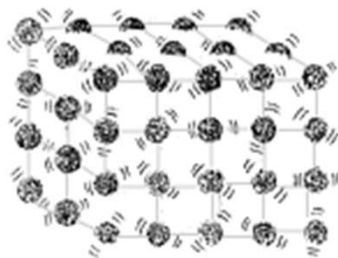
Η μεταφορά θερμότητας και το μικροκλίμα του θερμοκηπίου

- Η θερμότητα ως μορφή ενέργειας
- Θερμοκρασία
- Μεταφορά θερμότητας με αγωγή (διάχυση)
- Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή
- Ακτινοβολία και θερμότητα
- Λανθάνουσα θερμότητα (εξάτμιση, συμπύκνωση)

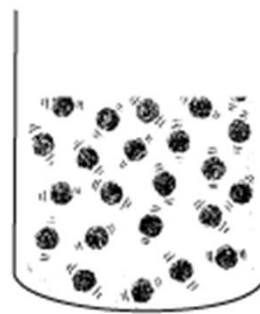
Τι είναι η Θερμότητα



Θερμότητα είναι ένα φυσικό μέγεθος που περιγράφει τη κινητική ενέργεια των μορίων ενός σώματος όταν αυτό είναι ακίνητο.



Στερεό - Ταλάντωση των μορίων στο πλέγμα



Ρευστά (υγρά και αέρια) - Ελεύθερη κίνηση των μορίων

Μονάδες Θερμότητας

- Μονάδα ενέργειας SI:
Joule ($J = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$)
- Παραδοσιακή μονάδα Θερμότητας:
Θερμίδα-calorie (cal), $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$
- Βρετανική Θερμική μονάδα (BTU): $1 \text{ BTU} = 1055,05585 \text{ J}$

Θερμοκρασία - Θερμοχωρητικότητα

$$Q = C T \text{ ή } \Delta Q = c \Delta T$$

Q : Θερμότητα (J)

T : Θερμοκρασία (K - Kelvin)

C : Θερμοχωρητικότητα (J/K)

c : C/m - ειδική Θερμοχωρητικότητα (J K⁻¹ kg⁻¹)



Η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την αλλαγή της Θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό στη μονάδα μάζας ενός υλικού

Θερμοκρασία - Θερμοχωρητικότητα

Ειδική Θερμοχωρητικότητα υλικών στο Θερμοκήπιο

Υλικό	Ειδική Θερμοχωρητικότητα ($J K^{-1} kg^{-1}$)
Νερό	4184
Σίδηρος	440
Γυαλί	670
Ξύλο	1700
Πολυαιθυλένιο (LDPE)	2300
Χώμα	800
Αέρας	1012
Ανθρώπινο Σώμα	3500

Θερμοκρασία

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ : το ποσοτικό μέτρο της θερμικής ενέργειας ενός σώματος

Θερμική Ισορροπία: Δύο σώματα με την ίδια θερμοκρασία → δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας από το ένα στο άλλο

Βαθμοί Κελσίου °C
Βαθμοί Κέλβιν K
Απόλυτο μηδέν OK (-273,15°C)

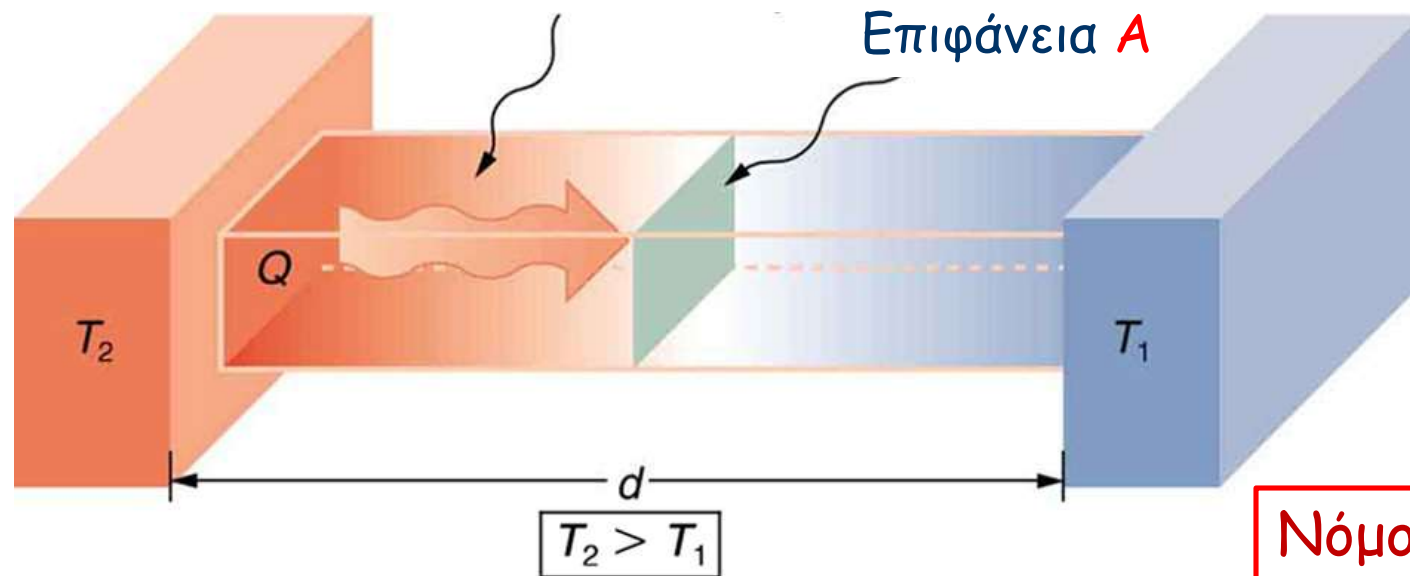


$$T_K = 273,15 + T_C$$



Μεταφορά Θερμότητα με αγωγή - Θερμική αγωγιμότητα

Υλικό θερμικής αγωγιμότητας k



Νόμος του Fourier

$$q = \frac{\delta Q}{\delta t} = kA \frac{T_2 - T_1}{d}$$

Αγωγή: είναι η μεταφορά της ενέργειας από τα πιο «δραστήρια» σωματίδια μιας ουσίας στα λιγότερο «δραστήρια», ως αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων.

q : Ροή Θερμότητας (W)

Μεταφορά Θερμότητα με αγωγή - Νόμος Fourier

$$q = \frac{\delta Q}{\delta t} = kA \frac{T_2 - T_1}{d}$$

q : ροή θερμότητας (W)

Q : θερμότητα (J)

t : χρόνος (s)

A : επιφάνεια επαφής ροής θερμότητας (m²)

T_1 : χαμηλή θερμοκρασία αγωγού (K)

T_2 : υψηλή θερμοκρασία αγωγού (K)

k : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (W m⁻¹ K⁻¹)

Θερμική αγωγιμότητα

Η **Θερμική αγωγιμότητα** είναι ιδιότητα του υλικού

k : Θερμική αγωγιμότητα ($W m^{-1} K^{-1}$)

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή συμβαίνει χωρίς τη μεταφορά μάζας

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή ομοιάζει φυσικά με τη διάχυση αερίων (νόμος του Fourier)



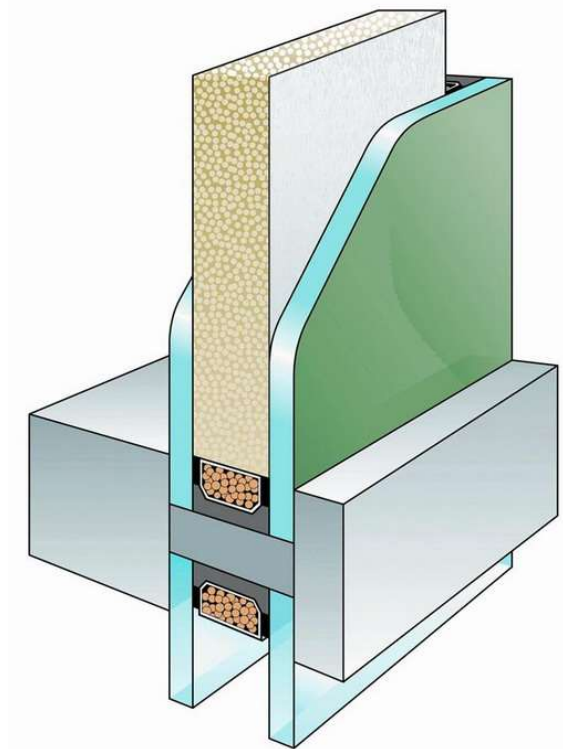
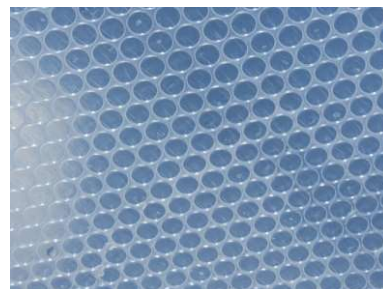
CONDUCTION OF HEAT

Θερμική αγωγιμότητα

Θερμική Αγωγιμότητα υλικών στο Θερμοκήπιο

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα ($W m^{-1} K^{-1}$)
Αέρας	0,026 (1 bar)
Νερό	0,6
Σίδηρος	72
Γυαλί	1
Ξύλο	0,04
Πολυαιθυλένιο (LDPE)	0,3
Χώμα	0,5
Ανθρώπινο Σώμα	0,3

Μόνωση και μονωτικά υλικά



$$\frac{\delta Q}{\delta t} = kA \frac{T_2 - T_1}{d}$$

Θερμοκήπια με διπλό φουσκωτό κάλυμμα

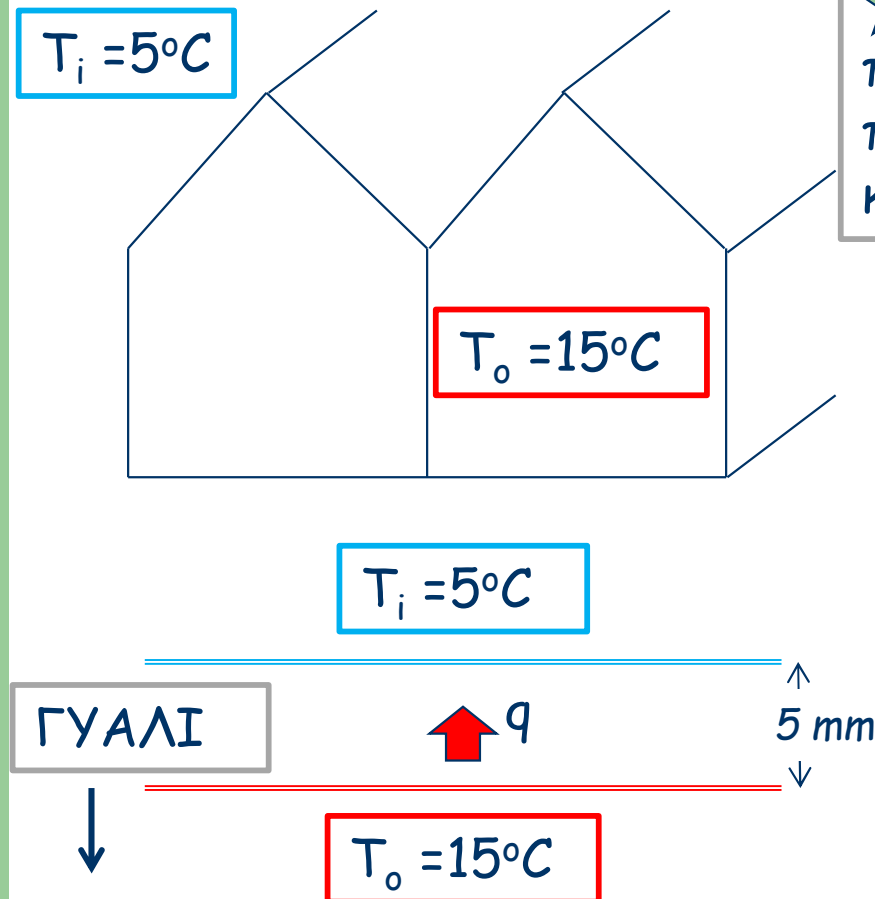


Αντλίες αέρα με πιεσοστάτη διατηρούν σταθερή τη πίεση μεταξύ των δύο φύλλων

Η μικρή θερμική αγωγιμότητα του αέρα εμποδίζει τις απώλειες



Μεταφορά Θερμότητας με αγωγή - Παράδειγμα



★ Να υπολογιστεί η ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται από το θερμοκήπιο στο περιβάλλον ανά μονάδα επιφάνειας της κάλυψης γυαλιού μέσω αγωγής ★

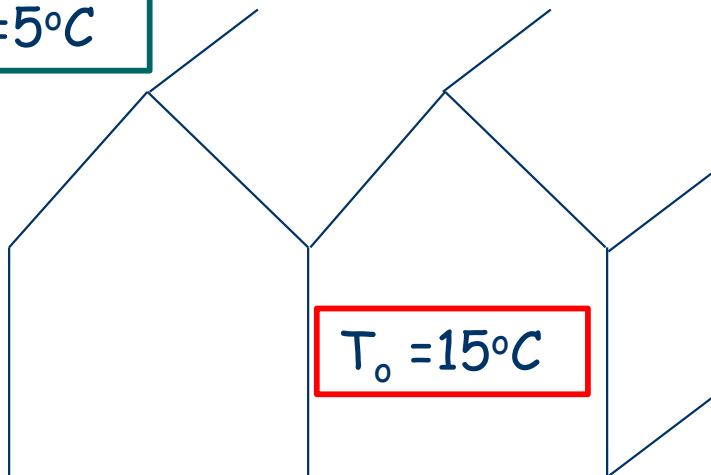
$$q = \frac{\delta Q}{\delta t} = kA \frac{T_2 - T_1}{d}$$
$$q = \frac{\delta Q}{\delta t} = 1\text{ W / mC} * 1\text{ m}^2 \frac{10\text{ C}}{0,005\text{ m}}$$
$$q = \frac{\delta Q}{\delta t} = 2000\text{ W (= J / s)}$$

ΑΠΩΛΕΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο συν/στης θερμικής αγωγιμότητας του γυαλιού είναι: 1 W / m C

Μεταφορά Θερμότητας με αγωγή - Παράδειγμα

$$T_i = 5^\circ\text{C}$$



★ Αν η kWh έχει κόστος 0,1€. Να βρείτε το κόστος απωλειών θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας για μια ημέρα ★

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = 2000 \text{ W} = 2 \text{ kW}$$



$$\delta Q = 2 \text{ kW} * \delta t$$

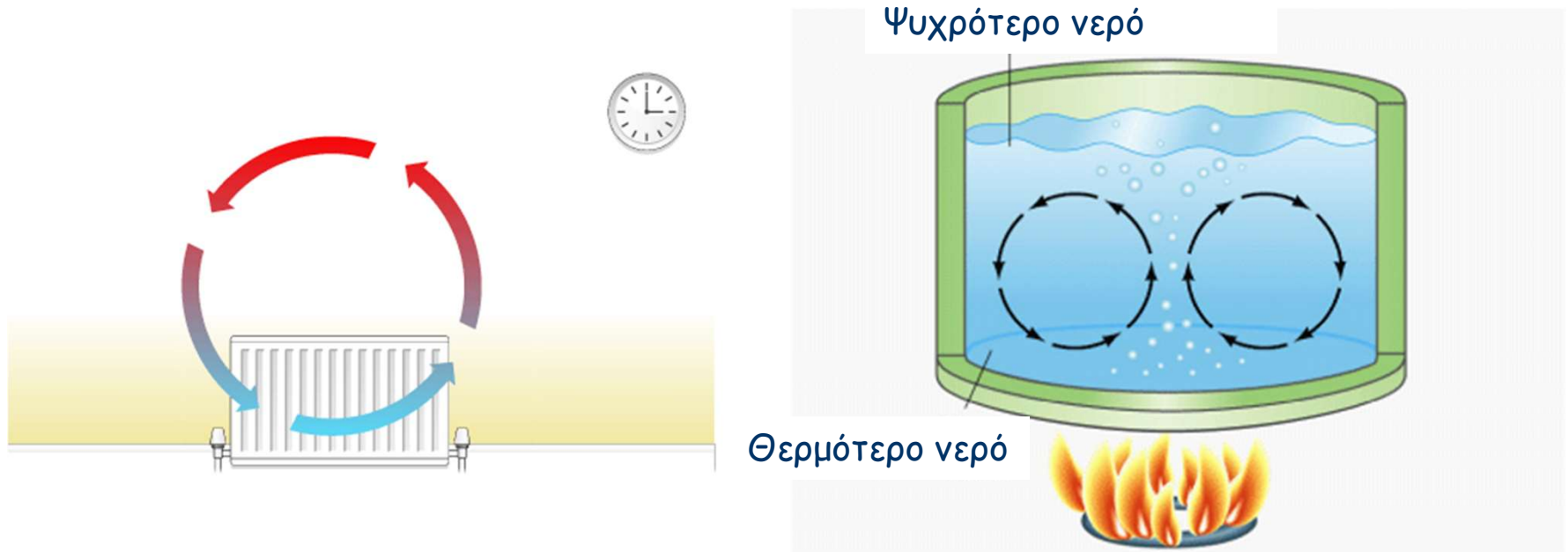


$$24 \text{ ώρες} : \delta Q = 2 \text{ kW} * 24 \text{ h} = 48 \text{ kWh}$$

$$\text{Κόστος} : 48 \text{ kWh} * 0,1 \text{ ευρώ} / \text{kWh} = 4,8 \text{ ευρώ}$$

ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Μεταφορά Θερμότητας με συναγωγή



Μεταφορά Θερμότητας με τη βοήθεια ροής ρευστού

Συναγωγή: διεξάγεται μεταξύ μιας στερεάς επιφάνειας κι ενός γειτονικού ρευστού σε κίνηση και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη δράση της **αγωγής** και της **κίνησης του ρευστού**.

Μεταφορά Θερμότητας με συναγωγή - Νόμος ψύξης Νεύτωνα

$$q = \frac{\delta Q}{\delta t} = hA(T_2 - T_1)$$

Νόμος του Newton

q : ροή θερμότητας (W)

Q : θερμότητα (J)

t : χρόνος (s)

A : επιφάνεια επαφής στερεού - ρευστού (m^2)

T_1 : θερμοκρασία ρευστού (K)

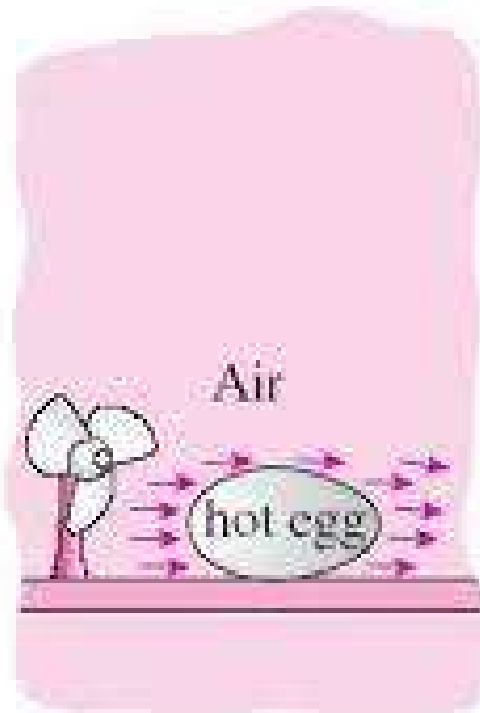
T_2 : θερμοκρασία στερεού (K)

h : συντελεστής θερμικής μεταφοράς με συναγωγή ($W m^{-2} K^{-1}$)

Ο συντελεστής h εξαρτάται από τη μορφή της επιφάνειας, τις ιδιότητες του ρευστού και τη μορφή της ροής

Τύποι συναγωγής

Εξωτερικό ή
μηχανικό
αίτιο
(άνεμος,
ανεμιστήρας)

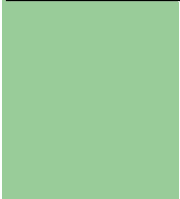
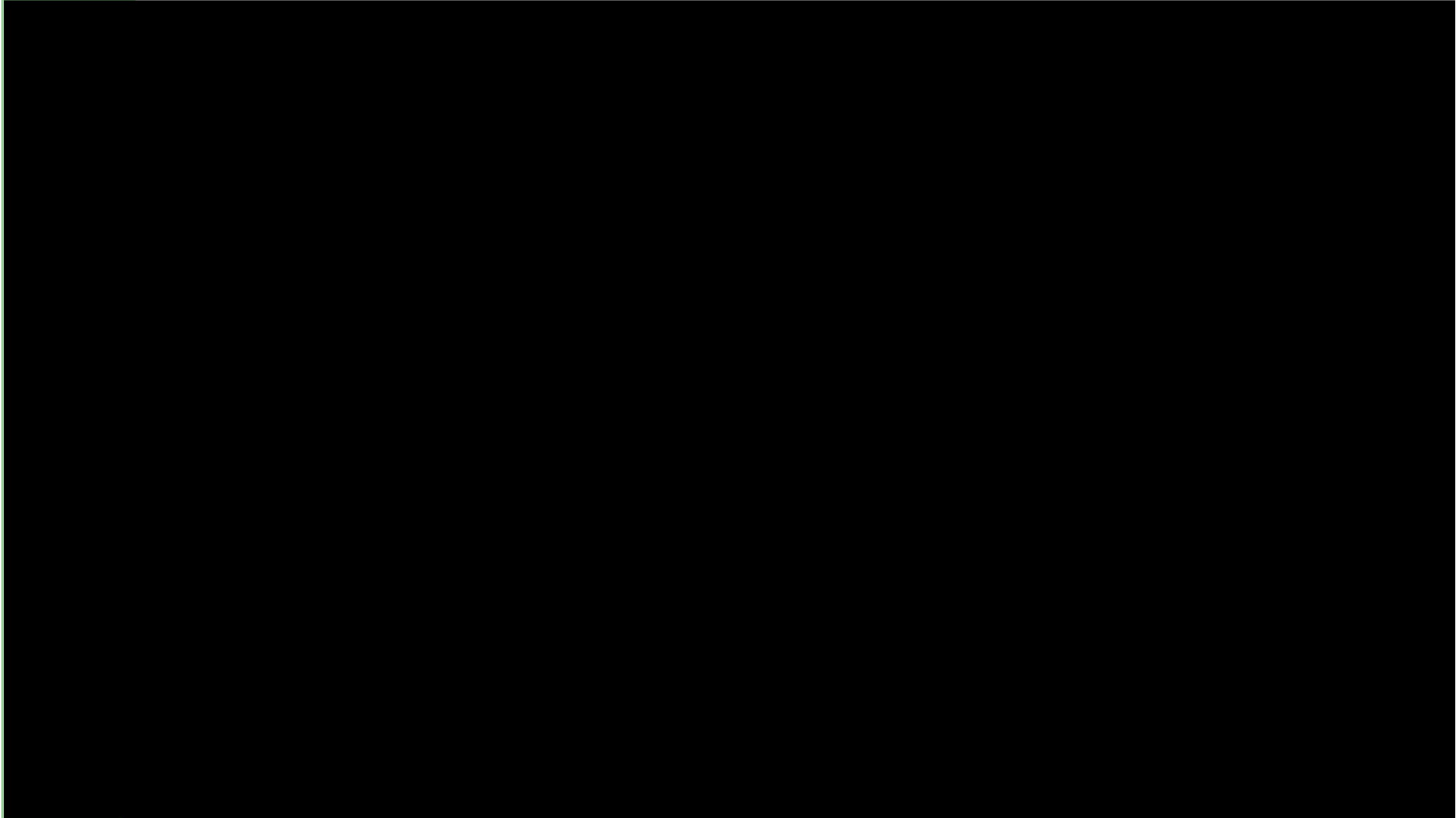


Βεβιασμένη
συναγωγή

Κίνηση αέρα
λόγω
διαφοράς
πυκνότητας



Ελεύθερη
συναγωγή

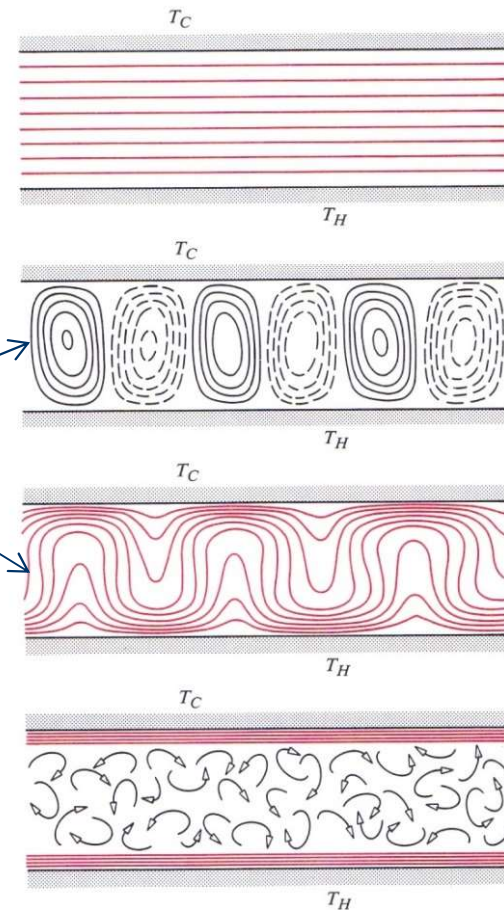


Ελεύθερη συναγωγή μεταξύ δύο παράλληλων οριζόντιων επιφανειών

Περίπτωση αγωγής
(το ρευστό είναι ακίνητο)

Συναγωγή με ομαλή ροή σε
μορφή κυψελίδων (cellular flow)

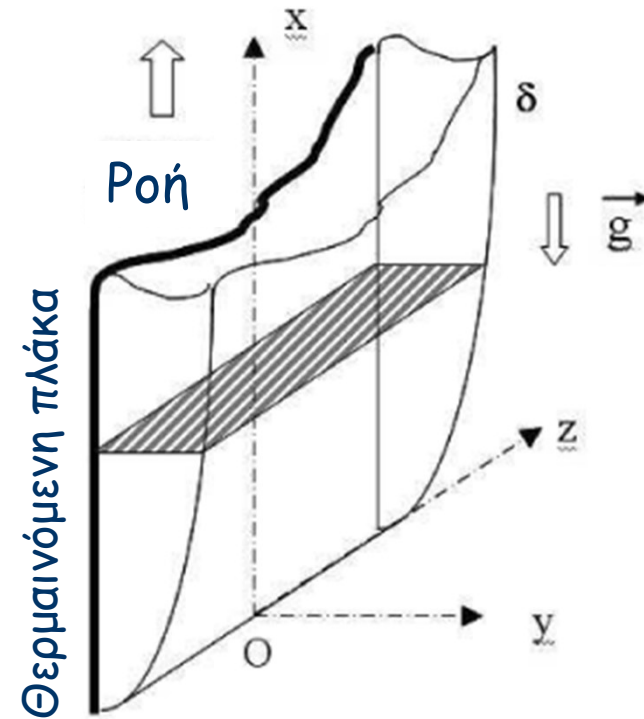
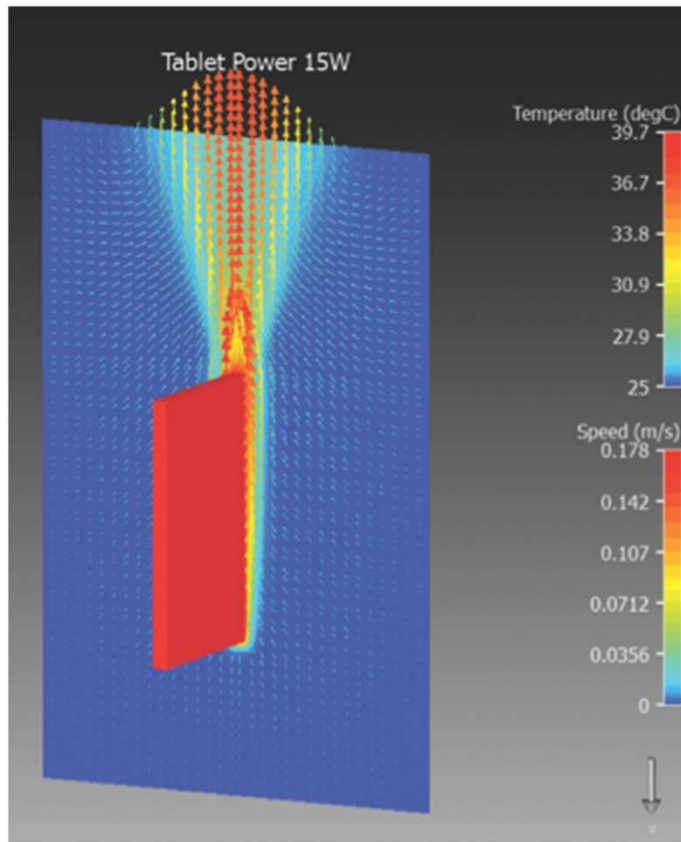
Συναγωγή με τυρβώδη ροή



Αύξηση T_H

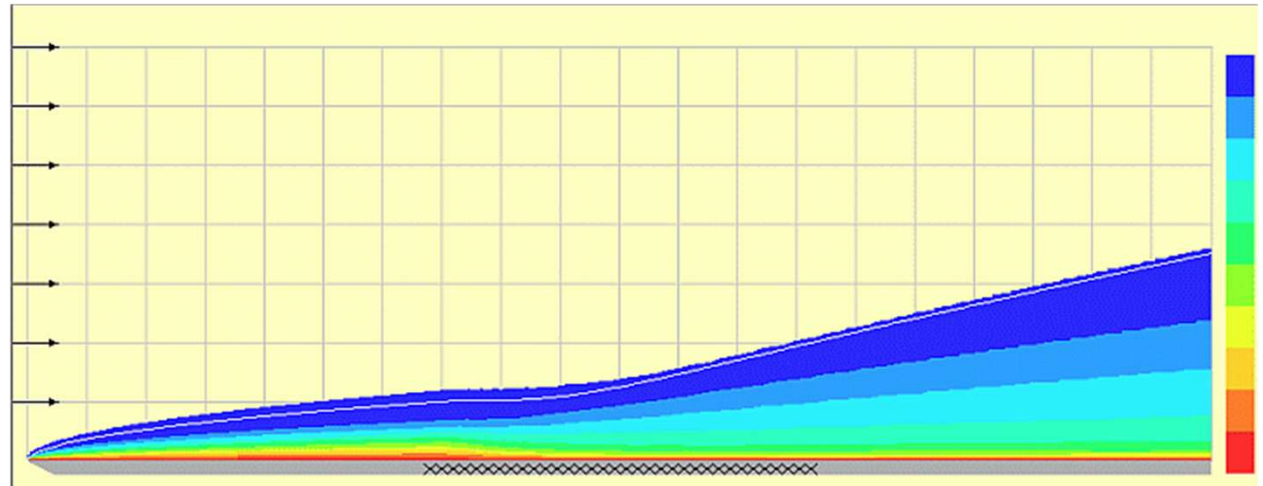
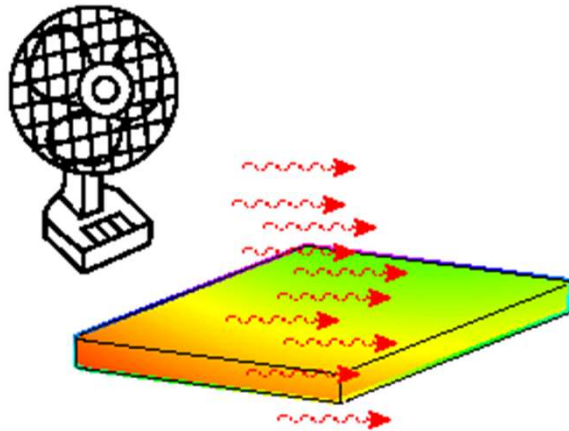


Ελεύθερη συναγωγή δίπλα σε θερμαινόμενη κατακόρυφη πλάκα



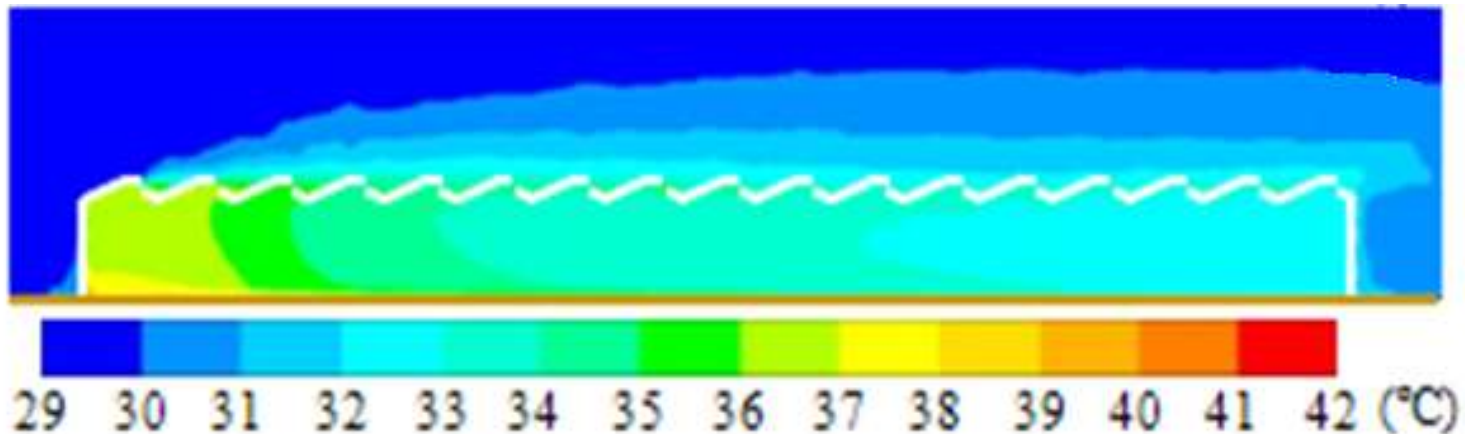
Στρώμα ροής δίπλα σε
θερμαινόμενη πλάκα

Βεβιασμένη συναγωγή πάνω από θερμαινόμενη οριζόντια πλάκα



- Ροή **σταθερής ταχύτητας v** πάνω από θερμαινόμενη πλάκα.
- Οι διαβαθμίσεις του χρώματος δείχνουν τη **κατανομή της θερμοκρασίας**

Βεβιασμένη συναγωγή πάνω από την οροφή πολύρρικτου θερμοκηπίου

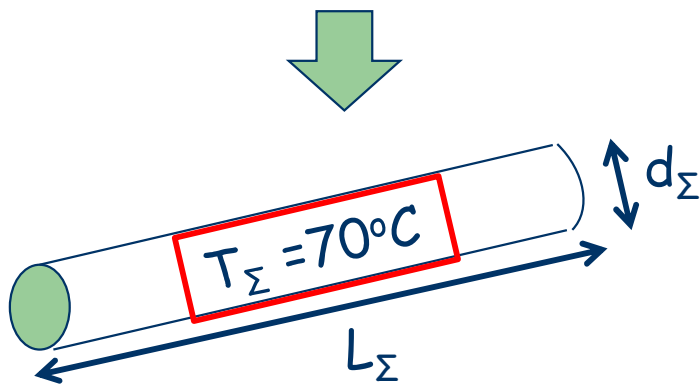
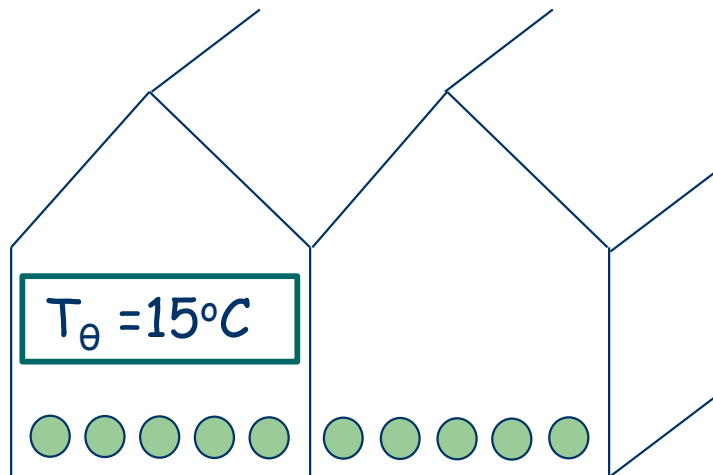


Άνεμος



- Ανοιγμα παραθύρων για την είσοδο του αέρα και δροσισμό
- Τα παράθυρα είναι υπήνεμα (αντίθετα στη ροή του ανέμου)
- **Εσωτερικά στο θερμοκήπιο 42°C** - Εξωτερικός αέρας 29°C
- Οι διαβαθμίσεις του χρώματος δείχνουν τη κατανομή της θερμοκρασίας

Μεταφορά Θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή - Παράδειγμα

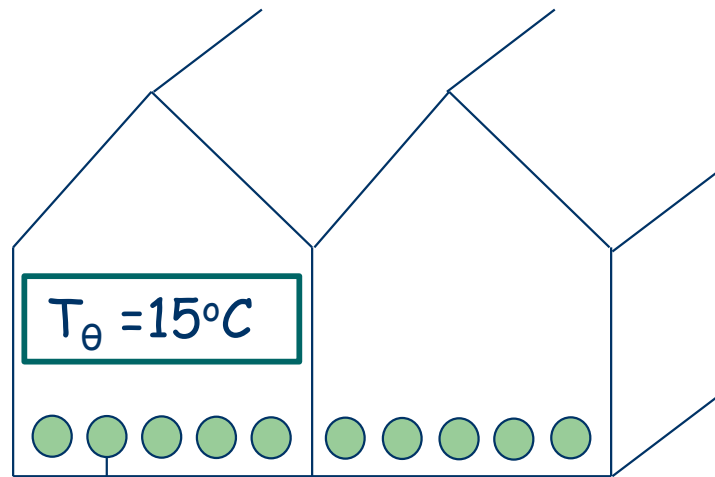


Ο σωλήνας έχει διάμετρο 30 mm και μήκος 50 m. Το νερό των σωληνώσεων έχει θερμοκρασία 70°C

Ο συν/στος συναγωγής των σωληνώσεων είναι: $8 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ C}$

Να υπολογιστεί η **ποσότητα Θερμότητας** που μεταφέρεται στο θερμοκήπιο από ένα σωλήνα του συστήματος θέρμανσης μέσω της ελεύθερης συναγωγής

Μεταφορά Θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή - Παράδειγμα



$T_{\Sigma} = 70^{\circ}\text{C}$

$$q = \frac{\delta Q}{\delta t} = hA(T_2 - T_1)$$



$$q = h(\pi d_{\Sigma} L_{\Sigma})(T_2 - T_1)$$



$$q = (8\text{W} / \text{m}^2\text{C}) * (3.14 * 0.03\text{m} * 50\text{m})(70\text{C} - 15\text{C})$$

$$q = 2072.4\text{W}$$

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ ΕΝΑΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ ΜΕΣΩ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ

Ομοιότητα ροών - Αδιάστατοι αριθμοί ομοιότητας

- Οι αριθμοί ομοιότητας εκφράζουν το **αδιάστατο λόγο** δύο «ανταγωνιστικών» μεγεθών: π.χ. αδρανειακή δύναμη / τριβή
- Ροές με ίδιους αριθμούς ομοιότητας είναι **όμοιες ποιοτικά και ποσοτικά**. Συνεπώς οι αριθμοί ομοιότητας είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για να ομαδοποιήσουν τις ροές.

Ομοιότητα ροών - Αδιάστατοι αριθμοί ομοιότητας

$$\text{Re} = \frac{\rho UL}{\mu} \rightarrow \text{Αριθμός Reynolds}$$

(σχετίζεται με την εξαναγκασμένη συναγωγή)

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \rightarrow \text{Αριθμός Prandtl}$$

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T - T_\infty)L^3}{\nu^2} \rightarrow \text{Αριθμός Grashof}$$

(σχετίζεται με την ελεύθερη συναγωγή)

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \rightarrow \text{Αριθμός Rayleigh}$$

Αριθμός Nusselt

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή

$$Nu = \frac{h L}{k} \rightarrow h = \frac{Nu k}{L}$$

$$Nu \geq 1$$

Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας

h : συντελεστής θερμικής μεταφοράς με συναγωγή ($W m^{-2} K^{-1}$)

L : χαρακτηριστικό μήκος (π.χ. το μήκος της θερμαινόμενης πλάκας) (m)

k : θερμική αγωγιμότητα του ρευστού ($W m^{-1} K^{-1}$)

Nu : ο αριθμός Nusselt της ροής

Συντελεστής Θερμικής μεταφοράς με συναγωγή - h

Βεβιασμένη συναγωγή σε οριζόντια επίπεδη πλάκα

Για ομαλή ροή

$$Nu = 0.332 Re^{0.5} Pr^{0.33}$$

Για τυρβώδη ροή

$$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{0.33}$$

Ελεύθερη συναγωγή σε κατακόρυφη επίπεδη πλάκα

Για ομαλή ροή

$$Nu = 0.59 Ra^{0.25}$$

Για τυρβώδη ροή

$$Nu = 0.14 Ra^{0.33}$$

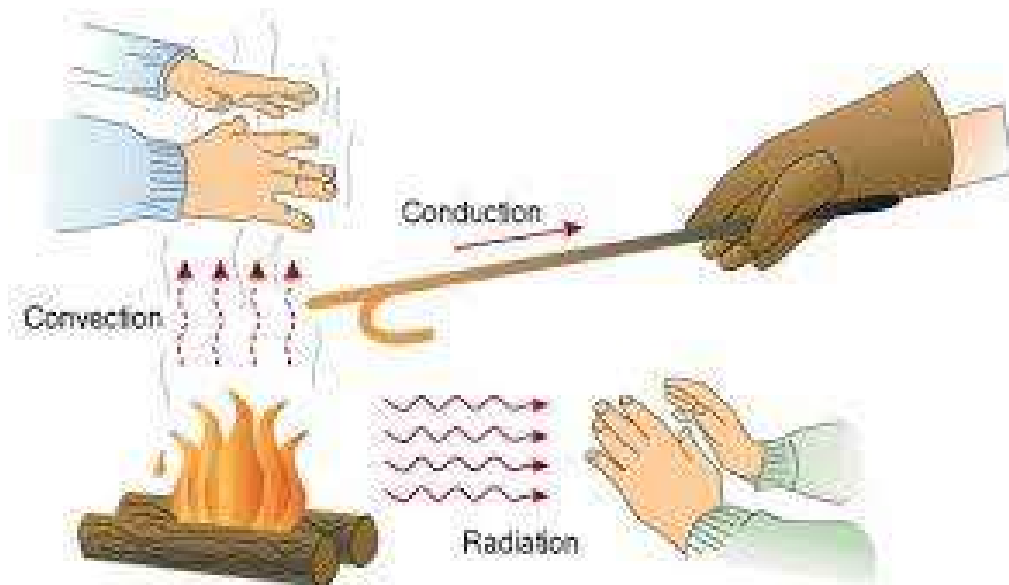
Αριθμός Reynolds, $Re = \frac{\rho UL}{\mu}$

Όπου

- L : χαρακτηριστικό μήκος, m
- U : ταχύτητα του ρευστού, m s⁻¹
- ρ : πυκνότητα του ρευστού, kg m⁻³
- μ : δυναμικό ιξώδες του ρευστού, kg·m⁻¹·s⁻¹

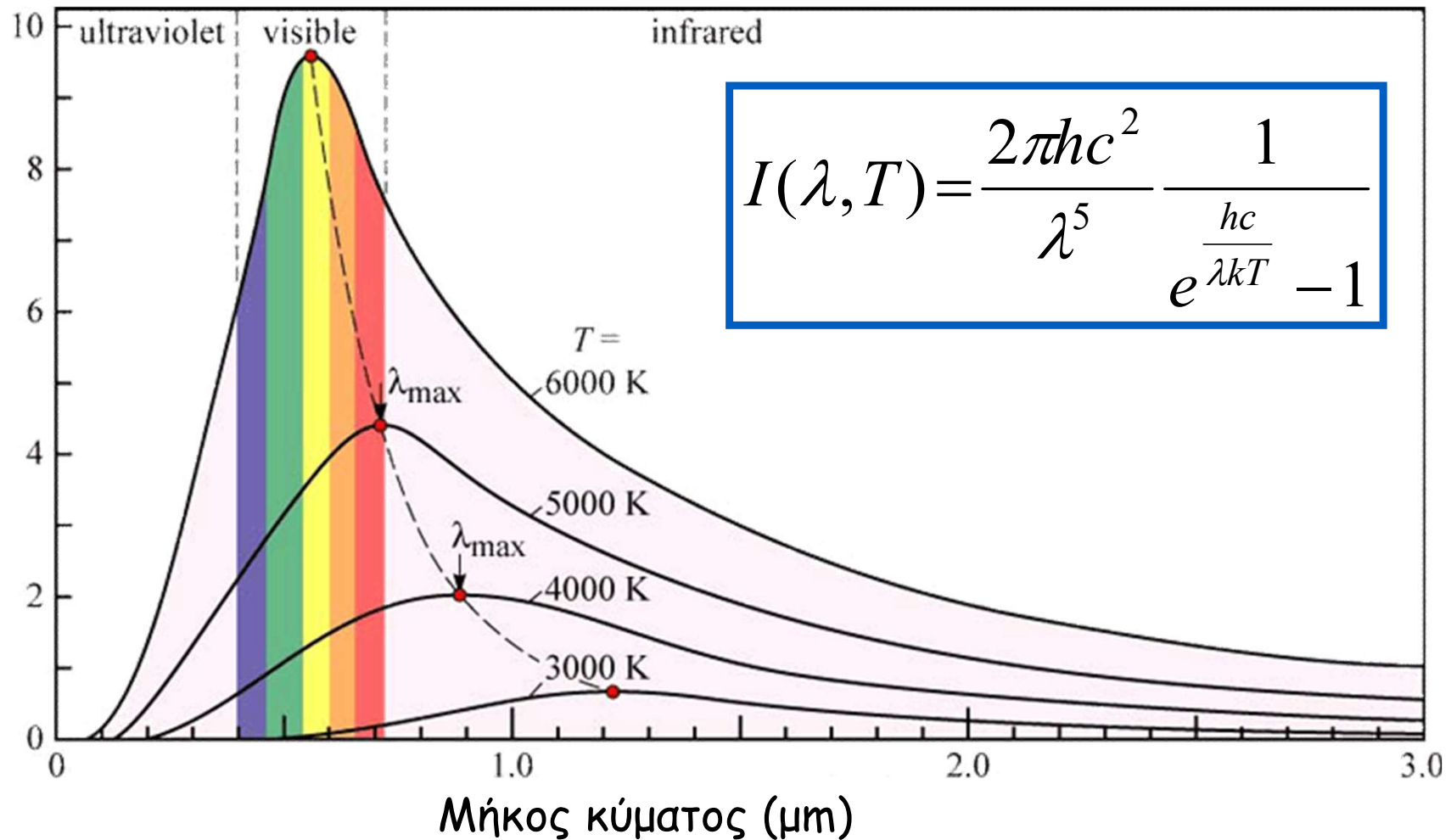
Ακτινοβολία

Η **Θερμική ακτινοβολία** είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και εκπέμπεται από κάθε σώμα θερμοκρασίας $T > -273^{\circ}\text{C}$ (απόλυτο μηδέν)



Μήκος Κύματος λ
Θερμικής Ακτινοβολίας:
100 - 100000 nm
ή
0,1 - 100 μm

Ακτινοβολία μέλανος σώματος



Ακτινοβολία μέλανος σώματος - Νόμος του Planck

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

$I(\lambda, T)$: φασματική ένταση ακτινοβολίας ($W m^{-2} nm^{-1}$)

T : θερμοκρασία (K)

λ : μήκος κύματος (μονάδες μήκους, συνήθως nm ή μm)

h : σταθερά του Planck ($6.626 \times 10^{-34} J s$)

c : ταχύτητα του φωτός ($3 \times 10^8 m s^{-1}$)

Ακτινοβολία μέλανος σώματος - Νόμος του Wien

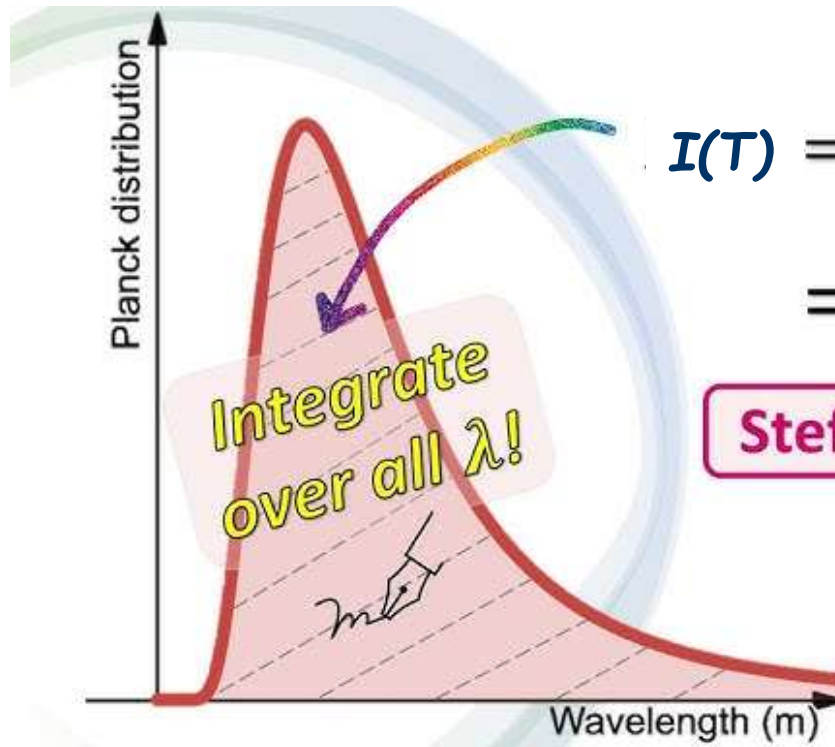
$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

λ_{\max} : μήκος κύματος με τη μέγιστη φασματική ένταση ακτινοβολίας
(μονάδες μήκους, συνήθως nm ή μm)

T : θερμοκρασία (K)

b : σταθερά του Wien (2.8978×10^{-3} K m)

Συνολική εκπομπή ακτινοβολίας μέλανος σώματος - Νόμος Stefan - Boltzmann



$$I(T) = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda$$
$$= \sigma \cdot T^4$$

Stefan-Boltzmann

$$I = \sigma \varepsilon T^4$$

Μη μέλαν σώμα

I : ένταση ακτινοβολίας (W m^{-2})

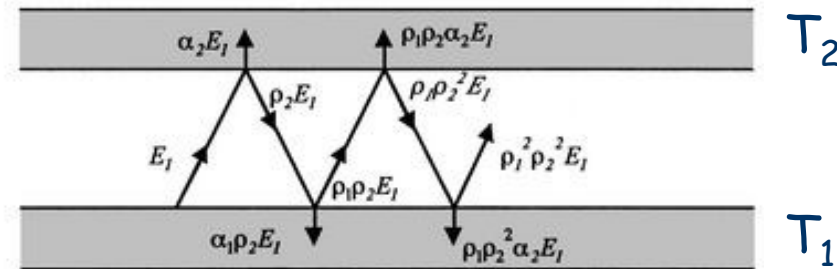
T : θερμοκρασία (K)

ε : συντελεστής εκπομπής-απορρόφησης (για μέλαν σώμα $\varepsilon=1$)

σ : σταθερά των Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

Μεταφορά Θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών

ρ : ανακλαστικότητα
 α : απορροφητικότητα



$$q = \sigma \epsilon_{12} A (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\epsilon_{12} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2}$$

q : ροή θερμότητας (W)

A : επιφάνεια (m²)

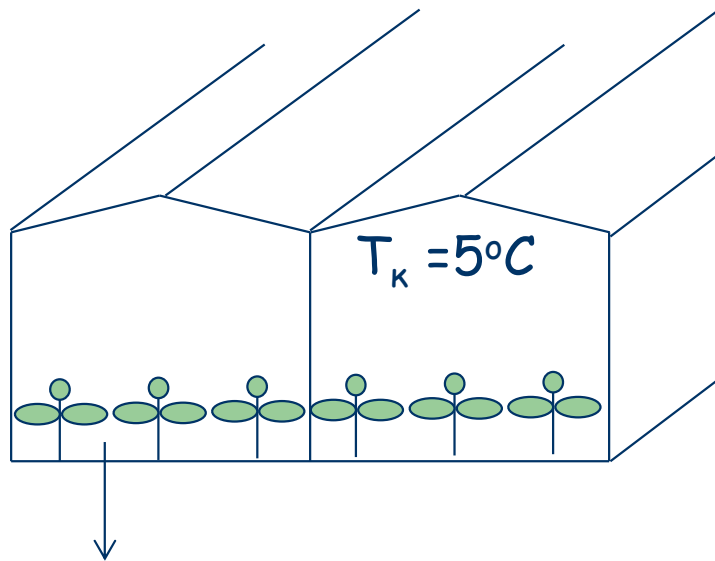
T : θερμοκρασία (K):

ϵ_{12} : συντελεστής ανταλλαγής ακτινοβολίας

ϵ_1, ϵ_2 : συντελεστές εκπομπής-απορρόφησης των δύο επιφανειών

σ : σταθερά των Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

Μεταφορά Θερμότητας με ακτινοβολία - Παράδειγμα



$$T_\phi = 15^\circ\text{C}$$

Δίνονται:

$$T(K) = 273 + T(C)$$

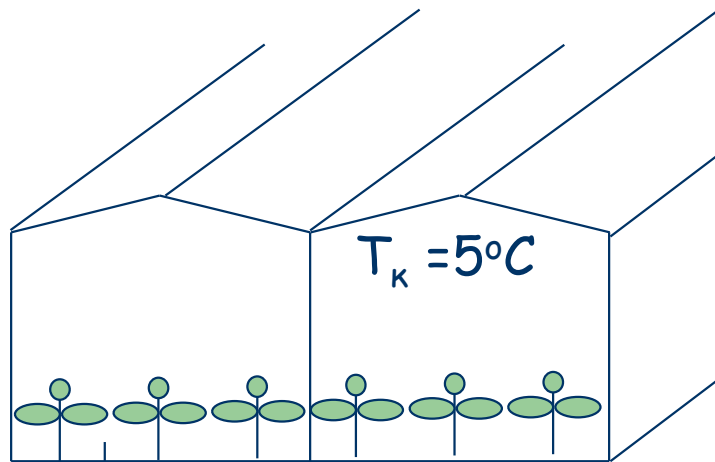
Να υπολογιστεί η **ροή θερμότητας** ανά μονάδα επιφάνειας που ανταλλάσσεται μεταξύ **φυτών** και καλύμματος οροφής λόγω **ακτινοβολίας**

Τα φυτά και η οροφή να θεωρηθούν επίπεδες και παράλληλες επιφάνειες

$$\begin{aligned}\epsilon_\phi &= 0.8 \\ \epsilon_k &= 0.4 \\ \sigma &= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}\end{aligned}$$



Μεταφορά Θερμότητας με ακτινοβολία - Παράδειγμα



$$T_{\phi} = 15^{\circ}\text{C}$$

$$q = (5.67 * 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4) * (0.36) * (1\text{m}^2) * [(288\text{K})^4 - (278\text{K})^4]$$

$$q = \sigma \varepsilon_{\phi-\kappa} A (T_{\phi}^4 - T_{\kappa}^4)$$

$$\varepsilon_{\phi-\kappa} = \frac{\varepsilon_{\phi} \varepsilon_{\kappa}}{\varepsilon_{\phi} + \varepsilon_{\kappa} - \varepsilon_{\phi} \varepsilon_{\kappa}}$$

$$\varepsilon_{\phi-\kappa} = \frac{0.8 * 0.4}{0.8 + 0.4 - 0.8 * 0.4} = 0.36$$

$$q = 18.5\text{W}$$

Θερμοκρασία ουρανού

- Η απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας προς τον ουρανό περιγράφεται ορίζοντας τον ουρανό ως μέλαν σώμα με θερμοκρασία T_{sky}
- Η θερμοκρασία T_{sky} εξαρτάται από την νέφωση.
- Υπάρχουν διάφοροι εμπειρικοί τύποι που συνδέουν την T_{sky} με την θερμοκρασία του αέρα και την νέφωση

Για καθαρό ουρανό

$$T_{sky} = 0.05532 T_{air}^{1.5}$$

Θερμοκρασία ουρανού

<https://physics.stackexchange.com/questions/153839/what-is-the-temperature-of-the-clear-night-sky-from-the-surface-of-earth>

$$0.74 \sigma T_{sky}^4 = (1 + K C^2) 8.78 \times 10^{-13} T_{air}^{5.852} RH^{0.07195}$$

Όπου K είναι παράμετρος που εξαρτάται από το ύψος των νεφών και έχει τιμή 0.34 για πολύ χαμηλά σύννεφα και 0.06 για πολύ ψηλά.

C είναι το ποσοστό του ουρανού που καλύπτεται από σύννεφα.

Θερμοκουρτίνες



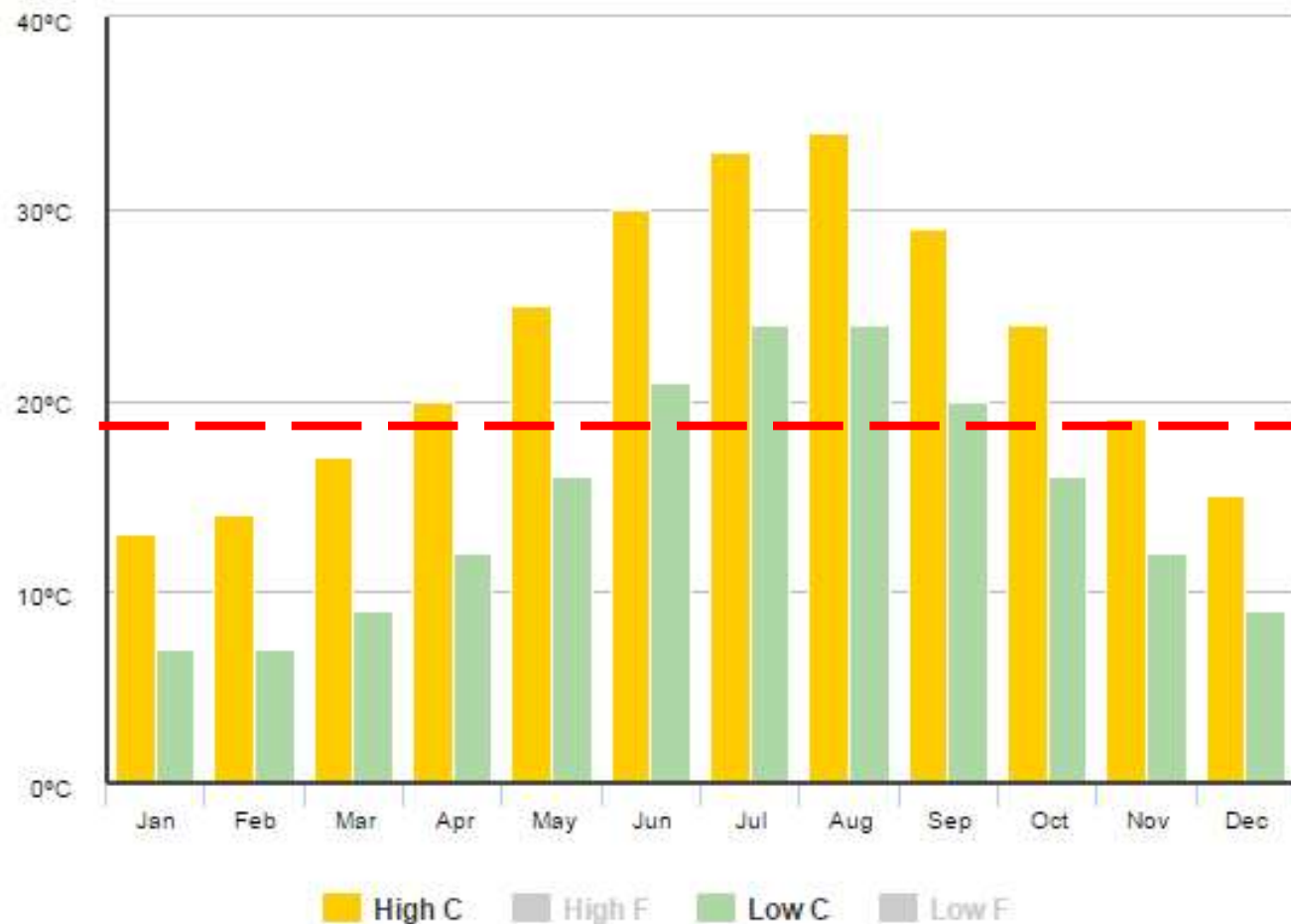
Οι θερμοκουρτίνες έχουν μεγάλη ανακλαστικότητα σε όλα τα μήκη κύματος. Έτσι ανακλούν τη θερμική ακτινοβολία στα φυτά



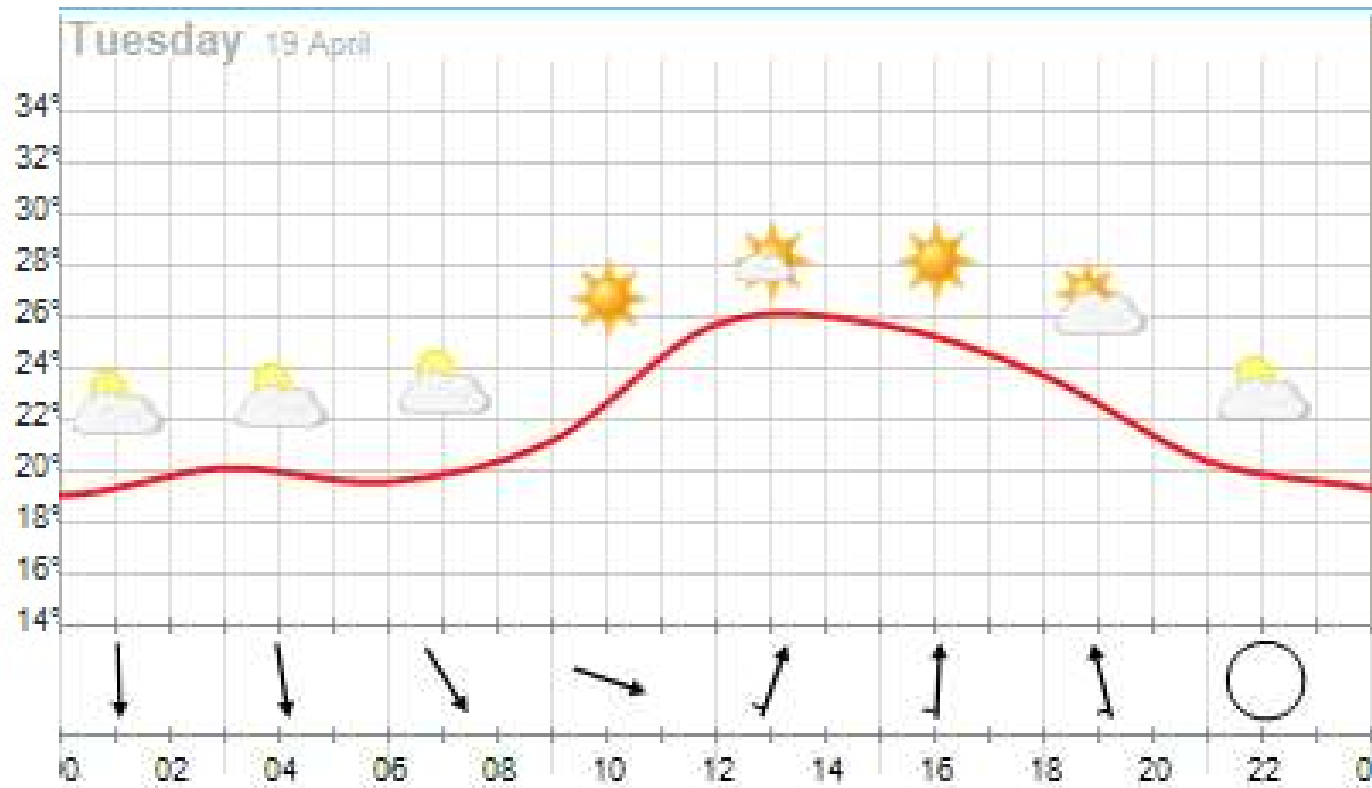
Οι θερμοκουρτίνες εμποδίζουν τη κίνηση του θερμού αέρα προς το κάλυμμα και μειώνουν τις απώλειες λόγω συναγωγής



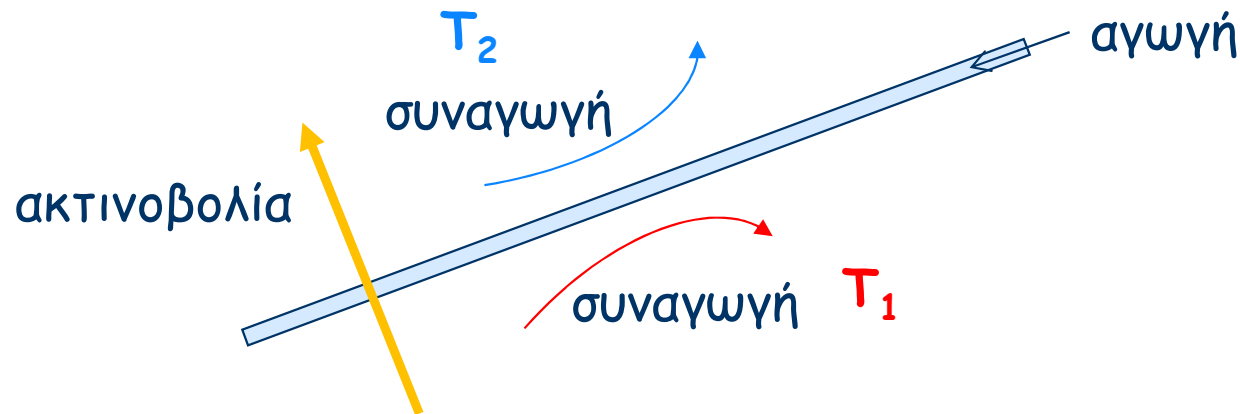
Μέσες μέγιστες/ελάχιστες Θερμοκρασίες στην Αττική



Μεταβολές Θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια 24 ωρών



Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας



$$q = U A (T_2 - T_1)$$

q : ροή θερμότητας (W)

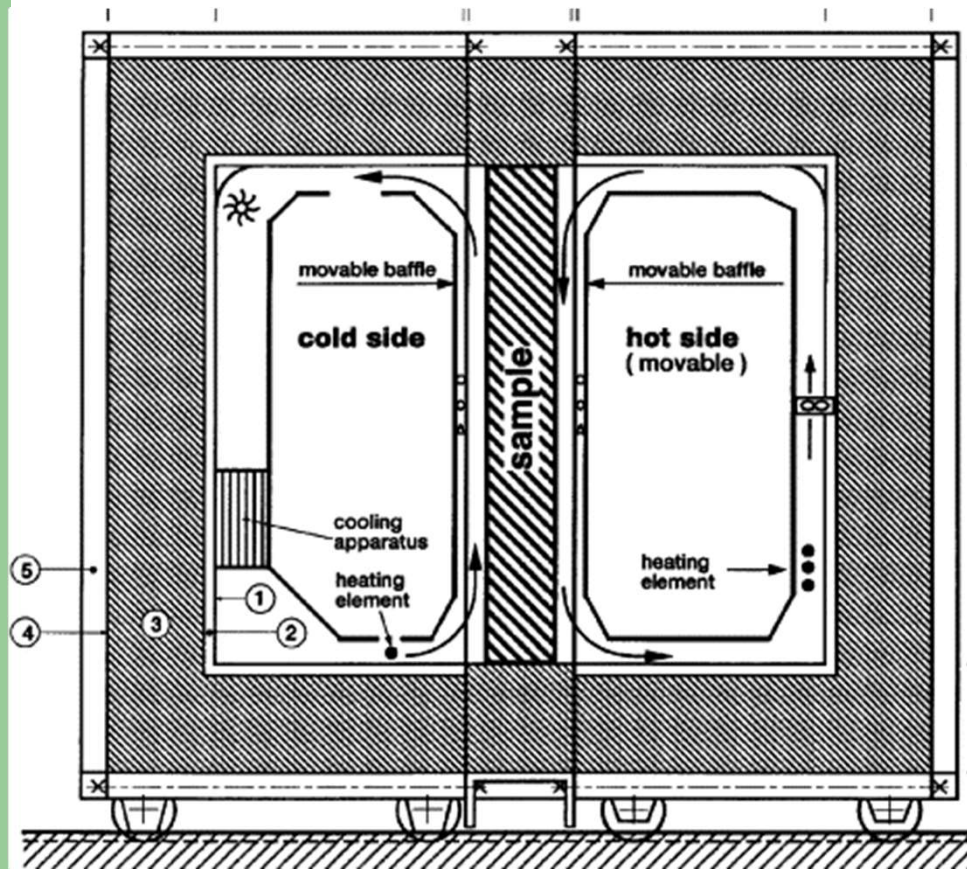
T : θερμοκρασία (K)

U : συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($W m^{-2} K^{-1}$)

Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Property Profile	Value	Test Method
Panel width ctc Standard length	1042.4 ± 2.0mm ≤6 meter -0+20 mm >6 meter -0+30 mm	
Panel thickness	38mm ±0.8 mm	
Weight	4.7 kg/m ² ±5%	
Hail impact	diam 20 mm V≥ 21m/sec	TNO Test
Temperature resistance	-40 up to +100°C	UL 746 B
U-Value	1.245 W/m ² K	ISO10077 (EN673)
Coefficient of linear thermal expansion	7 x 10 ⁻⁵ 1/°C	DIN 53752

Μέθοδος μέτρησης του συντελεστή μεταφοράς U



Μέθοδος μέτρησης συντελεστή U



Πειραματική εγκατάσταση μέτρησης συντελεστή U

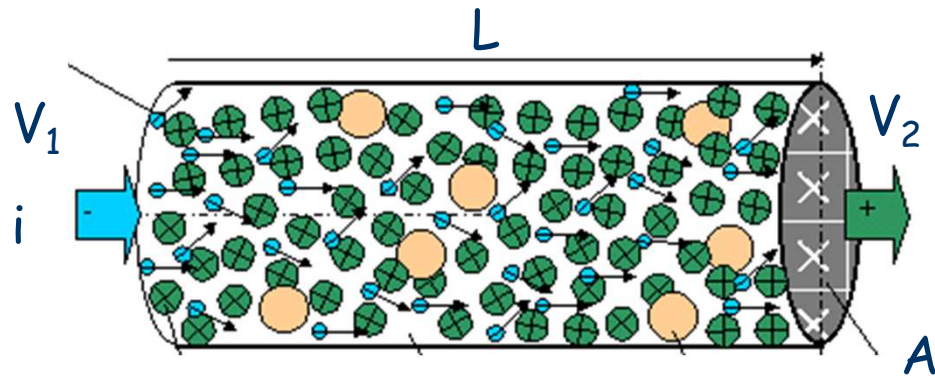
Θερμικές Αντιστάσεις

Νόμος του Ohm

$$i = \frac{A}{\rho L} (V_2 - V_1)$$

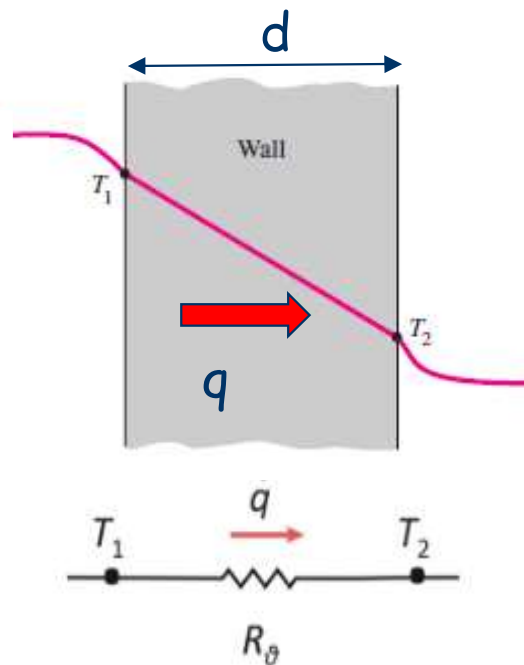
$$i = \frac{1}{R_{el}} (V_2 - V_1)$$

Ηλεκτρική Αντίσταση: $R_{el} = \rho L / A$
 ρ : ηλεκτρική αγωγιμότητα υλικού



Η διαφορά δυναμικού $V_2 - V_1$
προκαλεί τη ροή του ρεύματος -
ηλεκτρική ενέργεια

Θερμικές Αντιστάσεις - Αγωγή



Η διαφορά θερμοκρασίας $T_1 - T_2$ προκαλεί τη ροή θερμότητας - θερμική ενέργεια

$$q = \frac{kA}{d} (T_1 - T_2)$$



$$q = \frac{1}{R_{th-cond}} (T_1 - T_2)$$



$$R_{th-cond} = \frac{d}{kA}$$

Θερμική Αντίσταση

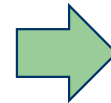
k: θερμική αγωγιμότητα υλικού

Θερμικές Αντιστάσεις - Συναγωγή

$$q = h A (T_1 - T_2)$$



$$q = \frac{1}{R_{th-conv}} (T_1 - T_2)$$

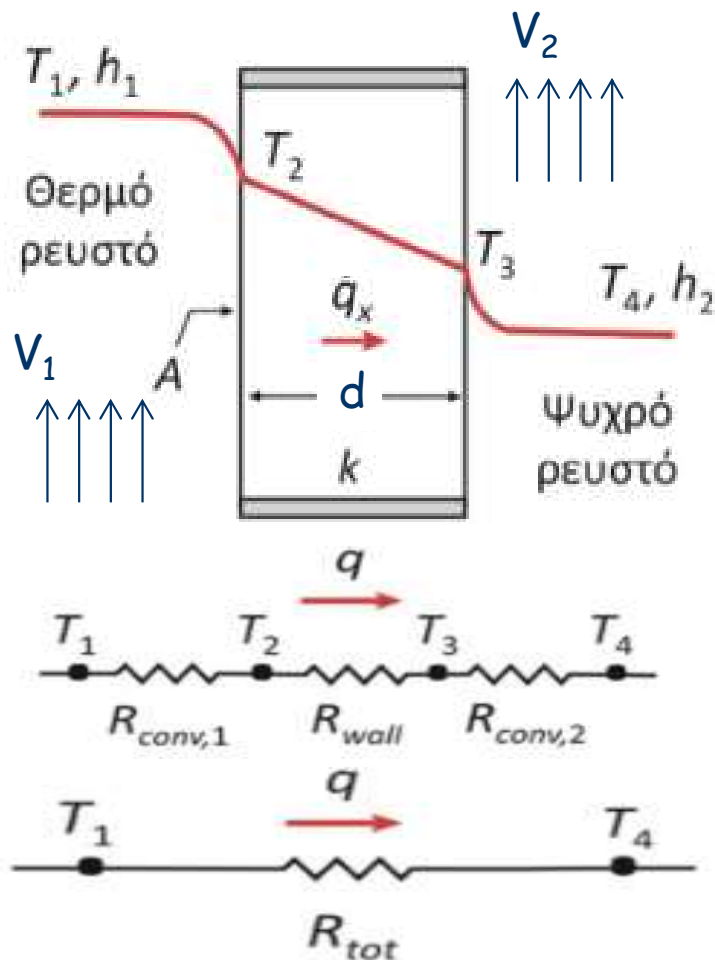


$$R_{th-conv} = \frac{1}{hA}$$



Θερμική Αντίσταση
h: συντελεστής μεταφοράς
Θερμότητας με συναγωγή

Θερμικές Αντιστάσεις - Αγωγή και Συναγωγή



$$q = \frac{1}{R_{tot}} (T_i - T_o)$$

Συνολική Θερμική Αντίσταση

$$R_{tot} = R_{th-cond} + R_{th-co}$$

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{d}{k A} + \frac{1}{h_2 A}$$

Στην κατάσταση ισορροπίας, η ροή θερμότητας q παραμένει σταθερή