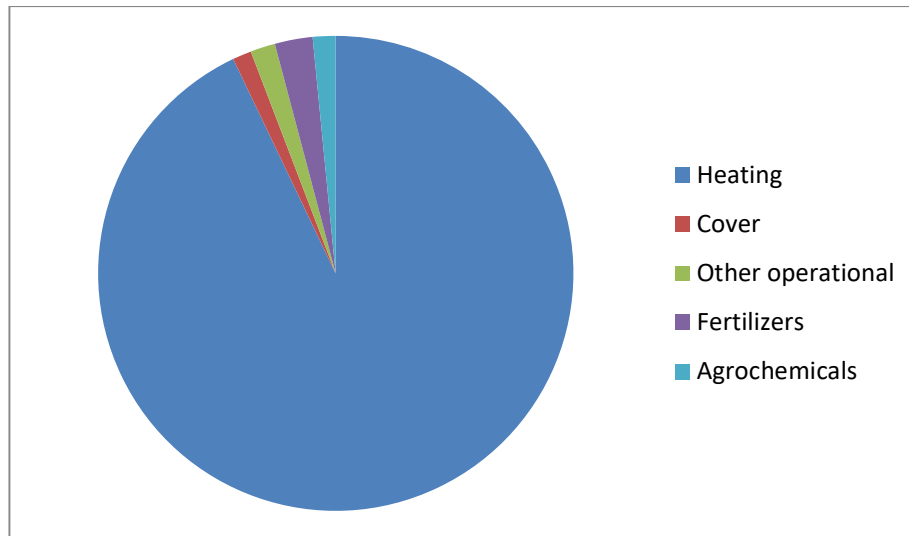


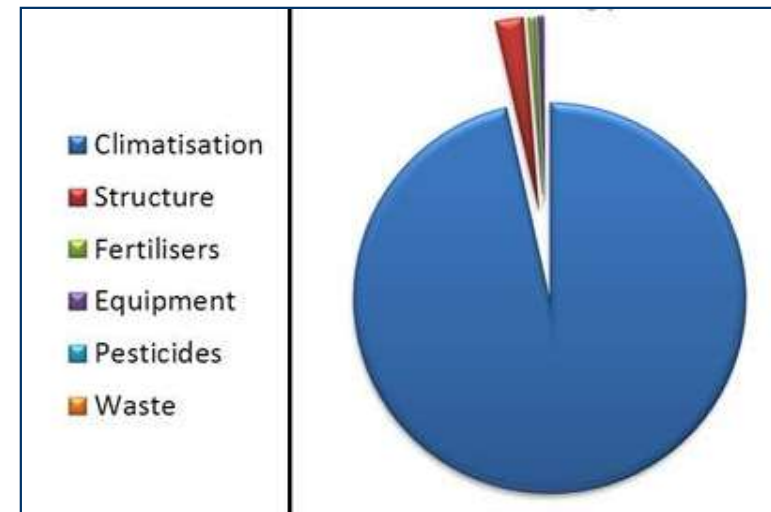
Θερμότητα



Κατανομή κατανάλωσης ενέργειας στο θερμοκήπιο



ΕΛΛΑΔΑ



ΟΛΛΑΝΔΙΑ

Η θέρμανση είναι βασική κατανάλωση ενέργειας στο θερμοκήπιο

Ενδεικτικές μέσες καταναλώσεις ενέργειας σε θερμοκήπια στην Ελλάδα

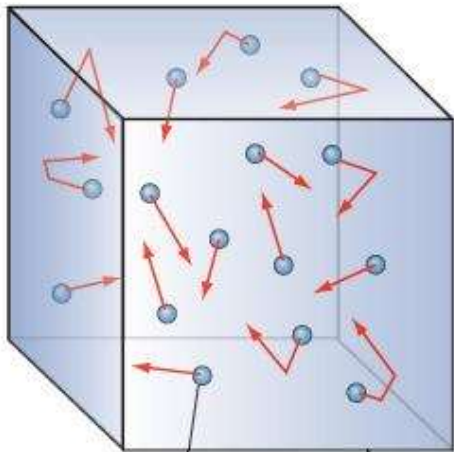
Τυπική κατανάλωση ενέργειας σε θερμοκήπιο με πλαστικό κάλυμμα όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό έχει ρυθμιστεί στους 18°C

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

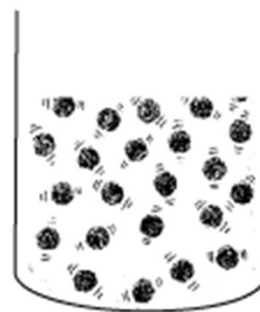
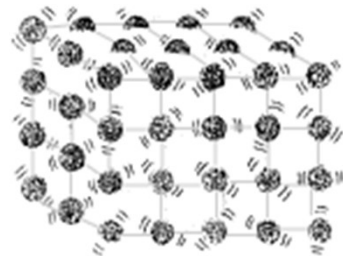
Η μεταφορά θερμότητας και το μικροκλίμα του θερμοκηπίου

- 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.



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)

Υλικό	Ειδική θερμοχωρητικότητα (J K ⁻¹ kg ⁻¹)
Νερό	4200
Σίδηρος	440
Γυαλί	670
Ξύλο	1700
Πολυαιθυλένιο (LDPE)	2300
Χώμα	800

Θερμοκρασία

Δύο σώματα έχουν την ίδια θερμοκρασία όταν δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας από το ένα στο άλλο (θερμική ισορροπία)

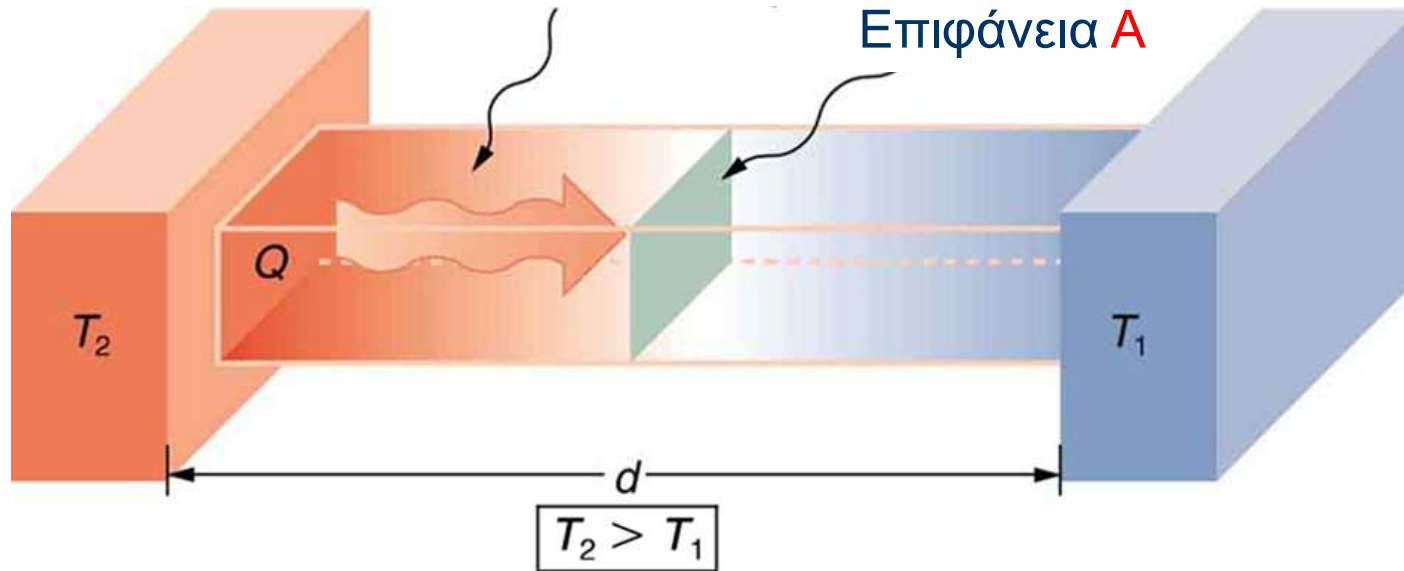


Βαθμοί Κελσίου °C
Βαθμοί Κέλβιν K
Απόλυτο μηδέν 0°K



Μεταφορά θερμότητα με αγωγή - Θερμική αγωγιμότητα

Υλικό θερμικής αγωγιμότητας λ



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

Νόμος του Fourier

Θερμική αγωγιμότητα

Η **θερμική αγωγιμότητα** είναι ιδιότητα του υλικού

λ : θερμική αγωγιμότητα ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή συμβαίνει χωρίς τη μεταφορά μάζας

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

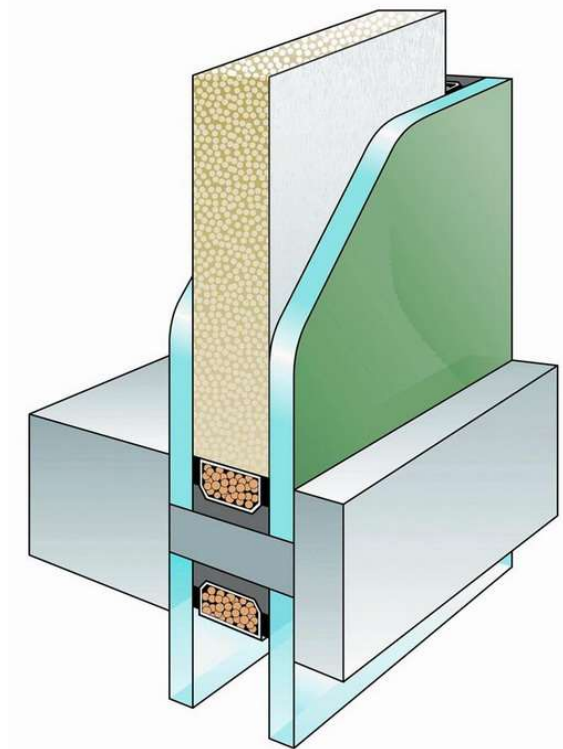
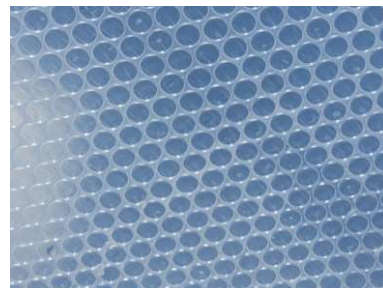


CONDUCTION OF HEAT

Θερμική αγωγιμότητα

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

Μόνωση και μονωτικά υλικά



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

Θερμοκήπια με διπλό φουσκωτό κάλυμμα

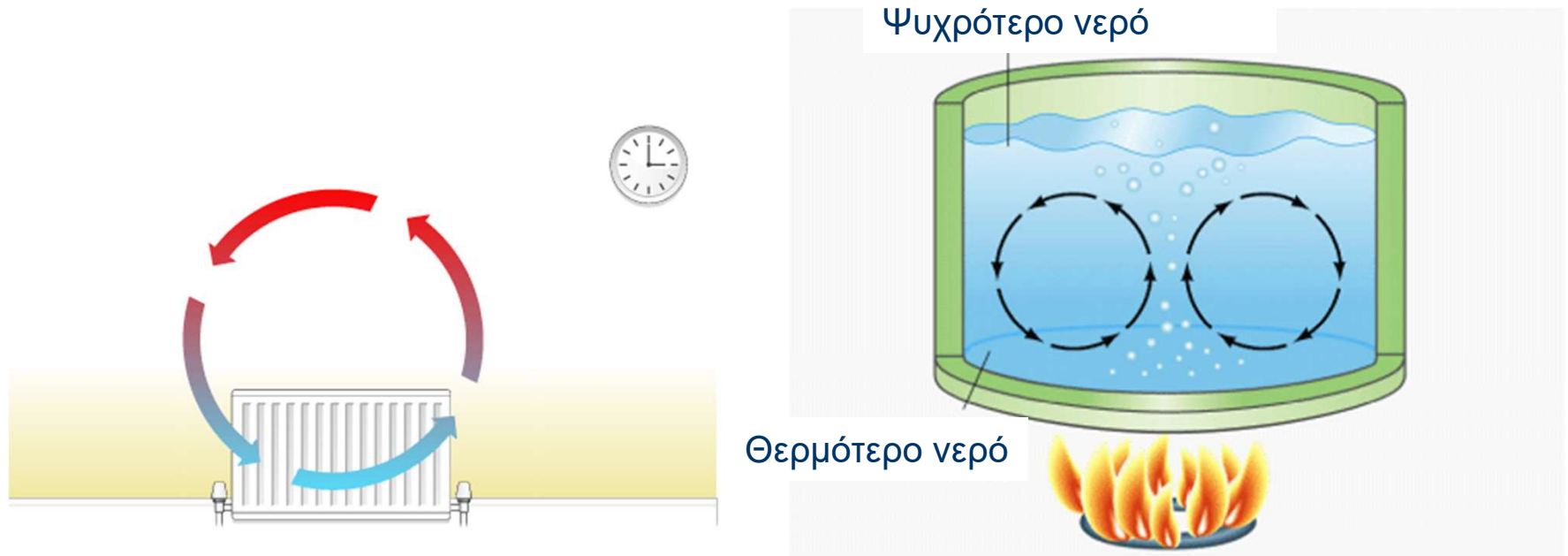


Αντλίες αέρα με πιεσοστάτη διατηρούν σταθερή τη πίεση μεταξύ των δύο φύλλων

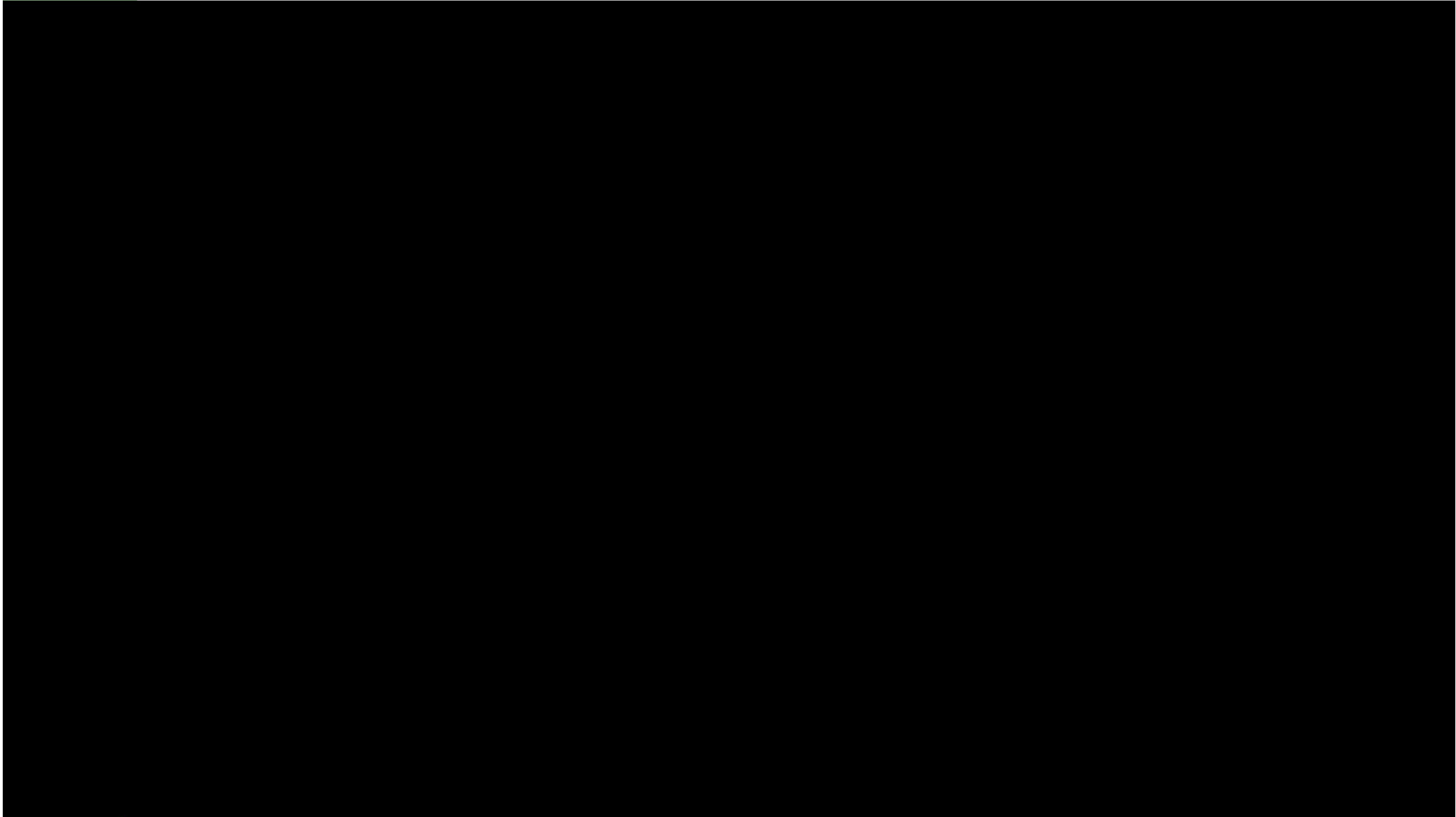
Η μικρή θερμική αγωγιμότητα του αέρα εμποδίζει τις απώλειες



Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή



Μεταφορά θερμότητας με τη βοήθεια ροής ρευστού



Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

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

Q : θερμότητα (J)

t : χρόνος (s)

A : επιφάνεια επαφής στερεού – ρευστού (m²)

T₁: θερμοκρασία ρευστού (K)

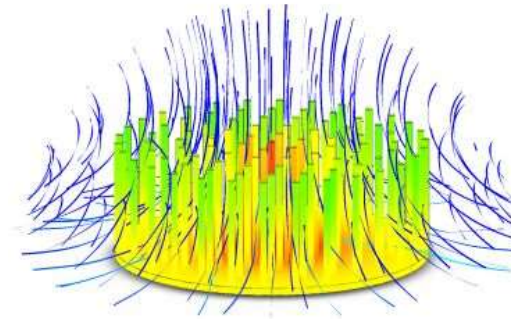
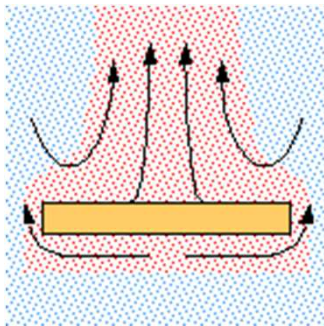
T₂: θερμοκρασία στερεού (K)

h : συντελεστής θερμικής μεταφοράς με συναγωγή (W m⁻² K⁻¹)

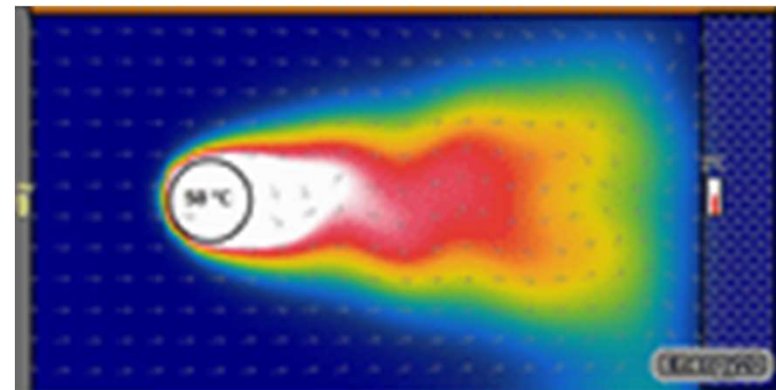
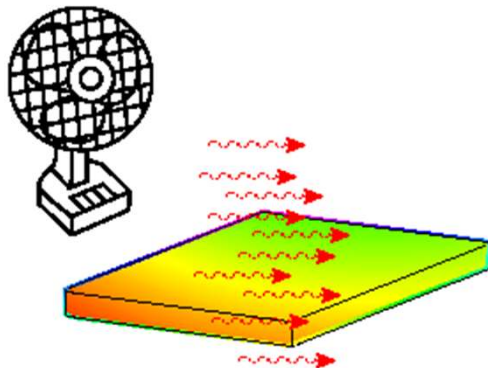
Ο συντελεστής h δεν είναι ιδιότητα του στερεού ή του ρευστού αλλά της ροής

Τύποι συναγωγής

Ελεύθερη συναγωγή



Βεβιασμένη συναγωγή



Ελεύθερη συναγωγή

Το ρευστό κινείται λόγω βαρύτητας επειδή η πυκνότητά του μειώνεται όσο η θερμοκρασία του αυξάνεται.

Ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς h εξαρτάται από:

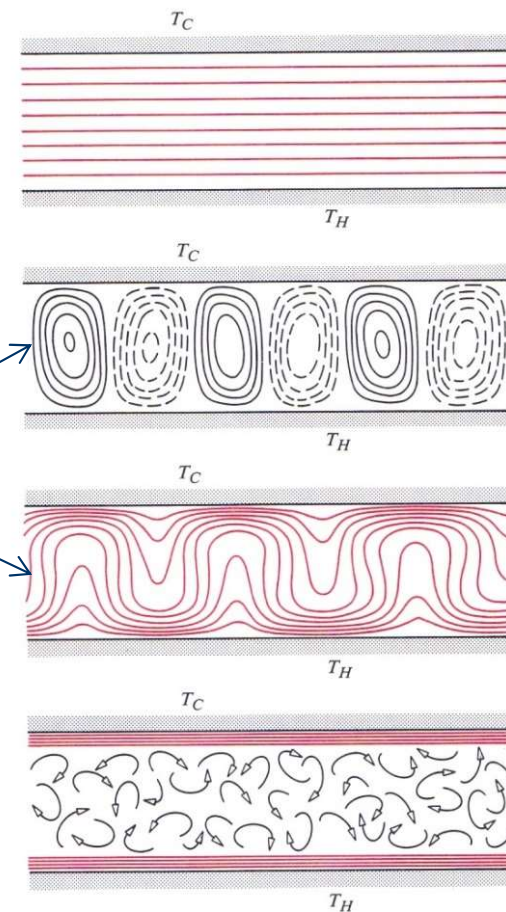
- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στερεού
- τη θερμική αγωγιμότητα, τη πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού
- τη διαφορά θερμοκρασίας που προκαλεί τη ροή και τη μεταφορά θερμότητας

Ελεύθερη συναγωγή μεταξύ δύο παράλληλων οριζόντιων επιφανειών

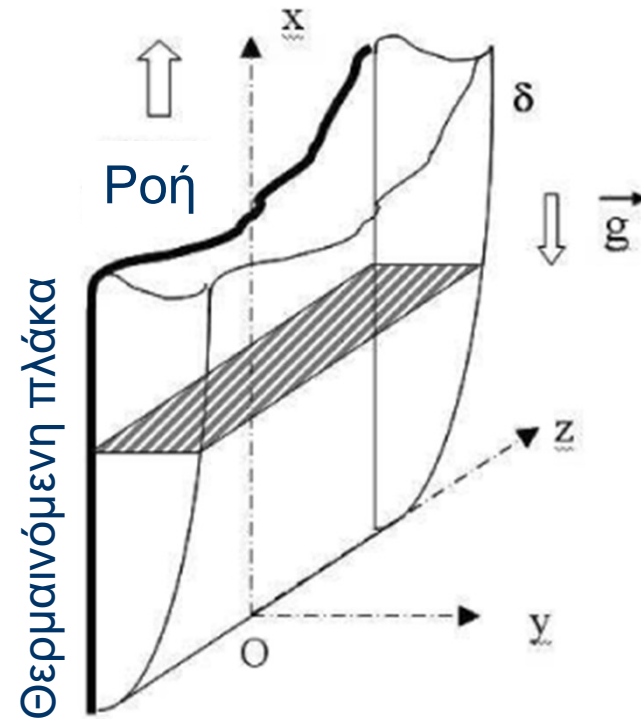
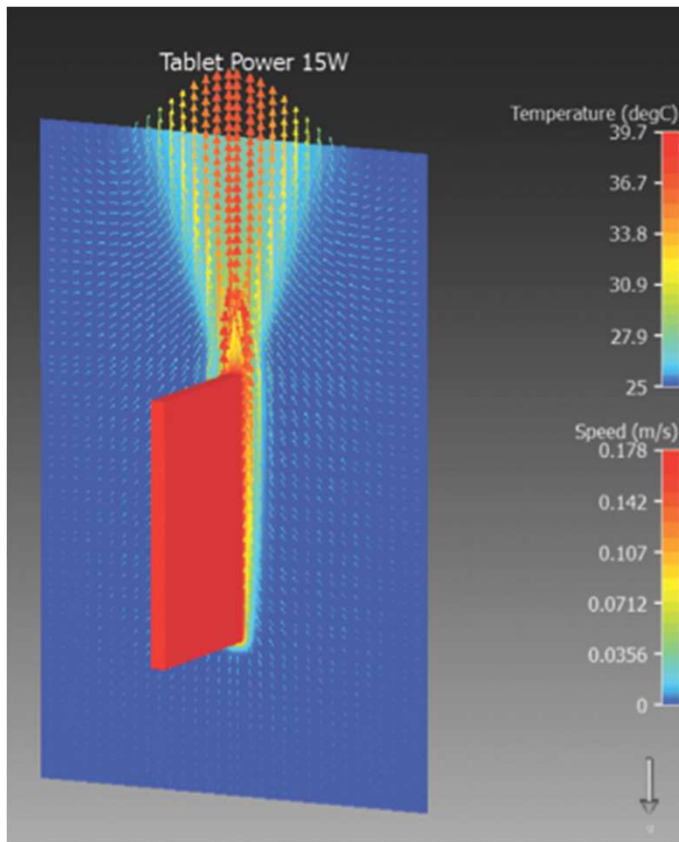
Περίπτωση αγωγής
(το ρευστό είναι ακίνητο)

Συναγωγή με ομαλή ροή
σε μορφή κυψελίδων
(cellular flow)

Συναγωγή με τυρβώδη ροή

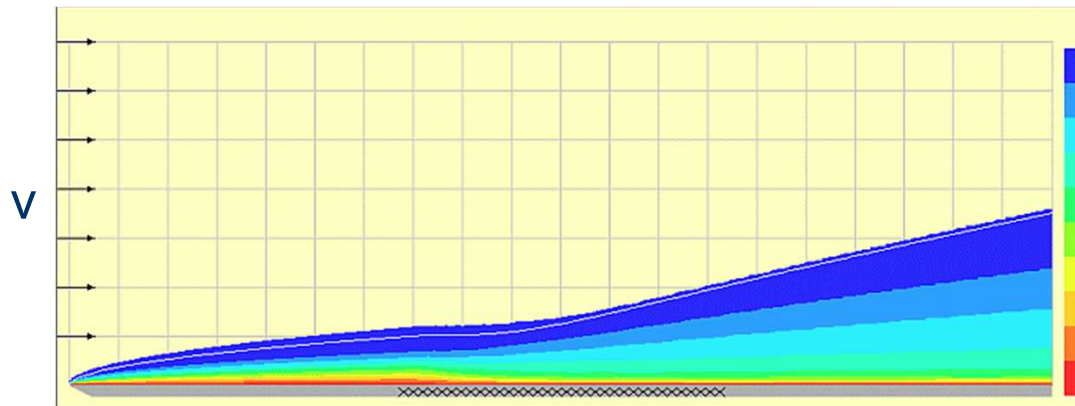


Ελεύθερη συναγωγή δίπλα σε θερμαινόμενη πλάκα



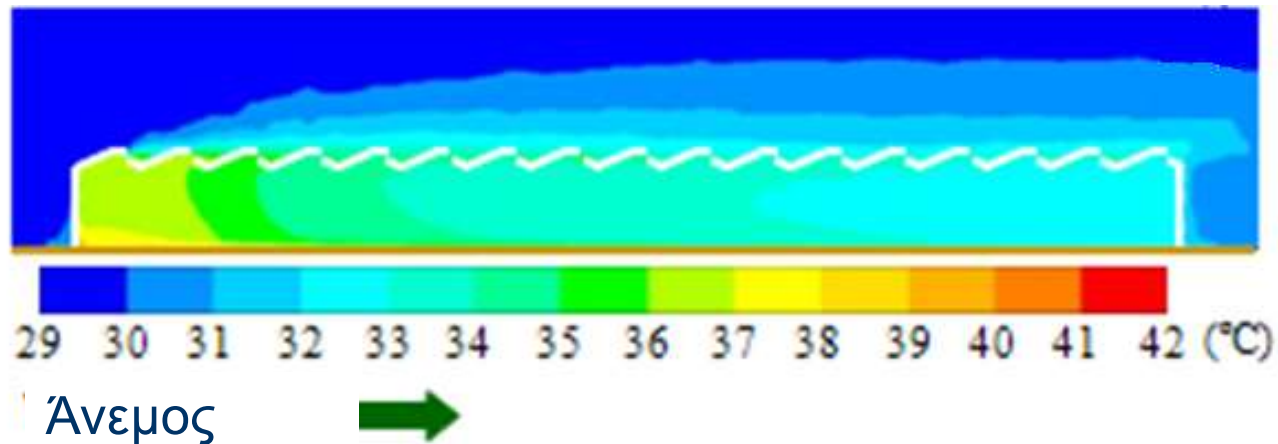
Στρώμα ροής δίπλα σε θερμαινόμενη πλάκα

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



Οι διαβαθμίσεις του χρώματος δείχνουν τη κατανομή της θερμοκρασίας

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

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Αριθμός Reynolds

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$$

Αριθμός Prandtl

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

Αριθμός Grashof

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Αριθμός Rayleigh

Συντελεστής θερμικής μεταφοράς για ελεύθερη συναγωγή

$$h = \frac{Nu \lambda}{L}$$

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

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

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

Nu : ο αριθμός Nusselt της ροής

Για κατακόρυφη πλάκα:

1) Ροή ομαλή: $Nu = 0.59 Ra^{0.25}$

2) Τυρβώδης ροή: $Nu = 0.14 Ra^{0.33}$

Συντελεστής θερμικής μεταφοράς για ελεύθερη συναγωγή

Ο αριθμός Ra (Rayleigh) ορίζεται

$$Ra = Gr Pr$$

Gr: αριθμός Grashof

Pr: αριθμός Prandtl

$$Gr = \frac{g L^3 \beta (T_p - T_a)}{\eta^2}$$

Όπου:

- g : επιτάχυνση της βαρύτητας = 9.81, m/s²
- L : χαρακτηριστικό μήκος, m
- β : συντελεστής θερμικής διαστολής του ρευστού, K⁻¹
- T_p : θερμοκρασία της πλάκας, °K.
- T_a : θερμοκρασία του αέρα, °K
- η : κινηματικό ιξώδες του αέρα, m²·s⁻¹

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$$

Όπου:

- μ : δυναμικό ιξώδες του ρευστού, kg·m⁻¹·s⁻¹
- C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού, J kg⁻¹ K⁻¹
- λ : θερμική αγωγιμότητα του ρευστού, W m⁻¹ K⁻¹

Συντελεστής θερμικής μεταφοράς για βεβιασμένη συναγωγή

Βεβιασμένη συναγωγή σε οριζόντια επίπεδη πλάκα

Για ομαλή ροή

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

Για τυρβώδη ροή

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

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

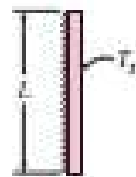
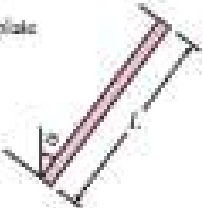

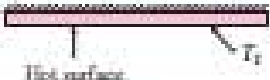
Όπου

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



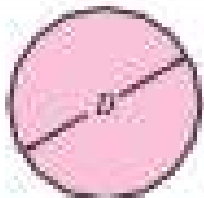
Ελεύθερη συναγωγή - Αριθμοί Nusselt για επίπεδες πλάκες

TABLE 9-1

Empirical correlations for the average Nusselt number for natural convection over surfaces

Geometry	Characteristic length L_c	Range of Ra	Nu
Vertical plate 	L	10^4 - 10^8 10^6 - 10^{12} Entire range	$Nu = 0.59Ra^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left[0.825 + \frac{0.387Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right]^2$ (9-21) (complex but more accurate)
Inclined plate 	L		Use vertical plate equations for the upper surface of a cold plate and the lower surface of a hot plate. Replace g by $g \cos \theta$ for $Ra < 10^8$
Horizontal plate (Surface area A and perimeter p) (a) Upper surface of a hot plate (or lower surface of a cold plate) 	A, p	10^4 - 10^8 10^7 - 10^{11}	$Nu = 0.54Ra^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra^{1/3}$ (9-23)
(b) Lower surface of a hot plate (or upper surface of a cold plate) 		10^6 - 10^{11}	$Nu = 0.27Ra^{1/4}$ (9-24)

Ελεύθερη συναγωγή - Αριθμοί Nusselt για άλλες επιφάνειες

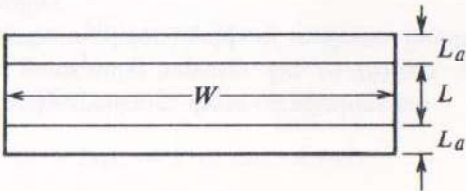
Vertical cylinder 	l		A vertical cylinder can be treated as a vertical plate when $D \geq \frac{35l}{Gr_l^{0.25}}$
Horizontal cylinder 	D	$Ra_D \leq 10^9$	$Nu = \left[0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.55/Pr)^{1/4}]} \right]^2 \quad (9-25)$
Sphere 	D	$Ra_D \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0.7)$	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.46/Pr)^{1/4}]} \quad (9-25)$

Βεβαιασμένη συναγωγή - Αριθμοί Nusselt για άλλες επιφάνειες

Item No	Configuration	Correlations	Comments																																			
1	Turbulent flow in smooth ducts with fully developed hydrodynamics and heat transfer	$f = (0.790 \ln Re_{D_h} - 1.64)^{-2}; \quad 10^4 < Re_{D_h} < 5 \times 10^6 \quad (4.42)$ $Nu_{D_h} = \frac{(f/8)(Re_{D_h} - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}; \quad 3000 < Re_{D_h} < 10^6, \quad 0.5 < Pr \quad (4.45)$	$D_h = \frac{4A_c}{\mathcal{P}} (= D \text{ for a circular tube})$ <p>Exponents for property and temperature ratio corrections for duct flows (subscripts <i>s</i> and <i>b</i> refer to wall and bulk values, respectively):</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type of Flow</th> <th>Fluid</th> <th>Wall Condition</th> <th><i>f</i> <i>m</i></th> <th><i>Nu</i> <i>n</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Laminar</td> <td rowspan="2">Liquids (μ_s/μ_b)</td> <td>Heating</td> <td>0.58</td> <td>-0.11</td> </tr> <tr> <td>Cooling</td> <td>0.50</td> <td>-0.11</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Gases (T_s/T_b)</td> <td>Heating</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Cooling</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Turbulent</td> <td rowspan="2">Liquids (μ_s/μ_b)</td> <td>Heating</td> <td>0.25</td> <td>-0.25</td> </tr> <tr> <td>Cooling</td> <td>0.25</td> <td>-0.11</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Gases (T_s/T_b)</td> <td>Heating</td> <td>-0.2</td> <td>-0.55</td> </tr> <tr> <td>Cooling</td> <td>-0.1</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	Type of Flow	Fluid	Wall Condition	<i>f</i> <i>m</i>	<i>Nu</i> <i>n</i>	Laminar	Liquids (μ_s/μ_b)	Heating	0.58	-0.11	Cooling	0.50	-0.11	Gases (T_s/T_b)	Heating	1	0	Cooling	1	0	Turbulent	Liquids (μ_s/μ_b)	Heating	0.25	-0.25	Cooling	0.25	-0.11	Gases (T_s/T_b)	Heating	-0.2	-0.55	Cooling	-0.1	0.0
Type of Flow	Fluid	Wall Condition	<i>f</i> <i>m</i>	<i>Nu</i> <i>n</i>																																		
Laminar	Liquids (μ_s/μ_b)	Heating	0.58	-0.11																																		
		Cooling	0.50	-0.11																																		
	Gases (T_s/T_b)	Heating	1	0																																		
		Cooling	1	0																																		
Turbulent	Liquids (μ_s/μ_b)	Heating	0.25	-0.25																																		
		Cooling	0.25	-0.11																																		
	Gases (T_s/T_b)	Heating	-0.2	-0.55																																		
		Cooling	-0.1	0.0																																		
2	Laminar flow in a pipe with fully developed hydrodynamics	$f = \frac{64}{Re_D}; \quad Re_D < 2300 \quad (4.39)$ $\overline{Nu}_D = 3.66 + \frac{0.065(D/L)Re_D Pr}{1 + 0.04[(D/L)Re_D Pr]^{2/3}}; \quad Re_D < 2300 \quad (4.50)$																																				
3	Laminar flow between parallel plates with fully developed hydrodynamics	$f = \frac{96}{Re_{D_h}}; \quad Re_{D_h} < 2800 \quad (\text{Table 4.5})$ $\overline{Nu}_{D_h} = 7.54 + \frac{0.03(D_h/L)Re_{D_h} Pr}{1 + 0.016[(D_h/L)Re_{D_h} Pr]^{2/3}}; \quad Re_{D_h} < 2800 \quad (4.51)$	$D_h = \frac{4A_c}{\mathcal{P}} = 2 \times \text{Plate spacing}$																																			
4	Laminar boundary layer on a flat plate	$\overline{C}_f = 1.328Re_L^{-1/2}; \quad 10^3 < Re_L \leq 5 \times 10^5 \quad (4.55)$ $\overline{Nu} = 0.664Re_L^{1/2}Pr^{1/3}; \quad 10^3 < Re_L \leq 5 \times 10^5, \quad Pr > 0.5 \quad (4.57)$																																				

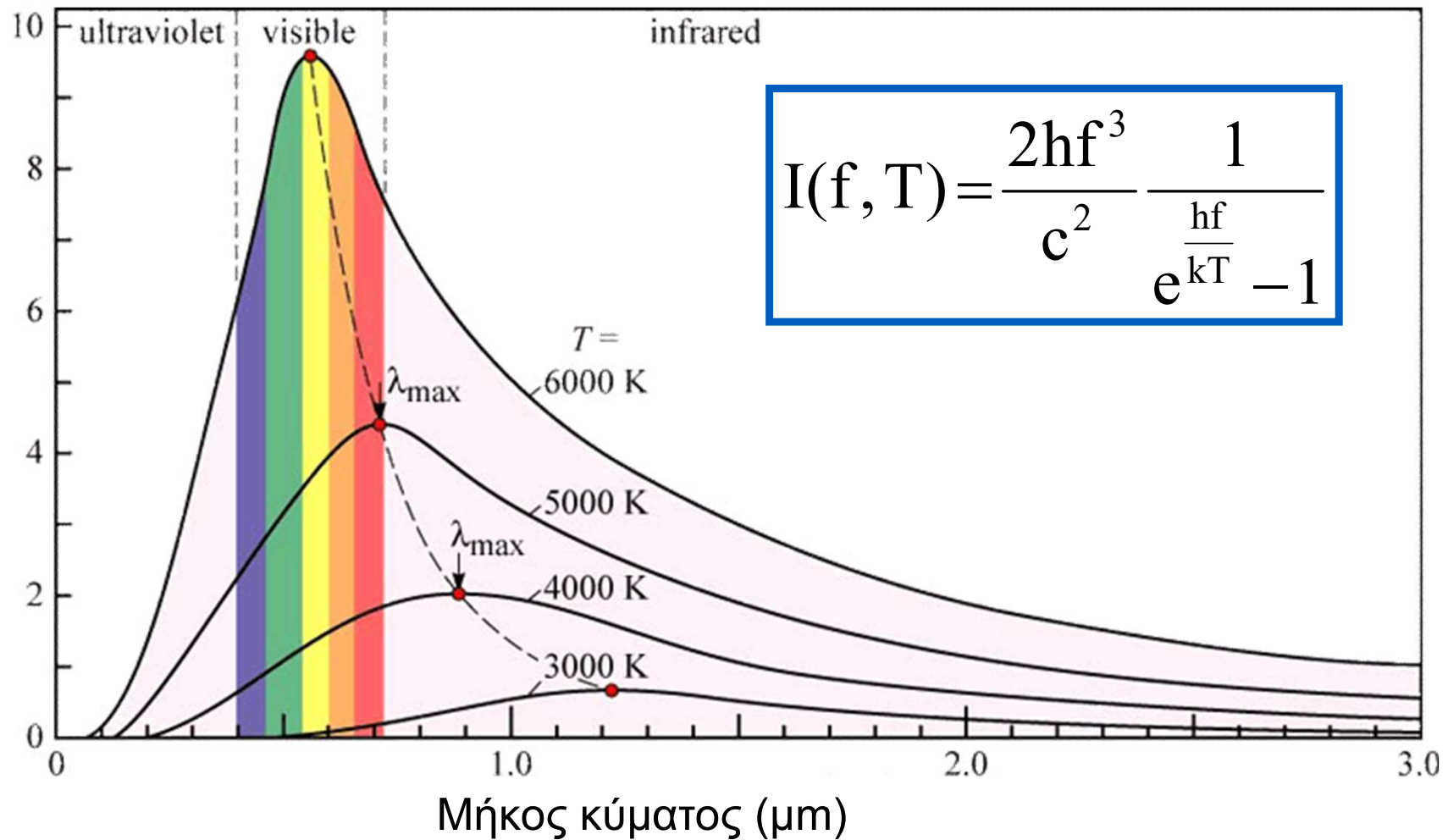
Table 4.10 (Continued)

6	Flow across a cylinder	$C_D = 1 + \frac{10}{\text{Re}_D^{2/3}}; \quad 1 < \text{Re}_D < 10^4 \quad (4.69)$ $\text{Nu}_D = 1.15\text{Re}_D^{1/2}\text{Pr}^{1/3}; \quad \text{Pr} > 0.5 \quad (4.70)$ $\bar{\text{Nu}}_D = 0.3 + \frac{0.62\text{Re}_D^{1/2}\text{Pr}^{1/3}}{[1 + (0.4/\text{Pr})^{2/3}]^{1/4}}; \quad \text{Re}_D < 10^4, \quad \text{Pr} > 0.5 \quad (4.71a)$ $= 0.3 + \frac{0.62\text{Re}_D^{1/2}\text{Pr}^{1/3}}{[1 + (0.4/\text{Pr})^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}_D}{282,000} \right)^{1/2} \right] \quad (4.71b)$ $2 \times 10^4 < \text{Re}_D < 4 \times 10^5$ $= 0.3 + \frac{0.62\text{Re}_D^{1/2}\text{Pr}^{1/3}}{[1 + (0.4/\text{Pr})^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}_D}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (4.71c)$ $4 \times 10^5 < \text{Re}_D < 5 \times 10^6$ $\bar{\text{Nu}}_D = \frac{1}{0.8237 - \ln(\text{Re}_D\text{Pr})^{1/2}}; \quad \text{Re}_D\text{Pr} < 0.2 \quad (4.72)$	$C_D = \text{Drag force}/(1/2)\rho V^2 A_f$ Stagnation line local Nusselt number
7	Flow across a sphere	$C_D = \frac{24}{\text{Re}_D}; \quad \text{Re}_D < 0.5 \quad (4.73)$ $C_D = \frac{24}{\text{Re}_D} \left(1 + \frac{\text{Re}_D^{2/3}}{6} \right); \quad 2 < \text{Re}_D < 500 \quad (4.74)$ $C_D \sim 0.44; \quad 500 < \text{Re}_D < 2 \times 10^5 \quad (\text{Fig. 4.28})$ $\text{Nu}_D = 1.32\text{Re}_D^{1/2}\text{Pr}^{1/3}; \quad \text{Pr} > 0.5 \quad (4.75)$ $\bar{\text{Nu}}_D = 2 + (0.4\text{Re}_D^{1/2} + 0.06\text{Re}_D^{2/3})\text{Pr}^{0.4} \quad (4.76)$ $3.5 < \text{Re}_D < 8 \times 10^4, \quad 0.7 < \text{Pr} < 380$	Stagnation point local Nusselt number Use mean film temperature; or better results can be obtained using a viscosity ratio correction with $n = -1/4$ applied to the convection contribution

8	Laminar natural-convection boundary layer on a vertical wall	$\bar{Nu}_L = 0.68 + 0.670(Ra_L \Psi)^{1/4}; \quad Ra_L < 10^9 \quad (4.85)$ $\Psi = \left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$	
9	Turbulent natural-convection boundary layer on a vertical wall	$\bar{Nu}_L = 0.68 + 0.670(Ra_L \Psi)^{1/4} (1 + 1.6 \times 10^{-8} Ra_L \Psi)^{1/12} \quad (4.86)$ $10^9 < Ra_L < 10^{12}$	Ψ defined in item 8
10	Natural convection on a horizontal cylinder	$\bar{Nu}_D = 0.36 + \frac{0.518 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{4/9}}; \quad 10^{-4} < Ra_D \leq 10^9 \quad (4.87)$ $\bar{Nu}_D = \left\{ 0.60 + 0.387 \left[\frac{Ra_D}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{16/9}} \right]^{1/6} \right\}^2; \quad Ra_D \geq 10^9 \quad (4.88)$	
11	Natural convection on a sphere	$\bar{Nu}_D = 2 + \frac{0.589 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{4/9}}; \quad Ra_D \leq 10^{11}; \quad Pr > 0.5 \quad (4.90)$	
12	Natural convection on a heated horizontal plate facing down, or a cooled plate facing up	$\bar{Nu}_L = 6.5 \left[1 + 0.38 \frac{L}{W} \right] \left[(1 + X)^{0.39} - X^{0.39} \right] Ra_L^{0.13} \quad (4.94)$ $X = 13.5 Ra_L^{-0.16} + 2.2 \left(\frac{L_a}{L} \right)^{0.7}$ $10^6 < Ra_L < 10^{10}; \quad 0.7 < Pr < 4800; \quad 0 < L_a/L < 0.2$	<p>W is the length of the longer side, L is the length of the shorter side, L_a is the length of adiabatic extensions</p> 
13	Natural convection on a heated horizontal plate facing up, or a cooled plate facing down	$\bar{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4}; \quad 10^5 < Ra_L < 2 \times 10^7 \quad (4.95)$ $\bar{Nu}_L = 0.14 Ra_L^{1/3}; \quad 2 \times 10^7 < Ra_L < 3 \times 10^{10} \quad (4.96)$	L is the length of the shorter side

(Continued)

Ακτινοβολία μέλανος σώματος



$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

Ακτινοβολία μέλανος σώματος - Νόμος του Planck

$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

- I** : φασματική ένταση ακτινοβολίας ($\text{W m}^{-2} \text{ s}$)
- T** : θερμοκρασία (K)
- f** : συχνότητα ακτινοβολίας ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$)
- h** : σταθερά του Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$)
- c** : ταχύτητα του φωτός ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)

Ακτινοβολία μέλανος σώματος- Νόμος του Wien

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

λ_{\max} : μήκος κύματος με τη μέγιστη φασματική ένταση ακτινοβολίας (m)

T : θερμοκρασία (K)

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

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών

Εκπομπή ακτινοβολίας – Νόμος Stefan-Boltzmann

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

I : ένταση ακτινοβολίας (W m^{-2})

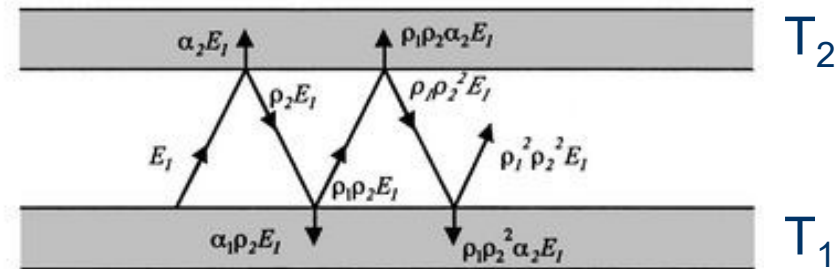
T : θερμοκρασία (K)

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 : ροής θερμότητας (W)

A : επιφάνεια (m^2)

T : θερμοκρασία (K):

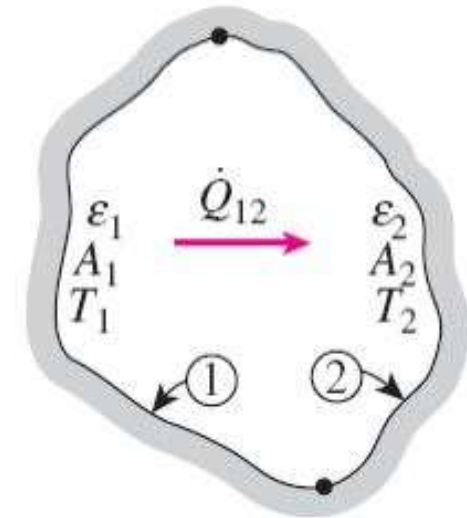
ϵ_{12} : συντελεστής ανταλλαγής ακτινοβολίας

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 μεταξύ δύο σωμάτων

$$q_{12} = \frac{\sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 A_1 A_2 F_{12} (T_1^4 - T_2^4)}{\varepsilon_2 A_2 F_{12} (1 - \varepsilon_1) + \varepsilon_1 A_1 F_{12} (1 - \varepsilon_2) + \varepsilon_1 \varepsilon_2 A_2}$$



q : ροή θερμότητας (W)

T : θερμοκρασία (K)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: συντελεστές εκπομπής-απορρόφησης των δύο επιφανειών

A : επιφάνεια (m^{-2})

F_{12} : συντελεστής σχετικής προβολής των δύο επιφανειών

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

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



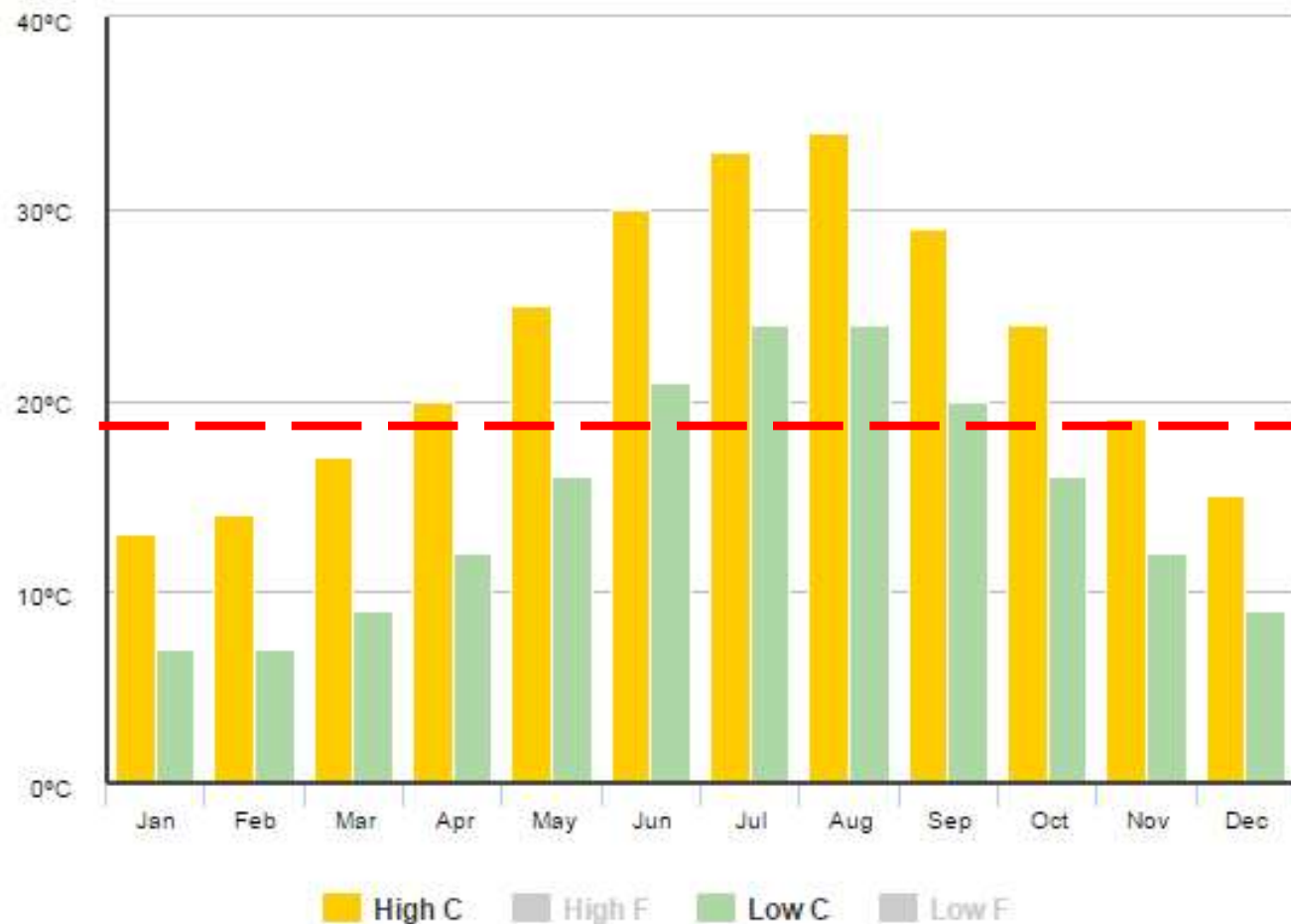
Οι θερμοκουρτίνες έχουν μεγάλη ανακλαστικότητα σε όλα τα μήκη κύματος. Έτσι ανακλούν τη θερμική ακτινοβολία στα φυτά



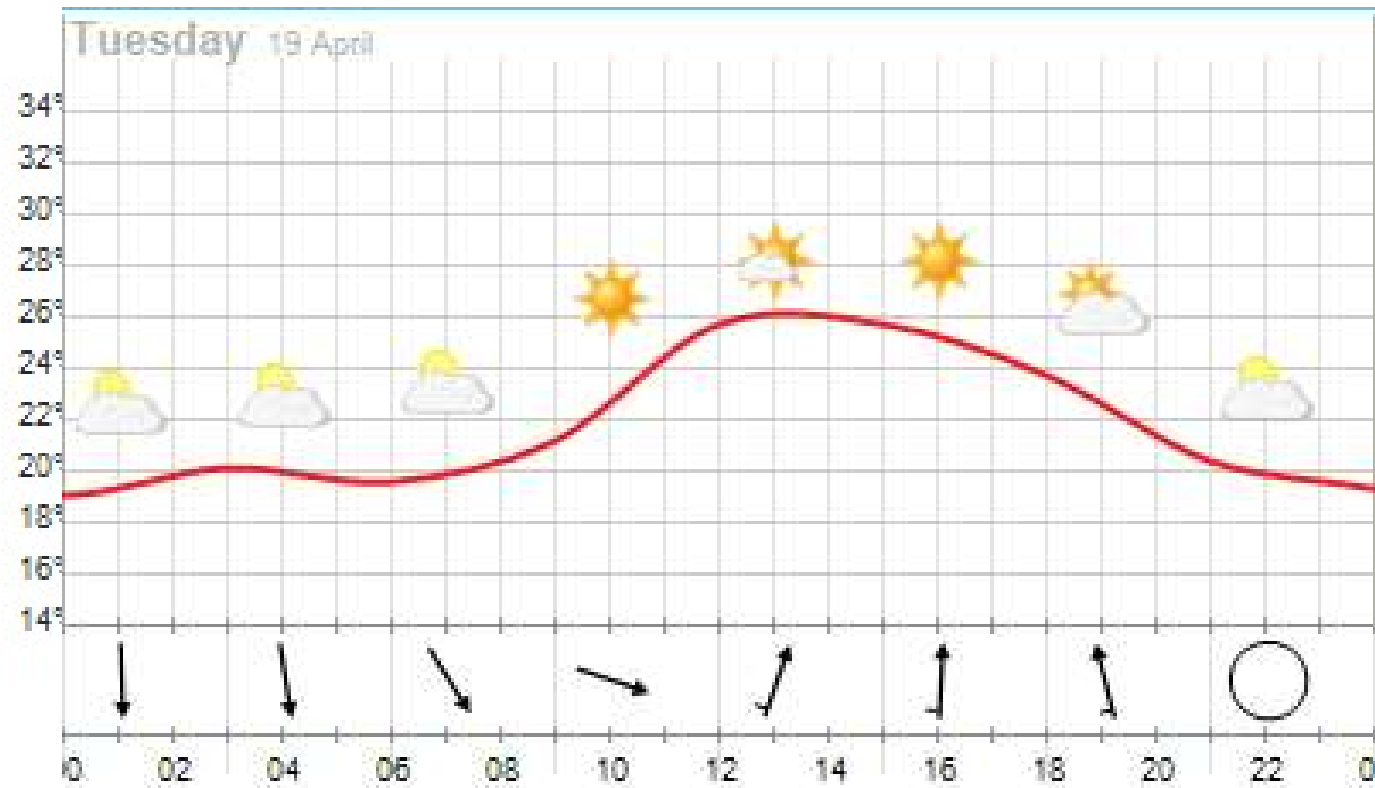
Οι θερμοκουρτίνες εμποδίζουν τη κίνηση του θερμού αέρα προς το κάλυμμα και μειώνουν τις απώλειες λόγω συναγωγής



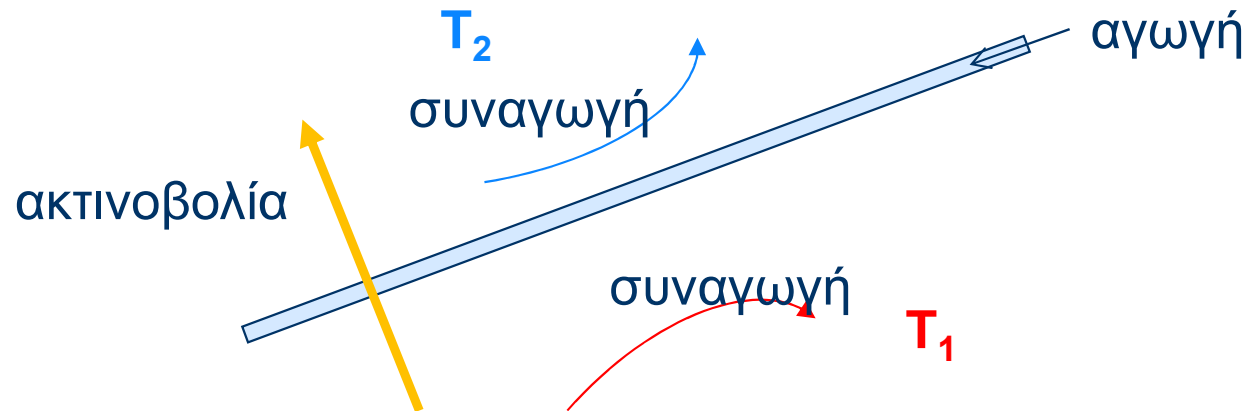
Μέσες μέγιστες/ελάχιστες θερμοκρασίες στην Αττική



Μεταβολές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια 24 ωρών



Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας πλάκας



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

q : ροή θερμότητας (W m^{-2})

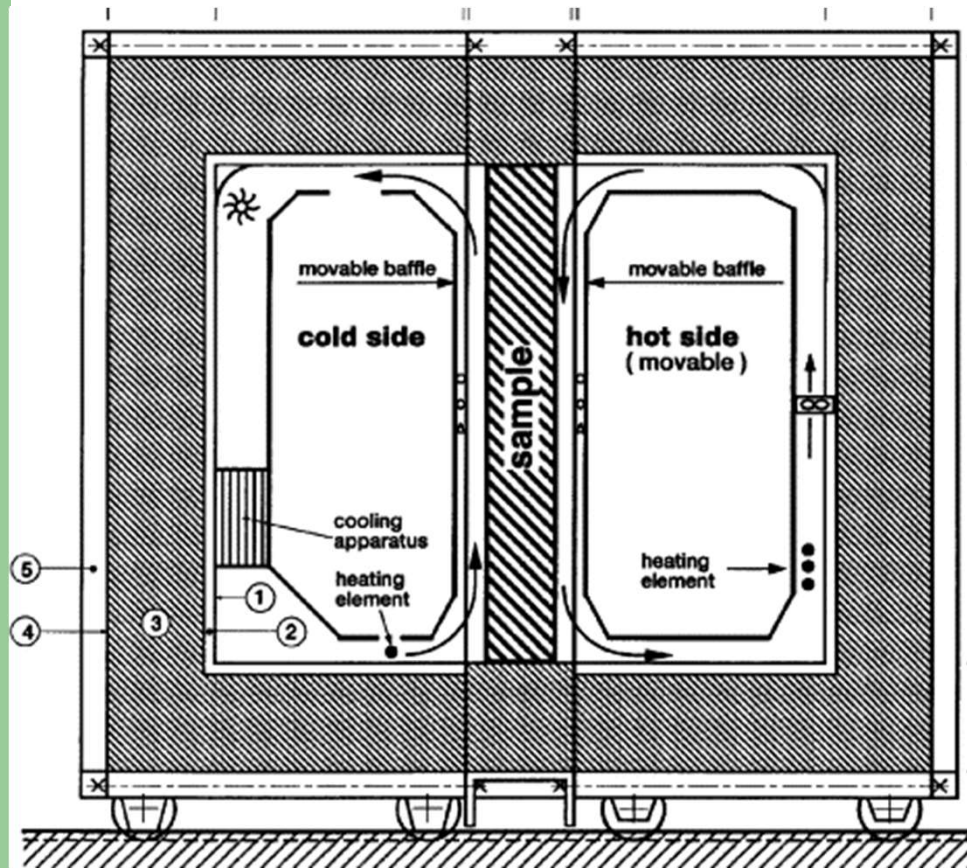
T : θερμοκρασία (K)

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

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υλικών

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

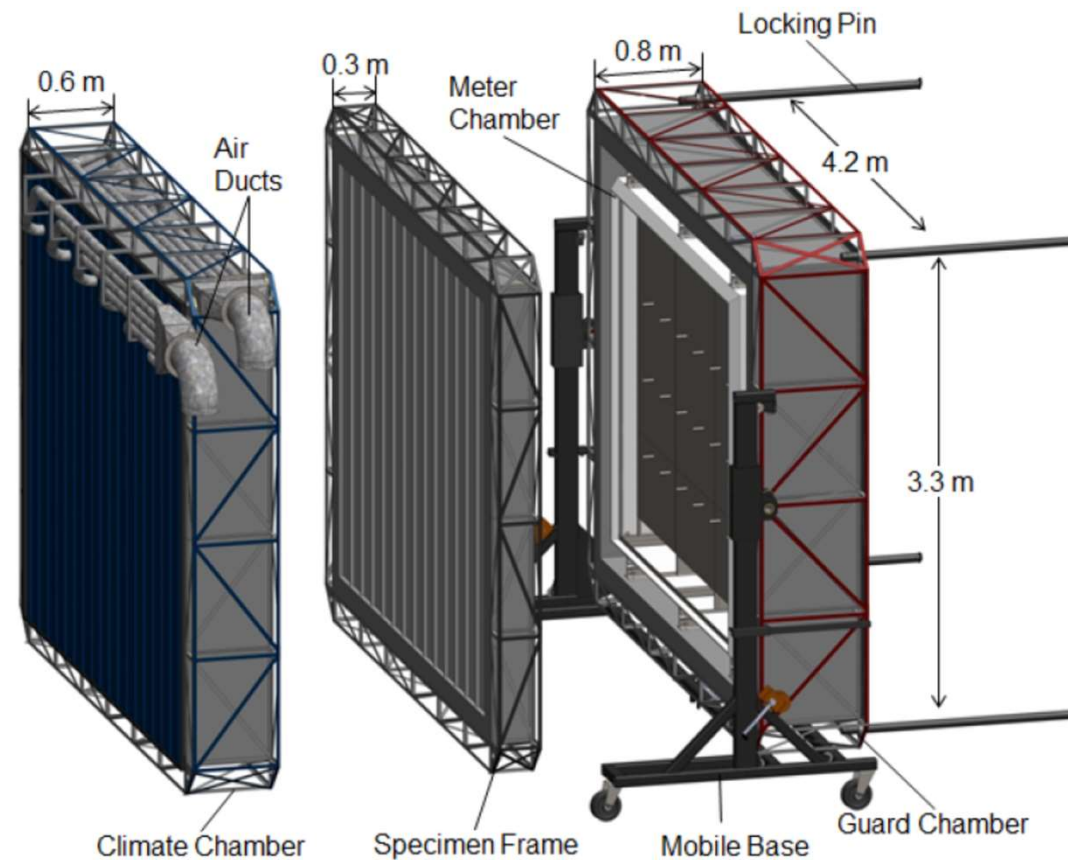


Μέθοδος μέτρησης συντελεστή U



Πειραματική εγκατάσταση μέτρησης συντελεστή U

Μέθοδος μέτρησης του συντελεστή μεταφοράς U



Περιστρεφόμενος Ισοθερμικός Θάλαμος